

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Diseño e Implementación de Material Educativo Computarizado (MEC) para la Enseñanza de la Transferencia de Calor en el Diseño de Condensadores

Iveth Vanessa Angarita Jaimes

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Química

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira

Ingeniero Químico, M. Sc.

Codirector

Diana Marcela Ibarra Mojica

Ingeniera Ambiental, M. Sc.

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga**

2021

“Hay hombres que luchan un día y son buenos.

Hay otros que luchan un año y son mejores.

Hay quienes luchan muchos años y son muy buenos.

Pero hay los que luchan toda la vida: esos son los imprescindibles.”

- Bertolt Brecht

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Contenido

Introducción.....	12
1. Objetivos.....	14
1.1. Objetivo general.....	14
1.2. Objetivos específicos.....	14
2. Estado del arte.....	14
3. Marco teórico.....	15
3.1. Tecnologías de Información y Comunicación (TICs).....	15
3.2. Material Educativo Computarizado (MEC).....	16
3.1.1. Definición.....	16
3.1.2. Características.....	16
3.1.3. Estructura.....	17
3.1.4. Tipos de MEC.....	17
4. Descripción metodológica.....	18
4.1. Análisis de necesidades educativas.....	20
4.2. Planeación para el desarrollo del MEC.....	21
4.2.1. Selección del software.....	21
4.3. Distribución del fundamento teórico del MEC.....	23
4.3.1. Capítulo 1: Transferencia de calor.....	26
4.3.1.1. Calor.....	26
4.3.1.1.1. Calor sensible.....	27
4.3.1.1.2. Calor latente.....	27
4.3.1.2. Equilibrio térmico.....	27
4.3.1.3. Mecanismos de transferencia de calor.....	27

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

4.3.1.3.1. Por conducción.....	27
4.3.1.3.2. Por convección.....	28
4.3.1.3.3. Por radiación.....	28
4.3.2. Capítulo 2: Condensación.....	29
4.3.2.1. Definición.....	29
4.3.2.2. Aplicaciones industriales.....	29
4.3.2.3. Tipos de condensación.....	31
4.3.2.3.1. Tipo gota.....	31
4.3.2.3.2. Tipo película.....	32
4.3.3. Capítulo 3: Condensadores.....	33
4.3.3.1. De contacto directo.....	33
4.3.3.2. De contacto indirecto o de superficie.....	33
4.3.3.2.1. Condensadores de placas.....	34
4.3.3.2.2. De doble tubo.....	35
4.3.3.2.3. De carcasa y tubos.....	36
4.3.4. Capítulo 4: Diseño de condensadores.....	37
4.3.4.1. Especificaciones.....	38
4.3.4.2. Orientación del condensador.....	38
4.3.4.3. Balances de energía.....	40
4.3.4.3.1. Vapor.....	40
4.3.4.3.2. Líquido.....	42
4.3.4.4. Ecuación de diseño para intercambiadores de calor.....	43
4.3.4.4.1. Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD).....	43
4.3.4.4.2. Coeficiente global de transferencia de calor (U).....	47
4.3.4.4.3. Área total de transferencia de calor.....	57

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

4.3.4.5. Disposición de fluidos.	57
4.3.4.6. Especificaciones para tubos.	58
4.3.4.6.1. Diámetro externo de los tubos.....	58
4.3.4.6.2. Longitud de los tubos.....	59
4.3.4.6.3. Arreglo de tubos.	59
4.3.4.6.4. Área superficial de transferencia por tubo.	62
4.3.4.6.5. Número de tubos requeridos.	62
4.3.4.6.6. Diámetro del haz de tubos.....	63
4.3.4.7. Especificaciones para carcasa.	64
4.3.4.7.1. Nomenclatura TEMA.	64
4.3.4.7.2. Baffles deflectores.	65
4.3.4.7.3. Diámetro de la carcasa.....	67
4.3.4.8. Caída de presión permisible.	69
4.3.4.8.1. Para tubos.....	70
4.3.4.8.2. Para carcasa.....	72
4.3.4.9. Estimación de costos del equipo.	75
4.3.4.10. Optimización del diseño.	75
4.4. Diseño del material multimedia.....	77
4.5. Diseño de herramientas interactivas.....	79
4.6. Diseño estructural y educativo del MEC.....	79
4.7. Montaje de la interfaz del MEC.....	80
4.8. Prueba piloto y ajustes.....	81
4.9. Prueba de campo.....	81
5. Resultados.....	81
5.1. Evaluación del MEC.....	84

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES	6
6. Conclusiones.....	85
7. Recomendaciones.....	85
Bibliografía.....	86

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Lista de Figuras

Figura 1. Descripción metodológica para el desarrollo del MEC	20
Figura 2. Factor de corrección para un paso por la carcasa y 2, 4, 6, etc. (cualquier múltiplo de 2) pasos por los tubos	45
Figura 3. Factor de corrección para dos pasos por la carcasa y 4, 8, 12, etc. (cualquier múltiplo de 4) pasos por los tubos	45
Figura 4. Factor de corrección para flujo cruzado de un solo paso con uno de los fluidos de flujo mezclado y el otro no mezclado	46
Figura 5. Factor de corrección para flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado.....	46
Figura 6. Coeficiente de condensación para tubos verticales.....	54
Figura 7. Arreglo de tubos triangular.....	60
Figura 8. Arreglo de tubos triangular rotado	60
Figura 9. Arreglo de tubos cuadrado.....	61
Figura 10. Arreglo de tubos cuadrado rotado	61
Figura 11. Nomenclatura para carcasa según TEMA	65
Figura 12. Espaciamiento en función del diámetro del haz de tubos y tipo de cabezal.....	68
Figura 13. Factor de fricción para tubos	72
Figura 14. Factor de fricción para carcasa	75
Figura 15. Algoritmo de solución para el diseño de condensadores.....	76
Figura 16. Imagen libre de condensador de tubos y carcasa en formato PNG.....	78
Figura 17. Entorno de la Herramienta libre de cálculo	79
Figura 18. Mapa mental para la temática Transferencia de Calor dentro del MEC por GoConqr.	80

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Figura 19. Entorno del inicio del MEC en Genial.ly	82
Figura 20. Contenido por secciones dentro del MEC en Genial.ly	83
Figura 21. Mapa mental para la sección de Transferencia de calor en Genial.ly	83
Figura 22. Intercambiador de calor de tubos y carcasa dentro del entorno Genial.ly.....	84

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Lista de Tablas

Tabla 1. Metodologías para el desarrollo de un software educativo.....	18
Tabla 2. Herramientas informáticas implementadas para el diseño del MEC.....	21
Tabla 3. Estructuración del contenido teórico para el MEC.....	24
Tabla 4. Valores de U para intercambiadores de tubos y carcasa.....	49
Tabla 5. Coeficientes y factores de ensuciamiento para algunos fluidos.....	51
Tabla 6. Valores para conductividad térmica de algunos materiales	52
Tabla 7. Diámetros externos y grosores estándar para tubos	59
Tabla 8. Valores de K_1 y n_1 para hallar el diámetro del haz de tubos.....	64

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Resumen

Título: Diseño e Implementación de Material Educativo Computarizado (MEC) para la Enseñanza de la Transferencia de Calor en el Diseño de Condensadores*

Autor: Iveth Vanessa Angarita Jaimes**

Palabras Clave: MEC, TICs, Transferencia de Calor, Condensación, Condensadores, Tubos y Carcasa, Diseño.

Descripción:

El Material Educativo Computarizado (MEC) es una herramienta resultante del desarrollo en TICs, que apoya el proceso de enseñanza-aprendizaje en el ámbito educativo disponiendo de forma estratégica el contenido teórico con ayuda de elementos multimedia para facilitar su comprensión. El siguiente proyecto presenta la creación e implementación de un MEC para la enseñanza de la transferencia de calor en el diseño de condensadores de forma didáctica, organizada y práctica a través de mapas mentales, imágenes, animaciones, videos y otros recursos multimedia dentro de un entorno pedagógico y de fácil navegación. Dentro de esta línea, se recopiló el fundamento teórico necesario para comprender exitosamente el tópico y se estructuró por secciones; cada una de estas con su respectivo módulo evaluativo. Se realizó el ensamble del contenido teórico y multimedia dentro del entorno de Genial.ly y, se sometió a prueba para verificar su funcionamiento y utilidad. Finalmente, se obtuvo un MEC estructurado en 6 secciones teórico-prácticas con diferentes vínculos externos a videos e información adicional para profundizar en las diferentes temáticas expuestas. En adición, se incluye un ejercicio práctico para ejemplificar la resolución de problemas relacionados con la temática principal y una herramienta libre de cálculo para estimar el diseño de condensadores de tipo tubos y carcasa.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. Ingeniero Químico M. Sc. Codirector: Diana Marcela Ibarra Mojica. Ingeniera Ambiental M. Sc.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Abstract

Title: Design and Implementation of Computerized Educational Material (MEC) for Teaching Heat Transfer in Condenser Design.

Author: Iveth Vanessa Angarita Jaimes

Key Words: CEM, ICTs, Heat Transfer, Condensation, Condenser, Shell and Tubes, Design.

Description:

The Computerized Educational Material (CEM) is a tool resulting from the development of ICTs, which supports the teaching-learning process in the educational field by strategically organizing the theoretical content with the help of multimedia elements to facilitate its understanding. The following project presents the creation and implementation of an ECM for teaching heat transfer in condenser design in a didactic, organized and practical way through mind maps, images, animations, videos and other multimedia resources within a pedagogical and hyped environment. Within this line, the theoretical foundation necessary to successfully understand the topic was compiled and divided into sections; each one of these with its respective evaluation module. The theoretical and multimedia content was assembled within the Genial.ly environment and tested to verify its functionality and usefulness. In addition to this, a CEM was obtained and structured into 6 theoretical-practical sections with different external links to videos and additional information in order to deepen in the different topics presented. Finally, this project includes a practical exercise to exemplify the resolution of problems related to the main theme as well as a free calculation tool to estimate the design of tube and shell-like condensers.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. Department of Chemical Engineering. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. Chemical Engineer M. Sc. Codirector: Diana Marcela Ibarra Mojica. Environmental Engineer M. Sc.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Introducción

La actual emergencia sanitaria por COVID-19 ha impactado de forma transversal a la sociedad contemporánea pues ésta se ha visto obligada a replantear su cotidianidad y el desarrollo de múltiples labores en respuesta a las limitaciones ligadas a la pandemia. No obstante, el gran desarrollo como resultado del devenir tecnológico, también ha promovido una nueva cultura en torno a modernas herramientas tecnológicas para dar continuidad, optimizar y facilitar diversas tareas. De forma particular, la educación ha pasado de la presencialidad a la virtualidad cambiando la dinámica enseñanza-aprendizaje y, por ende, sus técnicas.

El constante desarrollo en las Tecnologías de Información y Comunicación (TICs) dirigidas a la educación, ha impulsado la creación e implementación de nuevas estrategias digitales para la enseñanza con el fin de facilitar el aprendizaje “constructivista y significativo” (Sánchez, 2014, p.7) . Estas deben considerar la flexibilidad, versatilidad, interactividad y conectividad para generar el impacto esperado en el proceso académico del estudiante (Salmerón, 2017). En correspondencia, surgen alternativas como los Materiales Educativos Computarizados (MECs) que funcionan como herramienta de apoyo para el aprendizaje.

La Universidad Industrial de Santander contempla dentro de sus propósitos, el uso de TICs para mejorar la calidad y cobertura de la educación mediante la aplicación de diferentes herramientas que favorezcan el aprendizaje a través de la didáctica y tecnología. En este orden, el compromiso institucional por parte de la Escuela de Ingeniería Química con la formación académica integral, precisa la implementación de laboratorios que permitan poner en práctica, principalmente, los conocimientos teóricos adquiridos en materia de termodinámica, fenómenos de transporte y operaciones unitarias; así como también, el diseño y dimensionamiento de equipos que hacen parte de numerosos procesos industriales, como lo son los condensadores

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

implementados en industrias termoeléctricas, separación de mezclas líquidas y procesos de destilación para la refinación del petróleo, entre otros.

Dentro de este marco, con el fin de asistir el aprendizaje en el tópico correspondiente al diseño de condensadores de calor para estudiantes de pregrado de Ingeniería Química, se propone la creación de un MEC que permita facilitar el proceso de enseñanza y la adquisición de habilidades y destrezas, así como la integración del fundamento teórico con la práctica en consonancia con los pilares para la correcta implementación de esta herramienta.

El objetivo principal del presente proyecto es desarrollar un MEC para el estudio de la transferencia de calor en el diseño de equipos de condensación de tubos y carcasa. Este contempla varios módulos que reúnen el fundamento teórico necesario para comprender cada temática, así como también recursos multimedia que apoyan y facilitan el proceso de aprendizaje a través de una plataforma didáctica.

Adicionalmente, el material cuenta con cuestionarios dispuestos a evaluar objetivamente el grado de aprendizaje por parte del estudiante y reconocer las falencias existentes con el ánimo de corregir y mejorar. Para complementar este proceso, se provee material adicional para profundizar en los componentes teóricos como heurísticas, un ejercicio práctico y una herramienta libre de cálculo para estimar el diseño de un equipo de condensación.

El éxito de herramientas como los MECs reside en el interés del estudiante por complementar sus conocimientos, así como también del docente a cargo, pues desde su posición se hace necesario que dé a conocer la existencia del material y promueva activamente su uso.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Desarrollar un material educativo computarizado para apoyar el proceso enseñanza-aprendizaje de la transferencia de calor en condensadores.

1.2. Objetivos específicos

- Recopilar el fundamento teórico correspondiente a la transferencia de calor en procesos de condensación.
- Diseñar un software computarizado interactivo para apoyar la enseñanza en el diseño de condensadores.
- Proporcionar una herramienta virtual que facilite la comprensión de la transferencia de calor en condensadores.

2. Estado del arte

El desarrollo en materia de TICs dentro del territorio colombiano se remonta hacia finales de los años setenta junto con la era de los (micro) computadores; sin embargo, solo hasta los años noventa se fortalece la relación entre las TICs y la educación mediante la generación de reformas educativas y el avance tecnológico. En consonancia, se introduce la informática educativa como respuesta a los cambios y necesidades en el ámbito educativo de la época (Parra, 2012).

Los primeros trabajos realizados por académicos a nivel nacional se hicieron bajo la denominación de Material Educativo Computarizado (MEC) con el computador como herramienta central para la enseñanza, procesador de ideas y potenciador de la capacidad creativa e innovadora del cerebro desde lo audiovisual aprovechando el desarrollo tecnológico. Estos primeros proyectos establecieron los pilares iniciales para la creación de un material educativo, destacando la facilidad

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

en el manejo de la interfaz para los usuarios y el libre acceso al software, o en su defecto, su libre redistribución (Anaya y Hernández, 2010).

Dentro de la Universidad Industrial de Santander se han diseñado e implementado diversos MECs para apoyar el aprendizaje en diferentes asignaturas o temáticas específicas, especialmente en la Escuela de Ingeniería Química, como los desarrollados por Aguilera y Díaz (2015), Ballesteros y Claro (2009), Chacón (2014), Contreras y Sánchez (2005), Olarte y Bellido (2005) y Sepúlveda y Yancy (2009), encontrándose que un entorno atractivo, interactivo y de fácil navegación es el común denominador en el desarrollo y diseño de estas herramientas. Además, estos proyectos promueven el libre movimiento dentro del contenido para que sea el estudiante quien guíe el recorrido y adquiera el conocimiento mediante su interacción con las diferentes actividades de forma conjetural.

En síntesis, los proyectos realizados en torno al desarrollo de MECs persiguen un fin común: la búsqueda por fortalecer la relación entre el estudiante y el conocimiento a través de los diferentes mecanismos desarrollados desde las TIC. Adicionalmente, sugieren que los métodos convencionales de enseñanza deben fusionarse con alternativas modernas y eficientes para optimizar los resultados en el proceso de aprendizaje de los estudiantes. En esta línea, el presente proyecto busca apoyar el aprendizaje de la transferencia de calor a través de un software computarizado que permita la sinergia entre teoría y práctica de forma virtual.

3. Marco teórico

3.1. Tecnologías de Información y Comunicación (TICs)

Para Jaimes y Callejas y la UNESCO (como se citó en Agnelli, 2000), las TICs se definen como *“el conjunto de tecnologías que permiten la adquisición, producción, almacenamiento, tratamiento, transmisión, registro y presentación de información en forma de voz, imágenes y*

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

datos contenidos en señales de naturaleza acústica, óptica o electromagnética” (p.47). Estas tecnologías se caracterizan por ser innovadoras, dinámicas y accesibles, además facilitan numerosas tareas, por lo que han incursionado también en el ámbito educativo para apoyar el proceso enseñanza-aprendizaje garantizando la adquisición de conocimientos para el desarrollo de diferentes tareas y la comprensión de diversas temáticas.

3.2. Material Educativo Computarizado (MEC)

3.1.1. Definición

Dentro de las estrategias de apoyo propuestas desde los procesos de enseñanza, se instaaura el MEC como “un software diseñado en el ámbito educativo para ser empleado en cursos o programas que cumplen funciones educativas” (Aguilera y Díaz, 2015), es decir, funciona como una herramienta soporte para el proceso enseñanza-aprendizaje. Dentro de los recursos usados para su desarrollo se considera el uso de herramientas didácticas como animaciones, gráficos y sonidos para captar la atención del usuario y promover la adquisición del conocimiento de forma alternativa.

3.1.2. Características

Para el diseño de un material computarizado, es necesario tener en consideración ciertos aspectos pedagógicos que deben ser garantizados y que, además, permiten el buen desarrollo del MEC como:

- El computador como soporte central del proceso.
- Buena práctica de enseñanza garantizando un entorno participativo y estimulante.
- Énfasis en la independencia para promover el rol activo del estudiante.
- Objetivos claros y específicos.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

- Fácil accesibilidad y navegación.

3.1.3. Estructura

Estos softwares responden a una estructura definida para garantizar su correcto funcionamiento, la cual está conformada por:

- Interfaz: módulo que permite la comunicación (diálogo) con el usuario y, por ende, garantiza la interactividad.
- Base de datos: módulo que proporciona el fundamento teórico y material multimedia disponible.
- Motor: módulo encargado de coordinar el algoritmo de la interfaz y responder antes las respuestas proporcionadas por el usuario.

3.1.4. Tipos de MEC

Según Dwyer (1974), en función del enfoque educativo que predomina en el material educativo, los MECs se pueden clasificar como algorítmicos o heurísticos. Así:

- Un MEC se considera de tipo algorítmico si la intención es transmitir conocimiento a través de diferentes tareas secuenciales que permitan que el estudiante asimile el máximo conocimiento posible.
- Un MEC es de tipo heurístico si la enseñanza se imparte a través de la experiencia y decisión, es decir, mediante la presentación de diferentes escenarios donde el estudiante debe explorar conjeturalmente para llegar a la solución.

Adicionalmente, los MECs se pueden clasificar según las funciones educativas que cumpla como: simuladores, tutoriales, juegos educativos, entre otros.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

4. Descripción metodológica

Para el diseño y desarrollo del MEC, se debe garantizar la presencia de las etapas principales para la construcción e implementación de un proceso sistemático, es decir, el diseño, desarrollo, prueba y ajuste. Diferentes metodologías han sido planteadas en torno al desarrollo de softwares educativos (ver Tabla 1). Sin embargo, se propone seguir la metodología planteada por Galvis (1993), pues además de agrupar dichas etapas, posee un fuerte componente empírico ya que ha sido replicada múltiples veces en la elaboración de diferentes tipos de MECs, es de fácil aplicación y desarrollo y, está suficientemente documentada para seguir sus lineamientos a cabalidad.

Tabla 1

Metodologías para el desarrollo de un software educativo

Autor	Nombre de metodología	Etapas
Álvaro Galvis Panqueva	Metodología para el desarrollo de materiales educativos computarizados	<ol style="list-style-type: none"> 1. Análisis de necesidades educativas 2. Selección o planeación del desarrollo del MEC 3. Ciclos para la selección o desarrollo del MEC 4. Diseño del MEC 5. Entorno para el diseño del MEC 6. Entorno del diseño 7. Diseño educativo del MEC 8. Desarrollo del MEC 9. Prueba piloto del MEC 10. Prueba de campo del MEC

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Ovalle y Padilla	Para el desarrollo de un software educativo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Análisis y estudio de factibilidad del proyecto 2. Diseño y esquematización pedagógica de la aplicación 3. Desarrollo y programación 4. Distribución
Bertha López, Gustavo Peláez y María Abud	Metodología para el desarrollo de software educativo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determinar la necesidad de un software educativo 2. Formación del equipo de trabajo 3. Análisis y delimitación del tema 4. Definición de usuario 5. Estructuración del contenido 6. Elección del tipo de software para desarrollar 7. Diseño de interfaces 8. Definición de las estructuras de evaluación 9. Elección del ambiente de desarrollo 10. Creación de una versión inicial 11. Prueba de campo 12. Mercadotecnia 13. Entrega del producto final

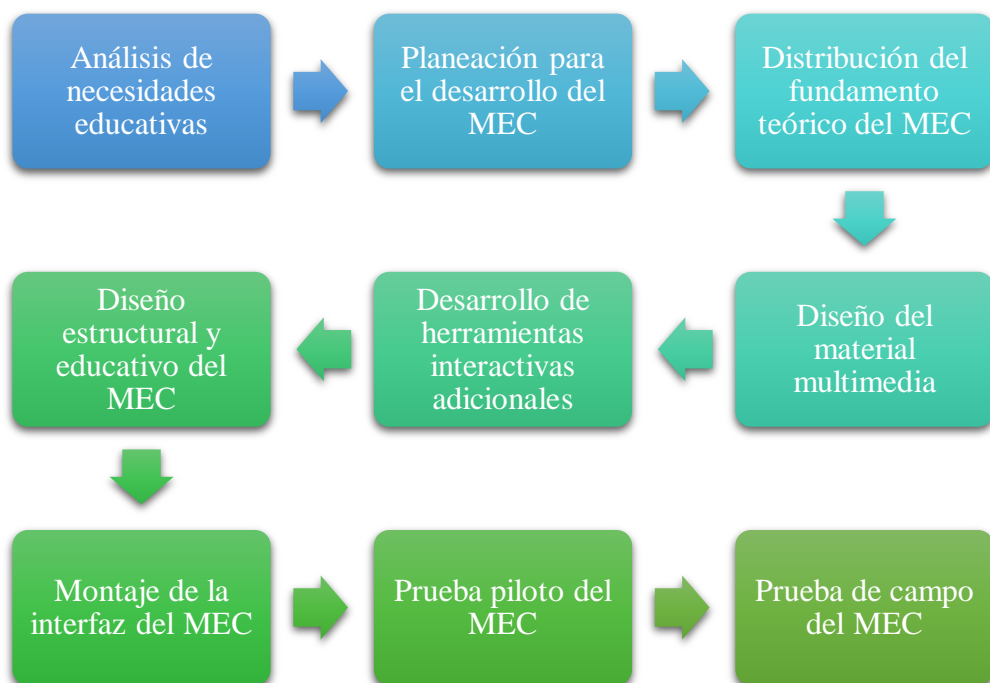
CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Nota. Adaptada de Leguizamón (2006)

Esta metodología propone realizar un análisis del objeto de aprendizaje para el que se va a realizar el diseño del MEC y la necesidad educativa con el fin de conocer el usuario y el fundamento teórico que debe ser expuesto. Posteriormente, se realiza el diseño de la interfaz considerando los requerimientos de software y hardware para el correcto desempeño, los elementos multimedia y también el contenido teórico. Para finalizar, se lleva a cabo una fase de prueba y ajuste compuesta por una prueba piloto y una prueba final, que tiene como objetivo optimizar el resultado final para su implementación. La Figura 1 muestra la secuencia de actividades planteadas para el diseño del software computarizado.

Figura 1

Descripción metodológica para el desarrollo del MEC



4.1. Análisis de necesidades educativas

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

La Transferencia de calor es una temática transversal en la formación de Ingenieros Químicos pues es base central de gran cantidad de fenómenos y procesos industriales. El programa de Ingeniería Química imparte conocimientos relacionados con este tópico a través de asignaturas tales como: termodinámica, fenómenos de transporte, análisis de procesos químicos y laboratorios de procesos. A nivel laboratorio, los procesos de condensación son altamente aplicables en equipos como el termosifón, minievaporador y la torre de destilación. Por esto, resulta útil la implementación de un material complementario que permita ahondar en este tema. Con el propósito de presentar la información pertinente para apoyar y comprender la transferencia de calor aplicada al diseño de equipos de condensación, se propone el presente material educativo computarizado.

4.2. Planeación para el desarrollo del MEC

4.2.1. Selección del software

La creación del material educativo requiere la implementación de varios programas para su diseño integral. Algunos de estos, particularmente, se enfocan en la elaboración de material multimedia, organización y estructuración de la información. La Tabla 2 presenta las diferentes herramientas informáticas utilizadas durante la construcción del MEC, además, se expone su uso dentro del diseño.

Tabla 2

Herramientas informáticas implementadas para el diseño del MEC

Nombre	Función
--------	---------

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Genial.ly	<p>Es un software para crear contenidos interactivos. Permite crear imágenes, infografías, presentaciones, entre otros, empleando efectos interactivos y animaciones. Esta herramienta fue la base de la interfaz del material, pues sobre ésta se realizó todo el montaje de fundamento teórico y la vinculación con el material de apoyo multimedia.</p>
CorelDRAW 2019	<p>Es una aplicación informática de diseño gráfico vectorial. En este programa se diseñaron las figuras estáticas y algunas secuenciales para ser usadas como animaciones, así como también banners y contenido visual para enriquecer la estética de la interfaz.</p>
Microsoft Word 2008	<p>Es un procesador de texto que permite la creación y edición de documentos de este tipo. Sobre esta herramienta se concentró todo el fundamento teórico necesario para su posterior vinculación con el entorno en Genial.ly.</p>
Picasion	<p>Es una aplicación en línea que permite crear un avatar o un gif animado de forma sencilla. Esta herramienta se utilizó para generar animaciones a partir de las figuras diseñadas en CorelDRAW.</p>
GoConqr	<p>Este es un entorno de estudio personalizado online y gratuito que ayuda a mejorar el aprendizaje a través de herramientas como mapas mentales, fichas de estudio, apuntes online y test. Sobre este entorno se desarrollaron los diferentes mapas mentales para presentar la información estructurada por sección.</p>
Microsoft Excel 2008	<p>Es un programa informático que permite realizar tareas contables y financieras gracias a sus funciones,</p>

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

desarrolladas específicamente para crear y trabajar con hojas de cálculo.

Con ayuda de este programa se desarrolló la herramienta libre de cálculo para brindar una estimación académica en el diseño de equipos de condensación.

Es la funcionalidad que ofrece el buscador para encontrar fotografías, dibujos, infografías y otros elementos visuales. Bajo esta herramienta se buscaron las imágenes y animaciones libres que se incluyeron en el MEC como apoyo multimedia para facilitar el aprendizaje. Se destacan buscadores como Pixabay, Freepik y Unsplash.

Google Imágenes

4.3. Distribución del fundamento teórico del MEC

Con el propósito de incluir dentro del material educativo todo el fundamento teórico necesario para comprender a cabalidad la temática en cuestión, se realizó la recopilación de la información pertinente consultando diferentes autores para verificar la unificación en conceptos y modelos matemáticos, así como para complementar los diferentes temas que conforman el cuerpo teórico del proyecto. De esta forma, se planteó una estructura jerárquica, donde se integran nuevos conceptos mientras se conduce de lo general a lo particular, evidenciándose la relación directa entre los temas de forma práctica.

La correcta presentación del contenido del MEC es de vital importancia para su óptimo desarrollo pues facilita la asimilación de los conceptos teóricos. Dentro de esta línea, se estructuró la información en 5 capítulos teóricos, yendo desde la transferencia de calor hasta el diseño de intercambiadores de calor de tubos y carcasa para procesos de condensación. En adición, se planteó una sección que contempla diversas heurísticas útiles para el diseño, un ejercicio práctico con el

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

fin de aplicar los conocimientos adquiridos y una herramienta libre de cálculo para estimar el diseño de un condensador de tubos y carcasa. El contenido se dividió así:

Capítulo 1: Transferencia de calor

Capítulo 2: Condensación

Capítulo 3: Condensadores

Capítulo 4: Diseño de condensadores

Capítulo 5: Algoritmo de solución para el diseño

Capítulo 6: Material adicional

Sin embargo, la Tabla 3 muestra la estructuración del contenido por secciones (o capítulos) y las temáticas que se abordaron en cada una de estas para comprender exitosamente cada módulo. Cabe anotar que el fundamento teórico presentado en el MEC se extrajo de literatura relacionada directamente con la temática central, es decir, la transferencia de calor. Lo anterior a través de libros como Sinnott, Coulson y Richardson, 2005; Çengel, 2016; Kern, 1999; Incropera y Dewitt, 1996. Además, la organización estructural del contenido teórico se adaptó en función de la tesis desarrollada por Bohórquez y Hernández, 1992).

Tabla 3

Estructuración del contenido teórico para el MEC

Capítulo	Contenido
1. Transferencia de calor	1.1. Calor sensible 1.1.1. Calor sensible 1.1.2. Calor latente 1.2. Equilibrio térmico 1.3. Mecanismos de transferencia de calor

- 1.3.1. Conducción
- 1.3.2. Convección
- 1.3.3. Radiación

- 2. Condensación
 - 2.1. Definición
 - 2.2. Aplicaciones industriales
 - 2.3. Tipos de condensación
 - 2.3.1. Tipo gota
 - 2.3.2. Tipo película
 - 2.4. Mecanismo de la condensación tipo película

- 3. Intercambiadores de calor: condensadores
 - 3.1. Tipos de condensadores
 - 3.1.1. De contacto directo
 - 3.1.2. De contacto indirecto
 - 3.1.2.1. De placas
 - 3.1.2.2. De tubos (tubulares)
 - 3.1.2.2.1. Doble tubo
 - 3.1.2.2.2. Tubos y carcasa

- 4. Diseño de condensadores
 - 4.1. Especificaciones
 - 4.2. Orientación del condensador
 - 4.3. Balances de energía
 - 4.3.1. Vapor
 - 4.3.2. Líquido
 - 4.4. Ecuación de diseño para intercambiadores de calor
 - 4.4.1. Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD)
 - 4.4.2. Coeficiente global de transferencia de calor (U)
 - 4.4.3. Área total de transferencia de calor
 - 4.5. Disposición de fluidos
 - 4.6. Especificaciones para tubos
 - 4.6.1. Diámetro externo de los tubos
 - 4.6.2. Longitud de los tubos
 - 4.6.3. Arreglo de tubos
 - 4.6.4. Área superficial de transferencia por tubo

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

	4.6.5. Número de tubos requeridos
	4.6.6. Diámetro del haz de tubos
	4.7.Especificaciones para carcasa
	4.7.1. Nomenclatura TEMA
	4.7.2. Baffles deflectores
	4.7.3. Diámetro de la carcasa
	4.8.Caída de presión permisible
	4.8.1. Para tubos
	4.8.2. Para carcasa
	4.9.Estimación de costos del equipo
	4.10. Optimización del diseño
5. Algoritmo de solución	5.1.Algoritmo de solución para el diseño de condensadores
6. Material adicional	6.1.Heurísticas para el diseño 6.2.Ejercicio práctico 6.3.Herramienta libre de cálculo

A continuación, se expone a detalle cada capítulo teórico abordado.

4.3.1. Capítulo 1: Transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. Este intercambio de calor se produce desde el medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja y se detiene cuando ambos alcanzan la misma temperatura.

4.3.1.1. Calor. Es la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. El calor puede ser transferido por conducción, convección o radiación, y, además, puede ser de carácter sensible o latente.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

4.3.1.1.1. Calor sensible. La parte de la energía interna de un sistema que está asociada con la energía cinética de las moléculas se conoce como calor sensible. Este tipo de calor no produce cambio de fase del fluido que lo recibe, solo variación en la temperatura.

4.3.1.1.2. Calor latente. Este es un proceso de cambio de fase y, debido a esta energía agregada, un sistema en fase gaseosa se encuentra en un nivel más alto de energía interna que si estuviera en fase sólida o líquida. La energía interna asociada con la fase de un sistema se llama calor latente. Por ejemplo, si un fluido en estado líquido recibe calor de tipo latente, cambiará su estado a gas.

4.3.1.2. Equilibrio térmico. Sin importar el tipo de calor que reciba o ceda un sistema, la transferencia de calor se dará hasta que los fluidos involucrados alcancen la misma temperatura, es decir, el equilibrio térmico. Como se mencionó anteriormente, el intercambio se da siempre desde el fluido más caliente hacia el más frío.

4.3.1.3. Mecanismos de transferencia de calor. El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja.

4.3.1.3.1. Por conducción. La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. La conducción se rige por la ley de Fourier de la conducción del calor, así:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde k es la conductividad térmica del material, A es el área de transferencia de calor y dT/dx es el gradiente de temperatura.

4.3.1.3.2. Por convección. La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. La convección puede ser forzada si el fluido es obligado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Por otro lado, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido. La convección se rige por la ley de Newton del enfriamiento, así:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A_s es el área superficial de transferencia de calor, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie.

4.3.1.3.3. Por radiación. La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. La radiación se rige por la ley de Stefan-Boltzmann, así:

$$Q_{emitida} = \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, A_s es el área superficial de transferencia de calor y T_s es la temperatura de la superficie.

4.3.2. Capítulo 2: Condensación

4.3.2.1. Definición. La condensación es el cambio de estado que tiene lugar cuando un vapor saturado cede su calor latente para convertirse en un líquido saturado. Para que este fenómeno suceda, es necesario que la temperatura del vapor se reduzca por debajo de su temperatura de saturación, T_{sat} . Por tratarse de un proceso de transferencia de calor latente la condensación se realiza a temperatura y presión constante.

Cuando el vapor a condensar está a una temperatura mayor a la de saturación, el vapor está sobrecalentado y debe someterse a un desobrecalentamiento para remover el calor sensible antes de efectuar la condensación. Si se requiere un líquido a temperaturas por debajo de la saturación, se debe remover parte del calor sensible del condensado para obtener líquido subenfriado.

El fenómeno de la condensación se lleva a cabo de diferentes formas, teniendo en cuenta la posición y la geometría de la superficie en donde se efectúa, la clase de vapor a condensar y el tipo de condensación.

4.3.2.2. Aplicaciones industriales. Los condensadores de vapores son equipos altamente utilizados en las industrias químicas por su alto rango de aplicabilidad, pues cumplen con diferentes funciones en función del proceso en el que sean implementados.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

En **plantas termoeléctricas** presentan dos servicios: uno es el de recuperar el vapor de agua de las turbinas para recircularlo a las calderas como líquido altamente puro, el otro es el de aumentar la eficiencia del ciclo térmico de las plantas, debido a que el vapor que sale de las turbinas cede su calor latente a bajas temperaturas cuando el condensador trabaja a condiciones de vacío. Los condensadores de las plantas eléctricas son de gran tamaño y de diseño especial debido a los grandes volúmenes de vapor que manejan y a las extremas condiciones de temperatura y presión.

En **procesos de refrigeración** son de gran utilidad los condensadores para devolverle la condición de líquido al refrigerante para recircularlo y aprovecharlo al máximo. Los equipos utilizados en esta industria son de menor tamaño debido a la alta presión y las bajas cantidades de flujo de vapor que manejan.

En la **industria química**, la separación de una mezcla líquida se lleva a cabo en un proceso de ebulliciones y condensaciones sucesivas, en el interior de una torre de destilación. Cuando una mezcla líquida se lleva a ebullición los vapores resultantes tendrán mayor composición de volátiles que la mezcla original; si estos vapores se condensan y vuelven a ebulir, en los vapores aumenta aún más la concentración de volátiles; esto es lo que también se conoce como destilación. Los vapores obtenidos en la cima de la columna de destilación generalmente son llevados a un condensador que entrega líquido el producto: lo mismo que la corriente de reflujo a la torre.

En la **refinación del petróleo**, la destilación se utiliza para separar los componentes livianos de los pesados de la mezcla de hidrocarburos. Las diferentes fracciones se retiran como vapor en diferentes niveles de la torre, cada corriente de vapor es llevada a un condensador para obtener los productos líquidos. El condensador es indispensable en los procesos de destilación porque el producto de cima de la torre debe convertirse a líquido para cumplir las condiciones termodinámicas del reflujo, indispensables para el buen funcionamiento de la torre y para facilitar

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

y reducir costos en el transporte y almacenamiento del producto. En cualquier proceso de la industria química en que se desee separar líquidos con alto grado de pureza, es la destilación y posterior condensación, el modelo más usual y generalmente más económico.

4.3.2.3. Tipos de condensación. Múltiples observaciones y experimentos han llevado a concluir que la condensación de un vapor puede producirse, dependiendo de la mojabilidad de la superficie de condensación respecto del condensado. La mojabilidad de la superficie la da el ángulo de contacto medido entre la superficie de una gota y la pared de condensación. En función de este factor, la condensación puede darse por gotas o por película.

4.3.2.3.1. Tipo gota. La condensación tipo gota se presenta cuando el ángulo de contacto, medido entre la superficie de una gota y la pared vertical de condensación, puede mantener un valor diferente de cero.

Bajo este mecanismo el líquido condensado no presenta ninguna afinidad con la pared de condensación; en consecuencia, las gotas que se forman no la cubren completamente (como una película), sino que caen dejando la superficie libre para que se formen nuevas gotas, manteniendo siempre una distribución discreta del condensado.

La condensación tipo gota de coeficientes de transferencia de calor (h) más altos que los producidos en la condensación tipo película. Si en un equipo se logra mantener la condensación tipo gota, su tamaño será considerablemente menor que el de aquel equipo donde se desarrolle la condensación tipo película.

Este tipo de condensación solo ocurre en condiciones muy especiales tanto para la superficie como para el tipo de sustancia a condensar. Los vapores de hidrocarburos, generalmente, condensan en tipo película; el vapor de agua condensa en película para la mayoría de las condiciones, y presenta condensación tipo gota solo cuando la superficie está finamente pulida y

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

está recubierta por una capa delgada de un promotor, el cual puede inyectarse con el vapor a intervalos regulares. Con la operación el promotor suele fallar, debido a que la superficie se oxida o se ensucia, o porque el promotor es gradualmente arrastrado con el flujo de condensado.

Otra forma de mantener la condensación tipo gota es utilizando recubrimientos para la superficie, tales como el teflón y metales nobles como oro, plata, rodio, paladio y platino: sin embargo, los altos costos hacen esta técnica inaplicable en la industria. En general, los métodos para mantener la condensación tipo gota son efectivos solo por cierto tiempo, al cabo del cual el mecanismo pasa a tipo película debido al ensuciamiento de la superficie.

Para la condensación tipo gota del vapor de agua puro, existen dos métodos industrialmente útiles: uno es cubrir la pared metálica con teflón y el otro es cubrirla con un metal noble; ambos métodos son muy costosos. Si el vapor no es completamente puro, las impurezas hacen que el mecanismo tipo gota se transforme al tipo película.

4.3.2.3.2. Tipo película. Si la condensación es continua sobre la superficie fría y el líquido condensado se remueve gracias a la acción de la gravedad, entonces, la superficie de condensación estará generalmente cubierta de una delgada capa de líquido y el ángulo de contacto es igual a cero; esta situación es la que se conoce como condensación tipo película. Se considera el tipo de condensación más usual para el diseño de condensadores de vapores puros.

En general, cuando el vapor de agua está condensado y contiene contaminantes como el aceite, no puede predecirse el tipo de condensación que está sucediendo.

En el diseño de condensadores para la industria, se supone que el mecanismo presente es tipo película, por dos razones: en primer lugar, porque es un diseño conservativo con los coeficientes individuales h menores que los obtenidos en condensación tipo gota, y en segundo lugar porque la

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

condensación tipo gota exige condiciones especiales tales como adicionar contaminantes a la superficie o materiales muy costosos de recubrimiento.

4.3.3. Capítulo 3: Condensadores

Los condensadores son equipos que convierten un vapor en líquido, por transferencia de calor hacia un medio de enfriamiento, el cual es otro fluido (líquido o gaseoso) cuya temperatura es menor a la temperatura del vapor a condensar. Los condensadores pueden clasificarse según el tipo de contacto entre los fluidos que se encuentran transfiriendo calor en condensadores de contacto directo y de contacto indirecto o de superficie.

4.3.3.1. De contacto directo. En este tipo de condensadores, la transferencia de calor del vapor hacia el medio de enfriamiento se lleva a cabo cuando los dos fluidos se mezclan. La condensación se produce al rociar líquido de enfriamiento sobre el vapor, de modo que, al entrar en contacto, el vapor se condensa y es arrastrado por la corriente del líquido de enfriamiento.

El principal inconveniente es la contaminación del condensado por el medio de enfriamiento, que generalmente, es intolerable cuando la pureza del vapor es alta. Esta desventaja se supera usando como medio de enfriamiento el mismo condensado, pero requiere un subenfriamiento lo cual aumenta los costos del equipo. Industrialmente no tienen aplicación considerable, comparado con el tipo indirecto.

El condensador de contacto directo supera al de contacto indirecto en situaciones en que las temperaturas sean altas, exista alto ensuciamiento, para vapores altamente corrosivos y la caída de presión sea un factor crítico.

4.3.3.2. De contacto indirecto o de superficie. En estos condensadores, la transferencia de calor se hace a través de una pared delgada que separa el vapor y el medio de

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

enfriamiento. Este tipo de equipo son los más implementados a nivel industrial pues no hay contaminación de los fluidos que intercambian calor y su limpieza mecánica es sencilla. Los condensadores indirectos están provistos de placas o tubos, que pueden ser lisas, extendidas, con aletas, con estrías o corrugadas o con tratamiento especial. Dentro de este tipo de intercambiadores, destacan dos grandes grupos: de placas y tubulares.

4.3.3.2.1. Condensadores de placas. Estos intercambiadores consisten en placas estándares, que sirven como superficies de transferencia de calor y un armazón para su apoyo.

Las placas estándares (de acero inoxidable, titanio, níquel, etc.) tienen estrías para recibir empaques de caucho. El diseño corrugado de las placas les da rigidez, fomenta la turbulencia de los fluidos y asegura la distribución completa del flujo. Los estrechos espacios entre las placas ocasionan flujo a altas velocidades, generando altos coeficientes de transferencia de calor y bajas caídas de presión. Este tipo de condensadores presenta las siguientes ventajas:

1. Las placas se pueden limpiar y reemplazar con facilidad. Esto es particularmente útil para el caso en que los fluidos causen alto ensuciamiento o corrosión en la superficie de transferencia de calor.
2. El área se ajusta con facilidad mediante adición o eliminación de placas.
3. Se pueden usar para servicios múltiples, pueden pasar diferentes fluidos por las distintas partes del equipo.
4. Los fluidos viscosos dan índices de transferencia relativamente altos, puesto que las placas aseguran un flujo turbulento.
5. Si se requiere una construcción total de acero inoxidable o para servicios múltiples, el tipo de placas es menos costoso que las unidades tubulares.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

6. Las limitaciones de diseño incluyen una presión máxima de 300 lb/pulg² y una temperatura máxima de 300°F.

4.3.3.2.2. De doble tubo. Son el tipo de equipos más usados en la industria pues se aprovecha al máximo el área disponible para la transferencia de calor. En ellos, un fluido corre por el interior de uno o más tubos y el otro fluido lo hace por el exterior de ellos o ánulo, formado por un tubo de mayor diámetro. De forma general, los condensadores tubulares pueden ser de 2 tipos: de doble tubo y de tubos y carcasa.

- Están formados por dos juegos de tubos concéntricos, dos Tes conectadas, un cabezal de retorno un tubo en U. El tubo interior consiste en una sección aleteada y los dos extremos de los tubos están conectadas por medio de un tubo U de 180° para el retorno.
- El elemento interno está insertado en dos tubos de mayor diámetro. El diámetro externo de las aletas debe ser ligeramente menor que el diámetro interno de la carcasa.
- La carcasa está soldada a una placa terminal, donde el terminal flotante de la horquilla está cerrado con una cubierta empernada que proporciona suficiente espacio para la expansión y contracción de los tubos.
- Las conexiones de entrada y salida están en los terminales. Los tubos de entrada y salida están sellados por un empalme cónico de metal hecho en el tubo.
- Los condensadores de doble tubo están montados en forma de S para formar equipos de mayor capacidad.
- El condensador de doble tubo es muy sencillo de construir a partir de piezas estándar, proporcionando superficies de transferencia de calor a bajo costo. Las longitudes estándar efectivas son de 12, 15 o 20 ft.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

- La principal desventaja de estos equipos es la pequeña superficie de transferencia de calor que proporciona cada paso, debido a sus diámetros relativamente pequeños. Por tanto, cuando se utilizan como condensadores, requieren gran número de horquillas que hacen el equipo muy grande y con mayores puntos de fuga.
- Estos diseños no permiten áreas de transferencia de calor mayores a 100-200 ft², para aplicaciones a altas temperaturas y presiones elevadas. Son de muy poca aplicabilidad industrial.

4.3.3.2.3. De carcasa y tubos. Estos intercambiadores constan de un número de tubos paralelos encerrados por una carcasa cilíndrica. El condensador de casco y tubos presenta la mejor alternativa cuando se requieren grandes superficies de transferencia de calor, para presiones mayores de 20 kgf/cm² y altas temperaturas. Todos los equipos de este tipo constan básicamente de las mismas partes y pueden estar dispuestos de distintas formas para adaptarlos a necesidades específicas, tales como:

- 1- Permiten flujo con o sin cambio de fase, tanto por los tubos como por la carcasa.
- 2- La posición puede ser horizontal o vertical, dependiendo de las necesidades de operación y la disponibilidad de espacio.
- 3- El rango de presión puede ir desde el vacío hasta valores muy altos.
- 4- La caída de presión puede variar dentro de un amplio rango.
- 5- El diseño se puede ajustar independientemente a cada fluido.
- 6- El tamaño varía desde muy pequeños a 5000 ft².
- 7- Existen variados materiales para la construcción que satisfacen las necesidades de resistencia a la corrosión, erosión, economía y demás condiciones de diseño.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

- 8- Permite el uso de superficies extendidas, como aletas, tanto para el interior como para el exterior de los tubos.
- 9- El desmonte para limpieza es relativamente sencillo.

El diseñador de condensadores de calor debe especificar cierto número de factores tales como: tipo de condensador, material de construcción, disposición de los fluidos, longitud y diámetro de los tubos, tipo de carcasa, tipo de pantallas deflectoras, espesor de carcasa y tubos, y demás características que influyen en la evaluación económica para el diseño del equipo. Estos factores están consignados en códigos y normas.

4.3.4. Capítulo 4: Diseño de condensadores

En el proceso de condensación, como en todo intercambio de calor, lo más usado comúnmente es el contacto indirecto entre dos fluidos; uno es el fluido caliente que cede su calor latente y es el vapor a condensar, el otro es el llamado fluido frío quien recibe el calor, y que para la mayoría de las aplicaciones industriales es agua. Los intercambiadores de carcasa y tubos son los más utilizados en la industria química porque presentan mayor área de transferencia que un equipo de doble tubo de igual tamaño. Durante esta sección se contempla la teoría y las respectivas correlaciones matemáticas necesarias para diseñar un equipo de condensación de tubos y carcasa.

El diseño de condensadores comprende la evaluación de las condiciones de proceso tanto físicas como térmicas y un análisis económico. Inicialmente, las condiciones térmicas permiten seleccionar varios equipos que cumplen satisfactoriamente los requerimientos de proceso, pero un estudio de costos es el que permite elegir el equipo más económico.

El condensador elegido debe satisfacer ciertas condiciones térmicas básicas: ser operable sobre un rango de condiciones alrededor del punto de diseño, ser el más económicos entre los

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

equipos satisfactorios y cumplir limitaciones espaciales o estructurales como el tamaño, el peso y las facilidades de mantenimiento.

4.3.4.1. Especificaciones. En la selección del condensador intervienen numerosos parámetros como:

1. El origen del vapor a condensar: los vapores de la cima de la torre de destilación salen saturados, los vapores que salen de un compresor son sobrecalentados.
2. El grado de condensación: total o parcial.
3. La composición del vapor del proceso, es decir, si se trata de una sustancia pura o una mezcla de miscibles, inmiscibles y no condensables.
4. La condición térmica del vapor a la entrada: sobrecalentado o saturado.
5. La condición térmica del líquido a la salida: saturado o subenfriado.
6. Pesos moleculares de vapores y líquidos.
7. Propiedades de los fluidos tales como: viscosidad, densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica.
8. Calor latente de condensación del vapor.
9. Temperaturas de entrada y salida de los fluidos.
10. Presiones de operación y caídas de presión permisibles.
11. Curva de calor liberado cuando se trata de mezclas.

4.3.4.2. Orientación del condensador. En el diseño de condensadores, la posición del equipo (horizontal, vertical o inclinado) es de gran importancia. Las ventajas y desventajas de la condensación dentro de los tubos en condensadores verticales y horizontales son las siguientes:

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

- El condensador vertical lado tubos descendente, produce caídas de presión muy altas y requiere tubos de gran diámetro para obtener una longitud de condensación razonable. Cuando se trata de fluidos muy corrosivos tiene un mejor desempeño porque el condensado baña la superficie interna del tubo.
- La condensación dentro de tubos horizontales puede hacerse con arreglos de un paso, de varios pasos o con tubos en U y con amplios rangos de tamaños y longitudes de tubos, mientras que los verticales deben tener un solo paso por los tubos.
- Es inapropiado para la condensación de mezclas de vapores con un amplio rango de ebullición.

Algunas ventajas y desventajas para condensación en el exterior de tubos verticales y horizontales son:

- El condensador horizontal da mejores coeficientes de transferencia de calor que el vertical y por ello requerirá de menor área de transferencia.
- El condensador subenfriador vertical es ventajoso por tener sus zonas bien definidas. Ofrece mejores coeficientes de subenfriamiento porque el intercambio de calor del condensado se hace por convección forzada; mientras que el condensador horizontal debe inundar mayor cantidad de área debido a que la transferencia se hace por convección libre, lo cual da bajos coeficientes de transferencia de calor.
- Los condensadores subenfriadores horizontales aun cuando no permiten hacer cálculos precisos, dan coeficientes totales de condensación y subenfriamiento algo mayores que pueden, en un servicio dado, hacerlos más económicos.
- Los condensadores verticales tienen un control más preciso.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

- Los condensadores horizontales pueden ser bafleados o ser de tipo T.E.M.A “X” (del flujo transversal puro). Pueden tener dos boquillas de salida, una para el condensado y otra para el venteo.
- El condensador horizontal no es útil para la condensación total de mezclas con amplio rango de ebullición, especialmente si la temperatura de rocío del componente más ligero es cercana a la temperatura de descarga del enfriador.
- Los condensadores horizontales lado casco dan bajas caídas de presión para el fluido en condensación. El fluido frío con mayor tendencia al ensuciamiento fluye por los tubos, lo cual es ventajoso por la facilidad de limpieza que ofrece el interior de los tubos.
- En general, el condensador horizontal ocupa más espacio que el condensador vertical; pero estructuralmente es más fácil de soportar cuando su construcción no es a nivel del suelo, como en el caso de condensadores de cima en los que la longitud máxima para un condensador vertical es 8 ft.

4.3.4.3. Balances de energía. Para el diseño de intercambiadores se considera que todo el calor cedido por el fluido caliente es tomado por el fluido frío excepto para los casos en que las pérdidas de calor hacia otros medios son conocidas o evaluables. A partir de los balances de energía, se puede estimar el calor total de trabajo y, además, algunas variables de diseño que comúnmente son desconocidas como temperaturas y flujos.

4.3.4.3.1. Vapor. De esta forma, el calor transferido por el vapor en la condensación está dado por:

$$q_c = \lambda_v \times W \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

q_c : Calor latente transferido [W]

λ_v : Calor latente de vaporización [J/kg]

W: Flujo másico del vapor [kg/s]

Cuando el vapor a condensar está sobrecalentado, el calor sensible que se debe remover para alcanzar su temperatura de saturación corresponde a:

$$q_c = W \times C_{P,v} \times (T_1 - T_{sat}) \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

q_d : Calor sensible de desobrecalentamiento [W]

W: Flujo másico de vapor a condensar [kg/s]

C_{Pv} : Capacidad calorífica del vapor [J/kg°C]

T_1 : Temperatura inicial del fluido caliente [°C]

T_{sat} : Temperatura de saturación [°C]

Cuando el condensado debe llevarse hasta subenfriamiento, el calor sensible a retirar está dado por:

$$q_s = W C_{P,l} (T_{sat} - T_2) \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

q_s : Calor sensible de desobrecalentamiento [W]

W: Flujo másico de condensado a subenfriar [kg/s]

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

C_{Pl} : Capacidad calorífica del líquido [J/kg°C]

T_2 : Temperatura final del fluido caliente [°C]

Los calores específicos de las sustancias se calculan a las temperaturas promedio así:

$$T_{Pdes} = \frac{T_1 + T_{sat}}{2} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$T_{Psub} = \frac{T_{sat} + T_2}{2} \quad (\text{Ec. 8})$$

El calor total transferido por el fluido caliente es

$$Q_T = q_d + q_c + q_s \quad (\text{Ec. 9})$$

4.3.4.3.2. Líquido. Para el fluido frío se considera que el calor recibido no es suficiente para generar el cambio de fase sino únicamente un incremento en su temperatura. Por esto, el calor ganado está dado por:

$$Q_T = mC_{Pc}(t_1 - t_2) \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

m : Flujo másico del fluido frío [kg/s]

C_{Pc} : Capacidad calorífica fluido frío [J/kg°C]

T_1 : Temperatura de entrada del fluido frío [°C]

T_2 : Temperatura de salida del fluido frío [°C]

Caber anotar que, normalmente en los problemas de diseño de equipos de condensación, el requerimiento másico de fluido de enfriamiento es una incógnita, por lo que es práctico obtener

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

este valor del respectivo balance. Lo anterior considerando que el calor cedido por el vapor y el ganado por el fluido de enfriamiento corresponde al mismo valor.

De forma general, el balance global de calor en el proceso está dado por:

$$mC_{pc}(t_1 - t_2) = W[C_{pliq}(T_{sat} - T_2) + L_V + C_{pvap}(T_1 - T_{sat})] \quad (\text{Ec. 11})$$

4.3.4.4. Ecuación de diseño para intercambiadores de calor. A partir de la ecuación de diseño para equipos de intercambios de calor, se tiene que:

$$Q_T = U \cdot A_T \cdot dT = U \cdot A_T \cdot LMTD \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

Q_T : Calor total transferido [W]

A_T : Área total de transferencia de calor [m²]

$dT=LMTD$: Diferencia de temperatura entre los fluidos [°C]

U : Coeficiente total de transferencia de calor [W/m²°C]

4.3.4.4.1. Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD). La diferencia de temperatura entre los dos fluidos es el motor de la transferencia de calor. Cuando dos fluidos intercambian calor, la diferencia de temperatura cambia de punto a punto a lo largo del equipo; esto es especialmente evidente en una condensación, donde uno de los fluidos permanece a temperatura constante mientras el otro se calienta. La diferencia media logarítmica es una forma adecuada de obtener un valor que promedie las diferencias de temperatura.

Para flujo en contracorriente la expresión utilizada es:

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

$$dT = LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} \quad (\text{Ec. 13})$$

Para flujo en paralelo:

$$dT = LMTD = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2} \right)} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

T_1 : Temperatura de entrada del fluido caliente [°C]

T_2 : Temperatura de salida del fluido caliente [°C]

t_1 : Temperatura de salida del fluido frío [°C]

t_2 : Temperatura de salida del fluido frío [°C]

En muchas de las aplicaciones industriales, el trayecto que siguen los fluidos no se ajusta ni al modelo en contracorriente ni al modelo en paralelo, debido a que se tienen varios pasos, tanto por los tubos como por la carcasa. Para estos casos se utiliza la ecuación para flujo en contracorriente, y se aplica un factor de corrección F_c , el cual está dado en función de las temperaturas terminales y los pasos por la carcasa.

- Factor de corrección

Para intercambiadores multipasos, la diferencia de temperatura se calcula como:

$$DT = F_c * LMTD \quad (\text{Ec. 15})$$

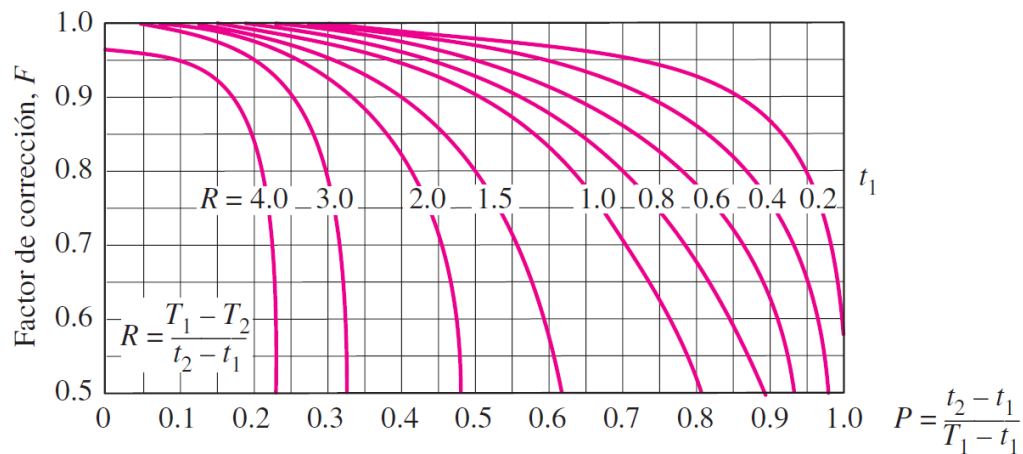
Donde el factor de corrección se lee a partir de las Figura 2, Figura 3, Figura 4 y Figura 5 en

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

función de la configuración del equipo (número de pasos por tubos y carcasa) y de los parámetros P y R expuestos dentro de cada figura.

Figura 2

Factor de corrección para un paso por la carcasa y 2, 4, 6, etc. (cualquier múltiplo de 2) pasos por los tubos

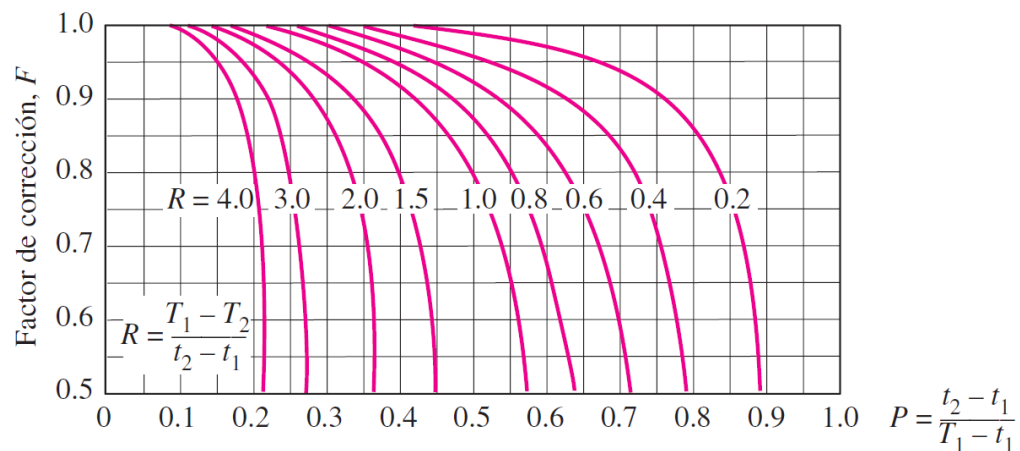


Nota. Tomado de Transferencia de calor y masa, por Çengel, 2016. McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V. 3ra. Ed.

Figura 3

Factor de corrección para dos pasos por la carcasa y 4, 8, 12, etc. (cualquier múltiplo de 4) pasos por los tubos

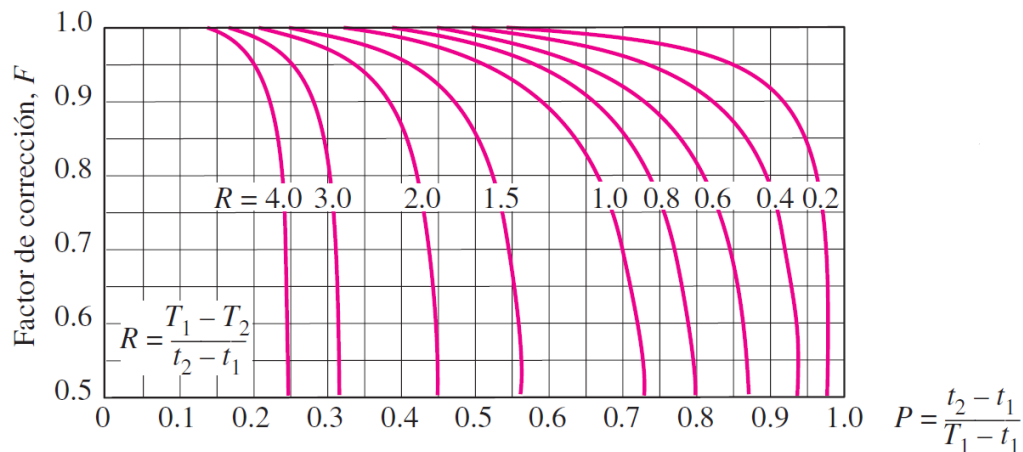
CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES



Nota. Tomado de *Transferencia de calor y masa*, por Çengel, 2016. McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V. 3ra. Ed.

Figura 4

Factor de corrección para flujo cruzado de un solo paso con uno de los fluidos de flujo mezclado y el otro no mezclado

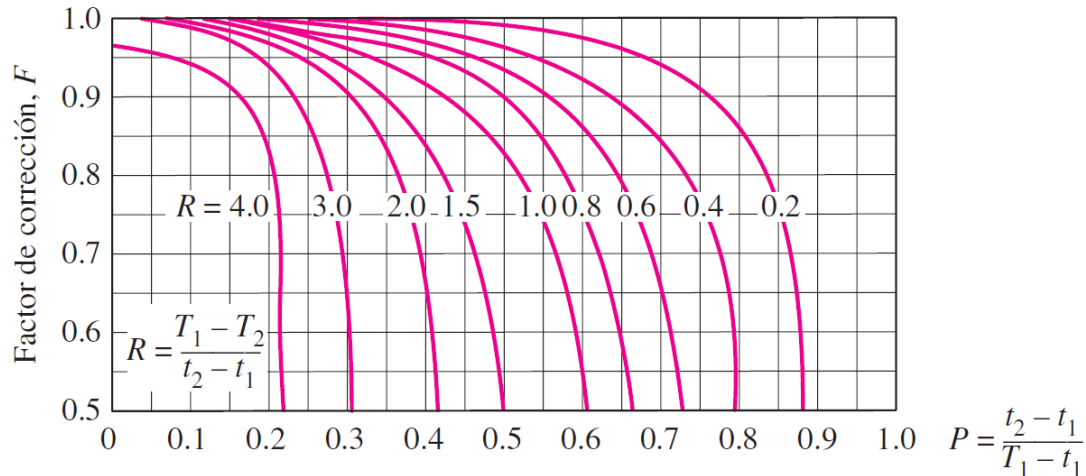


Nota. Tomado de *Transferencia de calor y masa*, por Çengel, 2016. McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V. 3ra. Ed.

Figura 5

Factor de corrección para flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES



Nota. Tomado de *Transferencia de calor y masa*, por Çengel, 2016. McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V. 3ra. Ed.

4.3.4.4.2. Coeficiente global de transferencia de calor (U). El coeficiente, U , se define como la suma de los coeficientes individuales de transferencia de calor que son:

- 1- Coeficiente de transferencia de calor para el fluido del interior de los tubos
- 2- El coeficiente de la capa de ensuciamiento del interior de los tubos
- 3- Coeficiente de la pared del tubo
- 4- Coeficiente de la capa de suciedad del exterior del tubo
- 5- Coeficiente del fluido que circula por la carcasa

El coeficiente global U , para una unidad en operación, se puede evaluar directamente con los datos obtenidos del equipo como son el área, diferencia de temperatura y el calor transferido.

Para el diseño de condensadores, el coeficiente global debe calcularse a partir de los coeficientes individuales mencionados; los cuales se calculan de las propiedades de los materiales.

Los rangos empíricos de los valores de U en intercambiadores de tubos y carcasa para algunos fluidos, se muestran en la Tabla 4. Sin embargo, los coeficientes para procesos de

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

intercambio de calor con cambio de fase son generalmente mayores. Estos valores son útiles para suponer el coeficiente global de transferencia de calor cuando no se tiene la información disponible para calcularlo de forma directa.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Tabla 4*Valores de U para intercambiadores de tubos y carcasa*

Shell and tube exchangers		
Hot fluid	Cold fluid	U (W/m ² °C)
<i>Heat exchangers</i>		
Water	Water	800–1500
Organic solvents	Organic solvents	100–300
Light oils	Light oils	100–400
Heavy oils	Heavy oils	50–300
Gases	Gases	10–50
<i>Coolers</i>		
Organic solvents	Water	250–750
Light oils	Water	350–900
Heavy oils	Water	60–300
Gases	Water	20–300
Organic solvents	Brine	150–500
Water	Brine	600–1200
Gases	Brine	15–250
<i>Heaters</i>		
Steam	Water	1500–4000
Steam	Organic solvents	500–1000
Steam	Light oils	300–900
Steam	Heavy oils	60–450
Steam	Gases	30–300
Dowtherm	Heavy oils	50–300
Dowtherm	Gases	20–200
Flue gases	Steam	30–100
Flue	Hydrocarbon vapours	30–100
<i>Condensers</i>		
Aqueous vapours	Water	1000–1500
Organic vapours	Water	700–1000
Organics (some non-condensables)	Water	500–700
Vacuum condensers	Water	200–500
<i>Vaporisers</i>		
Steam	Aqueous solutions	1000–1500
Steam	Light organics	900–1200
Steam	Heavy organics	600–900

Nota. Tomada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

La correlación para calcular el coeficiente global a partir de los coeficientes individuales está dada como:

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{od}} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2k_w} + \frac{d_o}{d_i} \times \frac{1}{h_{id}} + \frac{d_o}{d_i} \times \frac{1}{h_i} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde

U_o : coeficiente global de transferencia de calor basado en el área externa del tubo [$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$]

h_o : coeficiente de transferencia por convección externo [$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$]

h_i : coeficiente de transferencia por convección interno [$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$]

h_{od} : coeficiente de ensuciamiento externo [$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$]

h_{id} : coeficiente de ensuciamiento interno [$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$]

k_w : conductividad térmica de la pared del tubo [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]

d_i : diámetro interno del tubo [m]

d_o : diámetro externo del tubo [m]

La magnitud de los coeficientes individuales dependerá de la naturaleza de la transferencia de calor. proceso (conducción, convección, condensación, ebullición o radiación), propiedades físicas de los fluidos, los caudales de fluidos y la disposición física de la superficie de transferencia de calor.

- Coeficientes de ensuciamiento

El rendimiento de los intercambiadores de calor suele deteriorarse con el paso del tiempo como resultado de la acumulación de depósitos sobre las superficies de transferencia de calor. La capa de depósitos representa una resistencia adicional para esta transferencia y hace que disminuya la razón de esta en un intercambiador. El efecto neto de estas acumulaciones sobre la transferencia de calor se representa por un factor de ensuciamiento o incrustación. La Tabla 5 muestra algunos coeficientes (factores) de ensuciamiento para un grupo de fluidos característicos. Es necesario definir este valor para el interior y exterior del tubo en función de los fluidos que atraviesen cada superficie, es decir, tubos y carcasa.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Tabla 5*Coeficientes y factores de ensuciamiento para algunos fluidos*

Fluid	Coefficient (W/m ² °C)	Factor (resistance) (m ² °C/W)
River water	3000–12,000	0.0003–0.0001
Sea water	1000–3000	0.001–0.0003
Cooling water (towers)	3000–6000	0.0003–0.00017
Towns water (soft)	3000–5000	0.0003–0.0002
Towns water (hard)	1000–2000	0.001–0.0005
Steam condensate	1500–5000	0.00067–0.0002
Steam (oil free)	4000–10,000	0.0025–0.0001
Steam (oil traces)	2000–5000	0.0005–0.0002
Refrigerated brine	3000–5000	0.0003–0.0002
Air and industrial gases	5000–10,000	0.0002–0.0001
Flue gases	2000–5000	0.0005–0.0002
Organic vapours	5000	0.0002
Organic liquids	5000	0.0002
Light hydrocarbons	5000	0.0002
Heavy hydrocarbons	2000	0.0005
Boiling organics	2500	0.0004
Condensing organics	5000	0.0002
Heat transfer fluids	5000	0.0002
Aqueous salt solutions	3000–5000	0.0003–0.0002

Nota. Tomada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

- Conductividad térmica de la pared del tubo

Para considerar los efectos de conducción a través de la pared del tubo, es necesario incluir en los cálculos, la resistencia ésta opone a la transferencia de calor. La Tabla 6 presenta la conductividad térmica para diferentes tipos de material a diferentes temperaturas. Cabe resaltar que en esta tabla se incluyen los materiales más comunes para la fabricación de equipos de intercambio de calor.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Tabla 6*Valores para conductividad térmica de algunos materiales*

Metal	Temperature (°C)	k_w (W/m°C)
Aluminium	0	202
	100	206
Brass (70 Cu, 30 Zn)	0	97
	100	104
	400	116
Copper	0	388
	100	378
Nickel	0	62
	212	59
Cupro-nickel (10 per cent Ni)	0–100	45
Monel	0–100	30
Stainless steel (18/8)	0–100	16
	0	45
Steel	100	45
	600	36
	0–100	16
Titanium	0–100	16

Nota. Tomada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

- Coeficientes de transferencia de calor por convección

Estos coeficientes están relacionados con el efecto de convección que se produce por dentro y fuera de los tubos como resultado del paso de los fluidos atravesando la superficie. Para calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección interno y externo, es necesario tener previamente establecida la disposición de los fluidos para saber a qué fluido corresponden las propiedades señaladas en cada una de las expresiones. De esta forma, el coeficiente interno hace referencia al fluido que atraviesa los tubos por dentro y al diámetro interno de estos. Análogamente, el coeficiente externo hace referencia al fluido que atraviesa la carcasa (tubos por fuera).

- Condensación horizontal por carcasa

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

$$h_c = 0.95k_L \left[\frac{\rho_L(\rho_L - \rho_V)g}{\mu_L \Gamma_h} \right]^{1/3} N_r^{-1/6} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\Gamma_h = \frac{W_c}{LN_t} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$N_r = \frac{2}{3} \left(\frac{D_b}{p_t} \right) \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde

K_L : Conductividad térmica del condensado [$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$]

ρ_L : Densidad del condensado [kg/m^3]

ρ_V : Densidad del vapor [kg/m^3]

μ_L : Viscosidad del condensado [Ns/m^2]

g : Aceleración gravitacional ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$)

Γ_h : Carga del tubo [kg/ms]

L : Longitud de tubos [m]

W_c : Flujo másico total de condensado [kg/s]

N_t : Número total de tubos en el haz

N_r : Número promedio de tubos en una fila vertical

Las propiedades físicas del condensado usadas en la ecuación, son evaluadas a la temperatura promedio en la película de condensado.

- Condensación vertical por tubos o carcasa

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

La siguiente correlación matemática aplica para números de Reynolds entre 30 y 2000:

$$h_c = 0.926K_L \left[\frac{\rho_L(\rho_L - \rho_V)g}{\mu_L \Gamma_V} \right]^{1/3} \quad (\text{Ec. 19})$$

Si la condensación ocurre por carcasa, el diámetro a utilizar para calcular la carga del tubo estará dada por:

$$\Gamma_V = \frac{W_c}{N_t \pi d_o} \quad (\text{Ec. 20})$$

Mientras que, si la condensación ocurre por los tubos, el diámetro que se usa para calcular la carga será:

$$\Gamma_V = \frac{W_c}{N_t \pi d_i} \quad (\text{Ec. 21})$$

Cuando el Re es mayor de 2000, se puede calcular el coeficiente de transferencia por convección a través de método gráfico o por correlación matemática. La Figura 6 permite estimar h_c a partir del Re y el número de Prandlt (Pr). Teniendo en cuenta que:

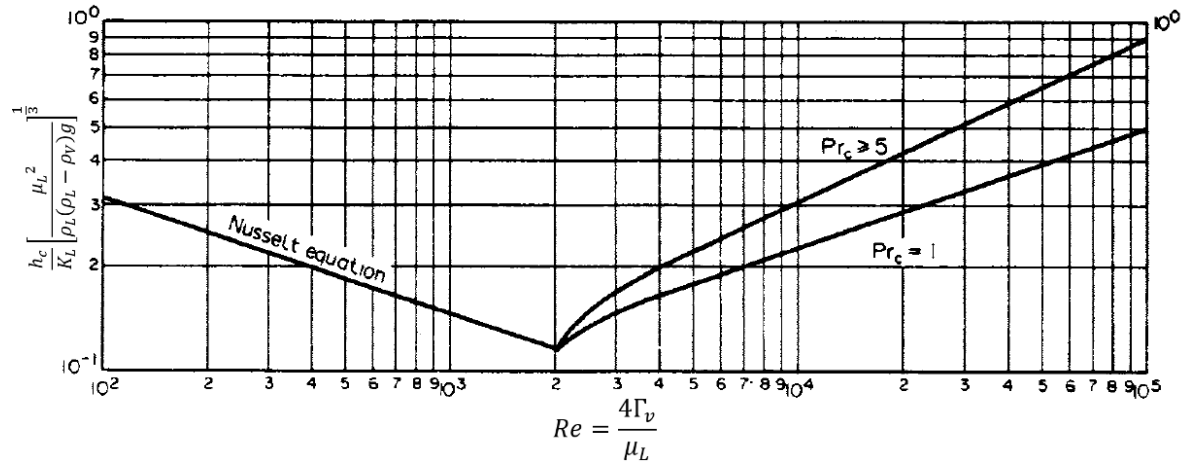
$$Re_c = \frac{4\Gamma_v}{\mu_L} \quad (\text{Ec. 22})$$

$$Pr_c = \frac{C_p \mu_L}{K_L} \quad (\text{Ec. 23})$$

Figura 6

Coeficiente de condensación para tubos verticales

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES



Nota. Tomada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Por otro lado, la correlación matemática para calcular h_c está dado por el modelo de Boyko-Kruzhilin así:

$$(h_c)_{BK} = h'_i \left[\frac{J_1^{1/2} + J_2^{1/2}}{2} \right] \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde

$$J = 1 + \left[\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right] X \quad (\text{Ec. 25})$$

Los sufijos 1 y 2 se refieren a las condiciones de entrada y salida, respectivamente. Además, X es la fracción másica de vapor presente en ese momento.

El coeficiente del lado de los tubos evaluado para una sola fase del total del condensado y responde a la siguiente expresión.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

$$h'_i = 0.021 \left(\frac{k_L}{d_i} \right) Re^{0.8} Pr^{0.43} \quad (\text{Ec. 26})$$

En un condensador, la corriente de entrada normalmente estará en estado de vapor saturado y éste se condensa completamente. Bajo estas condiciones, la Ec. 23 se convierte en:

$$(h_c)_{BK} = h'_i \left[\frac{1 + \sqrt{\rho_L / \rho_V}}{2} \right] \quad (\text{Ec. 27})$$

El procedimiento recomendado para hallar este coeficiente en procesos de condensación es calcularlo por los dos métodos previamente expuestos (gráfico y Boyko-Kruzhilin) y seleccionar el valor más alto entre los dos para realizar la estimación del diseño.

En muchas de las aplicaciones industriales, el agua es usada como fluido de enfriamiento a través de los tubos, por esto se desarrolló una correlación específicamente para esta situación. La Ec. 28 presenta la expresión matemática para estimar el coeficiente de transferencia de calor interno cuando el fluido es agua. Cabe anotar que los parámetros utilizados en la ecuación consideran convenientemente las propiedades físicas del agua.

$$h_i = \frac{4200(1.35 + 0.02t)u_t^{0.8}}{d_i^{0.8}} \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde

h_i : Coeficiente interno para el agua [W/m²°C]

t : Temperatura del agua [°C]

u_t : Velocidad del agua [m/s]

d_i : Diámetro interno del tubo [mm]

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

4.3.4.4.3. Área total de transferencia de calor. Los equipos utilizados en condensación deben poseer un área de contacto muy grande, pues la cantidad de calor transferido por unidad de masa es grande, comparada con la carga de calor sensible que se maneja en procesos de calentamiento-enfriamiento.

El área de transferencia de calor puede ser fácilmente despejada de la ecuación de diseño para intercambiadores de calor, una vez ha sido estimada la LMTD y supuesto un valor para U. De esta forma, se tiene que:

$$A_T = \frac{Q}{U * LMTD} \quad (\text{Ec. 29})$$

Con el valor de área total de transferencia de calor estimado, se realiza el diseño integral del equipo.

4.3.4.5. Disposición de fluidos. Una vez se conoce el calor que cede el vapor a condensar y el área total de transferencia de calor, se deben definir algunos criterios para el correcto y óptimo funcionamiento del equipo como la disposición de los fluidos por tubos y carcasa.

Para designar la locación de los fluidos dentro del equipo, se consideran las siguientes heurísticas:

- Si uno de los fluidos ensucia o produce incrustación en la superficie, más rápidamente que el otro, debe circular por el interior de los tubos, ya que su superficie interior puede limpiarse sin desmontar el haz de tubos.
- Si los dos fluidos producen incrustación con la misma intensidad y solo uno circula a presión, este debe fluir por el interior de los tubos para evitar el precio elevado de una carcasa de alta presión.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

- Cuando solo uno de los fluidos es corrosivo, debe circular por el interior de los tubos para evitar el uso de un metal especial y costos, tanto para la carcasa como por los tubos.
- Si uno de los fluidos es mucho más viscoso que el otro, debe circular por la carcasa para aumentar el coeficiente global de transferencia de calor.
- Cuando se dispone de cierta caída de presión, se obtienen coeficientes más elevados para el lado del casco que en el lado de los tubos. Generalmente, el fluido que está a más alta presión debe fluir por los tubos.
- Para presiones de más de 300 lb/pulg² para uno de los fluidos, la construcción menos costosa es la que presenta el fluido de presión elevada por el lado de los tubos.

4.3.4.6. Especificaciones para tubos. Para el dimensionamiento de los tubos es importante definir algunas variables principales que se fijan en función de valores estándar que funcionan bien en la práctica.

4.3.4.6.1. Diámetro externo de los tubos. El diámetro externo de los tubos se selecciona a partir de valores estándar. La Tabla 7 presenta diferentes valores para el diámetro exterior del tubo y sus respectivos grosores posibles.

De forma general se recomienda que, cuando este valor es desconocido y se debe suponer, se inicie el proceso de prueba y error con un valor de 19 mm para el diámetro exterior.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Tabla 7*Diámetros externos y grosores estándar para tubos*

Outside diameter (mm)	Wall thickness (mm)					
16	1.2	1.6	2.0	—	—	—
20	—	1.6	2.0	2.6	—	—
25	—	1.6	2.0	2.6	3.2	—
30	—	1.6	2.0	2.6	3.2	—
38	—	—	2.0	2.6	3.2	—
50	—	—	2.0	2.6	3.2	—

Nota. Tomada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

4.3.4.6.2. Longitud de los tubos. Para determinada área de superficie, el uso de tubos más largos reduce el diámetro de la carcasa; lo que generalmente representa menor costo del equipo, particularmente para altas presiones en la carcasa.

4.3.4.6.3. Arreglo de tubos. Los tubos se pueden distribuir en el cabezal en función de las necesidades del funcionamiento para dar diferentes configuraciones que mejoren la transferencia de calor. En la construcción del haz de tubos, es muy importante la distancia mínima entre centro y centro de 2 tubos adyacentes, también conocida como paso. Este valor se ha estandarizado como 1.25 veces el diámetro del externo del tubo. Las posibles configuraciones son:

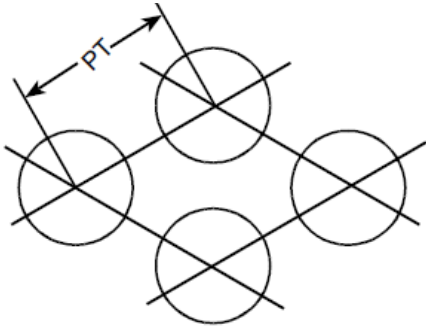
- Arreglo triangular:

El flujo va de frente al vértice. Este da la mayor cantidad de tubos para un tamaño determinado. Se utiliza para fluidos que no ocasionan ensuciamiento o cuando es removible por tratamiento químico. Da caídas de presión de media a alta y mejores coeficientes que el arreglo cuadrado en línea. La Figura 7 muestra la configuración del arreglo de tubos triangular.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Figura 7

Arreglo de tubos triangular

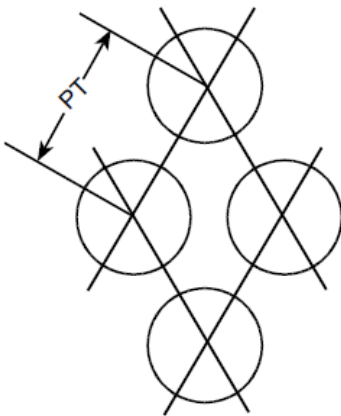


- Arreglo rotado:

La línea que pasa por el vértice es perpendicular a flujo. Es menos popular que el anterior. Da coeficientes más bajos, pero más altos que el cuadrado. Da caídas de presión de media a alta. Generalmente, es conveniente para condiciones y ensuciamiento iguales que el arreglo triangular. La Figura 8 presenta el esquema de este tipo de arreglo.

Figura 8

Arreglo de tubos triangular rotado



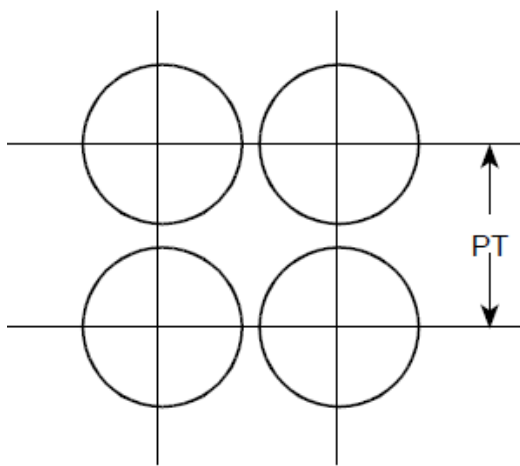
- Arreglo cuadrado en línea:

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Este arreglo es muy utilizado para bajas caídas de presión. Adicionalmente, garantiza la facilidad de limpieza al exterior de los tubos por método mecánicos. Los coeficientes de transferencia de calor son más bajos que los obtenidos en arreglo triangular. El arreglo cuadrado en línea es muy convencional y se representa como lo muestra la Figura 9.

Figura 9

Arreglo de tubos cuadrado



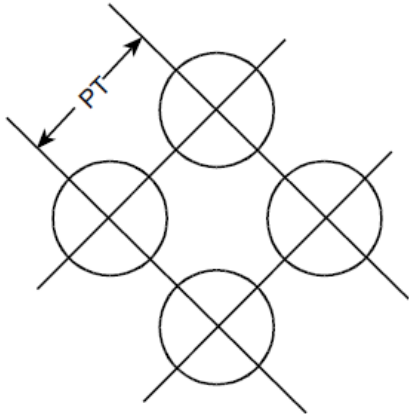
- Arreglo cuadrado rotado o diamante:

Es similar al anterior pero girado 45° como se evidencia en la Figura 10. Esta configuración contiene el mínimo número de tubos para un tamaño determinado. Se utiliza para bajas caídas de presión, aunque son mayores que en línea. Brinda facilidad para limpieza mecánica y da mayores coeficientes de transferencia de calor que para arreglo cuadrado en línea.

Figura 10

Arreglo de tubos cuadrado rotado

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES



4.3.4.6.4. Área superficial de transferencia por tubo. Esta área está relacionada con la superficie por la que ocurre el proceso de condensación. De esta forma, el área superficial se calcula en función del diámetro interno o externo del tubo, si la condensación ocurre por tubos o carcasa, respectivamente. El cálculo de este valor se hace con la expresión matemática correspondiente al área de un cilindro en función del diámetro, así:

$$A_{sup} = \pi \cdot d_{i/o} \cdot L \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde

$d_{i/o}$: Diámetro interno/externo (según corresponda) [m]

L: Longitud de un tubo [m]

4.3.4.6.5. Número de tubos requeridos. Para calcular el número de unidades que conforman el haz de tubos, se relaciona el área superficial de transferencia por tubo y el área total de transferencia de calor estimada a partir de la ecuación de diseño de la siguiente forma:

$$N_t = \frac{A_T}{A_{sup}} \quad (\text{Ec. 31})$$

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Donde

N_t : Número de tubos que conforman el haz

A_T : Área total de transferencia de calor [m²]

A_{sup} : Área superficial de transferencia por tubo [m²]

4.3.4.6.6. Diámetro del haz de tubos. El diámetro del haz de tubos depende del número de tubos y del número de pasos por tubo, ya que se deben dejar espacios en el patrón de los tubos en la placa para acomodar los divisores de paso. La correlación que permite hallar este diámetro corresponde a:

$$D_b = d_o \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad (\text{Ec. 32})$$

donde

N_t : Número de tubos en el haz

D_b : Diámetro del haz de tubos [mm]

d_o : diámetro exterior [mm]

K_1, n_1 son constantes según el arreglo

Cabe anotar que K_1 y n_1 se definen en función del tipo de arreglo seleccionado para los tubos y el número de pasos. La Tabla 8 presenta los diferentes valores para estas constantes.

Teniendo en cuenta que el valor para el paso (o pitch) se ha estandarizado y se define como:

$$p_t = 1.25d_o \quad (\text{Ec. 33})$$

Tabla 8

Valores de K_1 y n_1 para hallar el diámetro del haz de tubos

Triangular pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
n_1	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675
Square pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n_1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

Nota. Tomada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

4.3.4.7. Especificaciones para carcasa.

4.3.4.7.1. Nomenclatura TEMA. Los códigos recomendados para la designación de condensadores de calor convencionales de tubos y carcasa, las estableció la Tubular Exchangers Manufactures Association (TEMA), que se complementaron con las normas de seguridad mínimas establecidas por la American Society of Mechanical Engineers, ASME.

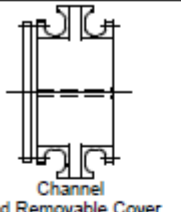
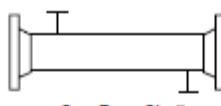
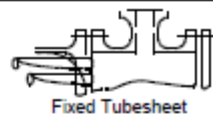
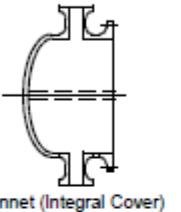
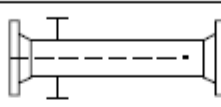
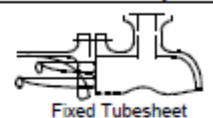
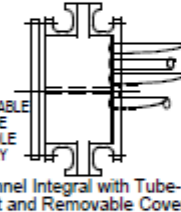
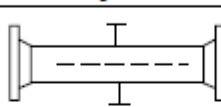

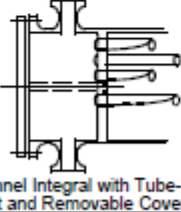
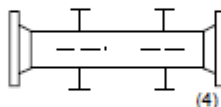

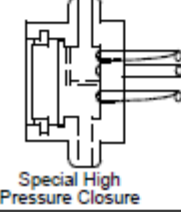
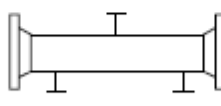

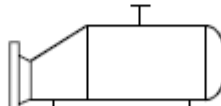




Para el tipo de intercambiador, la designación se hace mediante letras que describen el cabezal estacionario, el casco (que se omite para los haces exclusivamente) y el cabezal posterior, en ese orden como se indica en la Figura 11.

Los equipos fabricados con las normas de la clase B y C se diseñan para obtener la máxima economía y el menor tamaño en armonía con las exigencias de seguridad y servicio. El diseño de clase C es para requisitos moderados de las aplicaciones comerciales y la clase B es para servicios de procesos químicos.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Figura 11

Nomenclatura para carcasa según TEMA

Front End Stationary Head Types (1)		Shell Types	Rear End Head Types (2)		
A	 Channel and Removable Cover	E	 One Pass Shell	L	 Fixed Tubesheet Like "A" Stationary Head
B	 Bonnet (Integral Cover)	F	 Two Pass Shell With Longitudinal Baffle	M	 Fixed Tubesheet Like "B" Stationary Head
C	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	G	 Split Flow (3)	N	 Fixed Tubesheet Like "N" Stationary Head
N	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	H	 Double Split Flow (4)	P	 Outside Packed Floating Head
D	 Special High Pressure Closure	J	 Divided Flow	S	 Floating Head with Backing Device
		K	 Kettle Type Reboiler	T	 Pull Through Floating Head
		X	 Cross Flow	U	 U-Tube Bundle
				W	 Externally Sealed Floating Tubesheet

Nota. Tomado de Design considerations for shell and tubes exchangers por ExxonMobil (2001)

4.3.4.7.2. Bafles deflectores. En general, el espaciamiento mínimo de los bafles deflectores es de 1/5 del diámetro de la carcasa y mayor a 2 pulg. El espaciamiento máximo de los bafles está limitado por la condición de suministrar u soporte adecuado a los tubos. Los tramos

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

máximos de tubos sin soporte, en pulg, son de $74d^{0.75}$, en donde d es el diámetro exterior del tubo en pulgadas.

Con el fin de aumentar la transferencia de calor, se utilizan baffles deflectores para dirigir el flujo en la carcasa. Cuando no se requieren desviadores del lado de la carcasa (longitudinales), como puede ocurrir en condensadores, se instalan soportes de tubos.

Los principales tipos de desviadores son los siguientes:

1. Desviadores de segmentos o flujo transversal: se utilizan para aumentar la velocidad del fluido por la carcasa. Los cortes de desviadores se expresan como la razón de la altura de la abertura del segmento al diámetro interno del casco. Los desviadores con corte horizontal no son satisfactorios para los condensadores horizontales, puesto que el condensado puede quedarse atrapado entre los desviadores o para fluidos sucios donde se asienta la suciedad. Se usan desviadores de corte vertical para flujo de lado a lado con fluidos sucios en condensación.
2. Desviadores con orificios: existen desviadores con orificios que cubren toda la sección transversal del casco, con orificios de tubo de tamaño grande y con flujo paralelo a los tubos. En los desviadores las aberturas producen un aumento del coeficiente de transferencia de calor y caída de presión, cuando pasa el fluido por el orificio. Este diseño se limita a fluidos limpios y no son de uso común.
3. Desviadores de disco y en forma de dona: no son frecuentes. Se fabrican a partir de un soporte completo del que se corta un orificio circular concéntrico. El desviador de disco es circular y tiene un diámetro igual o ligeramente mayor que la abertura del desviador de dona. El fluido de la carcasa pasa por el desviador de dona y luego se desplaza radialmente a través del haz de tubos y en torno al desviador de disco.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

4. Desviadores de choque y toberas: las pantallas de choque se utilizan para evitar la erosión de los tubos en la zona de entrada del fluido de carcasa, que pasa desde el exterior hacia los tubos o a través de la tobera. Los desviadores de choque son planos o curvos, sólidos o perforados y suelen colocarse con frecuencia en una abertura cónica de tobera o en una cubierta de cúpula, por encima del casco, para mantener un número máximo de tubos en el haz.
5. Desviadores longitudinales: son desviadores que están soldados al casco en condensadores de lámina portatubos fija con múltiples pasos por el casco, para evitar las derivaciones en el haz de tubos. Las derivaciones se presentan cuando el espacio de franqueo entre los desviadores y la carcaca proporciona una trayectoria de fuga para el fluido de la carcaca. El efecto de derivación puede incrementar considerablemente las necesidades de superficie, cuando se calientan o enfrían fluidos viscosos. Cuando la derivación del haz de tubos es mínima, los coeficientes de transferencia de calor del lado de la carcaca se elevan al máximo. El área de derivación se reduce al disminuir el espacio de franqueo entre la parte interior de la carcaca y los tubos más externos.

4.3.4.7.3. Diámetro de la carcaca. El diámetro de la carcaca comprende el espacio requerido para instalar el haz de tubos y el espaciamiento entre baffles. Para estimar este valor es necesario conocer el diámetro del haz de tubos y el tipo de cabezal estándar seleccionado. La Figura 12 permite calcular el valor para el espaciamiento en función de los parámetros anteriormente mencionados. Finalmente, el diámetro de la carcaca está dado por:

$$D_s = d_b + \text{espaciamiento} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde

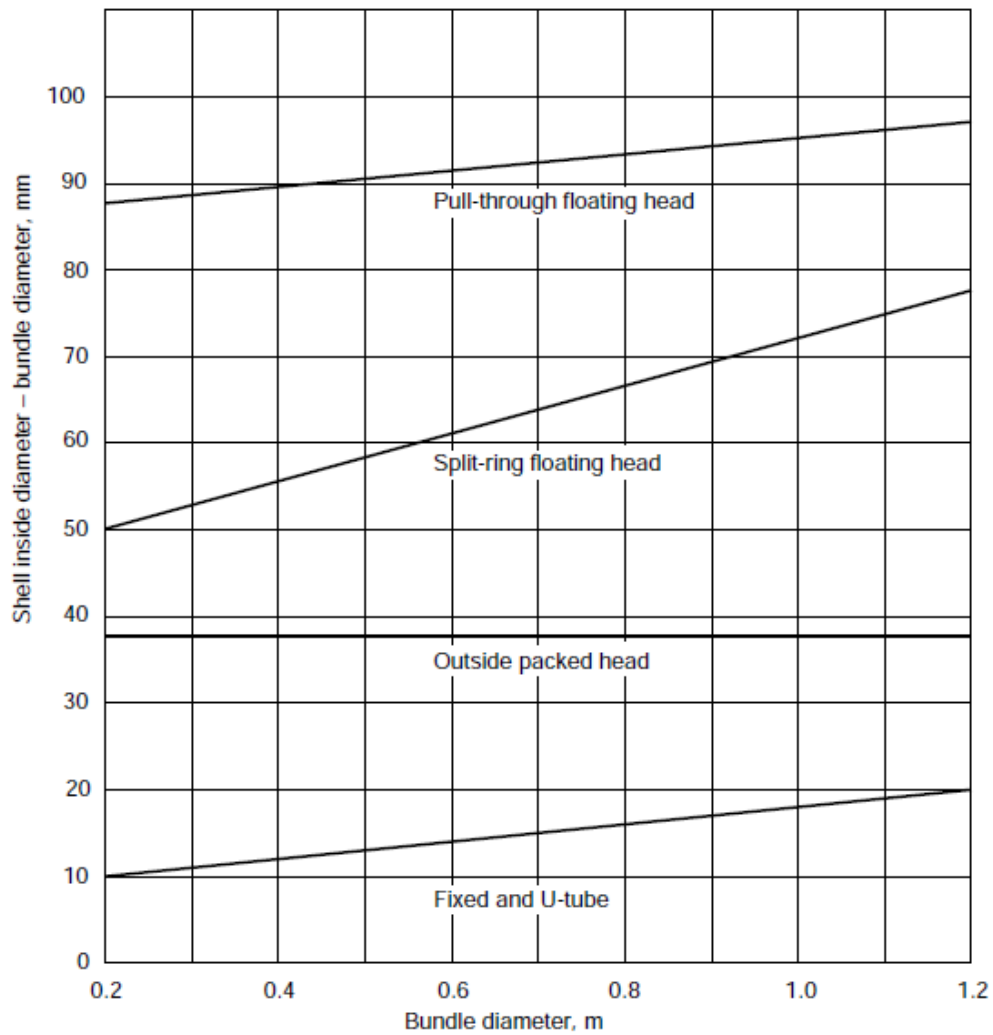
CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

D_s : Diámetro de la carcasa [mm]

d_b : Diámetro del haz de tubos [mm]

Figura 12

Espaciamiento en función del diámetro del haz de tubos y tipo de cabezal



Nota. Tomada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

4.3.4.8. Caída de presión permisible. El equipo de condensación diseñado debe cumplir con la presión de operación y las caídas de presión permisibles para tubos y carcasa, con el fin de garantizar su correcto funcionamiento y que el proceso de condensación sea efectuado.

De forma general se tiene que las altas caídas de presión favorecen la turbulencia y produce coeficientes de transferencia de calor más altos; por lo tanto, no es conveniente una caída de presión mucho menor que la permisible.

Sin embargo, cuando el equipo diseñado no cumple con estos requerimientos, se pueden realizar varios cambios para ajustar los valores. Por ejemplo, cuando la caída de presión es muy baja para el equipo seleccionado, se aumenta con alguna de las siguientes alternativas:

- Escoger un equipo con mayor número de pasos por los tubos, lo que ocasiona disminución del área de flujo, aumento de la velocidad y de la longitud que debe recorrer el fluido. Con estos cambios, aumentan las pérdidas por fricción y por retornos.
- Aumentar la longitud del equipo para lograr mayores pérdidas por tuberías rectas, disminución del número de tubos necesarios para la transferencia de calor. Así, el área de flujo disminuye y aumenta la velocidad del fluido, aumentando la caída de presión por retornos y por fricción.
- Escoger tubos de menor diámetro interno para lograr la disminución del área de flujo.

Por otro lado, cuando la caída de presión para el equipo escogido es alta, los cambios pueden ser:

- Escoger una unidad con menor número de pasos por los tubos para aumentar el número de tubos por paso y el área transversal de flujo; de esta forma disminuye la velocidad y la distancia de recorrido; así como las pérdidas por fricción y por retornos.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

- Disminuir la longitud del equipo para que aumente el número de tubos y así aumenta el área de flujo y disminuir la velocidad y la longitud del recorrido y con ello disminuyen las pérdidas por fricción.
- Cuando el fluido frío circula por los tubos y se dispone de él a diferentes condiciones, se da la posibilidad de utilizarlo a menor temperatura de entrada, con lo cual se requiere menor flujo másico, dado que su potencial de absorción de calor es mayor. A menor flujo másico disminuye la velocidad y la caída de presión.

4.3.4.8.1. Para tubos. La caída de presión por tubos está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_t = N_p \left[8j_f \left(\frac{L}{d_i} \right) \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-m} + 2.5 \right] \frac{\rho u_t^2}{2} \quad (\text{Ec. 35})$$

Con $m=0.25$ para régimen laminar, $Re < 2100$;
 $m=0.14$ para régimen turbulento, $Re > 2100$

Donde

ΔP_t : Caída de presión por tubos [N/m^2]

N_p : Número de pasos por los tubos

j_f : Factor de fricción para tubos [adimensional]

L : Longitud de un tubo [m]

d_i : Diámetro interior del tubo [m]

μ : Viscosidad del fluido que atraviesa los tubos [Ns/m^2]

μ_w : Viscosidad del fluido a la temperatura de la pared del tubo [Ns/m^2]

ρ : Densidad del fluido que atraviesa los tubos [kg/m^3]

u_t : Velocidad del lado de los tubos [m/s]

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

No obstante, el término al factor de corrección para la viscosidad es normalmente despreciado para simplificar la expresión y cuando el fluido no es altamente viscoso.

Adicionalmente, se tiene que:

$$U_t = \frac{G_t}{\rho} \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde

U_t : Velocidad por tubos [m/s]

G_t : Flux másico que atraviesa los tubos [kg/m²s]

ρ : Densidad del fluido que atraviesa los tubos [kg/m³]

El flux másico que atraviesa los tubos y el área de los tubos están dados por:

$$G_t = \frac{W_t}{A_t} \quad (\text{Ec. 37})$$

$$A_t = \pi \cdot d_i \cdot L \quad (\text{Ec. 38})$$

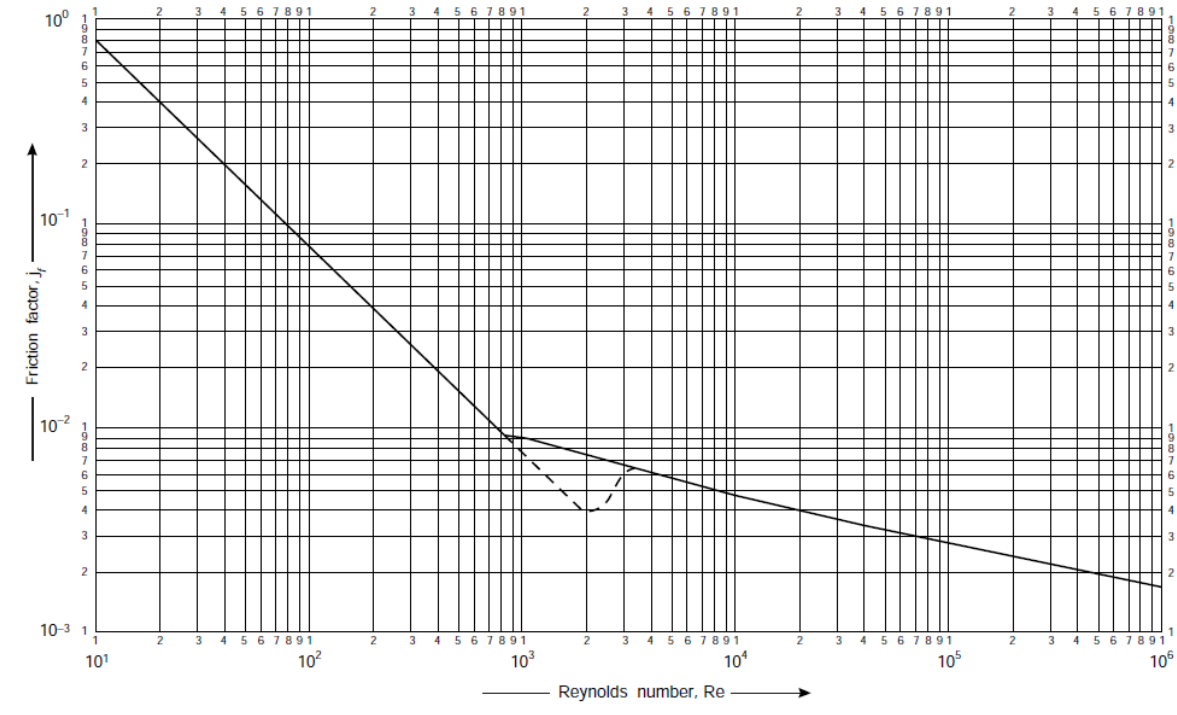
Donde

W_t : Flujo másico que atraviesa los tubos [kg/s]

A_t : Área total de los tubos [m²]

Para determinar el valor del factor de fricción j_f , este se debe leer de la Figura 13 calculando el valor para el número de Reynolds y cortando con la curva estándar para leer el eje Y.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Figura 13*Factor de fricción para tubos*

Nota. Tomada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

4.3.4.8.2. Para carcasa. La caída de presión para el lado de la carcasa está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_s = 8j_f \left(\frac{D_s}{d_e} \right) \left(\frac{L}{l_b} \right) \frac{\rho u_s^2}{2} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-m} \quad (\text{Ec. 39})$$

Con $m=0.25$ para régimen laminar, $Re < 2100$;

$m=0.14$ para régimen turbulento, $Re > 2100$

Donde

ΔP_s : Caída de presión por carcasa [N/m^2]

j_f : Factor de fricción para carcasa [adimensional]

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

D_s : Diámetro de la carcasa [m]

d_e : Diámetro hidráulico [m]

L: Longitud de la carcasa [m]

l_b : Espaciamiento entre baffles [m]

ρ : Densidad del fluido que atraviesa la carcasa [kg/m^3]

U_s : Velocidad de la carcasa [m/s]

El factor de corrección a la viscosidad es comúnmente despreciado cuando el fluido que atraviesa la superficie no es altamente viscoso. Además, se tiene que la velocidad por carcasa U_s se define como:

$$U_s = \frac{G_s}{\rho} \quad (\text{Ec. 40})$$

Donde

U_s : Velocidad por carcasa [m/s]

G_s : Flux másico que atraviesa la carcasa [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

ρ : Densidad del fluido que atraviesa la carcasa [kg/m^3]

El flux másico y área de la carcasa serán:

$$G_s = \frac{W_s}{A_s} \quad (\text{Ec. 41})$$

$$A_s = \frac{(p_t - d_o)D_s l_B}{p_t} \quad (\text{Ec. 42})$$

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Donde

W_s : Flujo másico que atraviesa la carcasa [kg/s]

A_s : Área total de la carcasa [m²]

p_t : Paso o pitch [mm]

d_o : Diámetro externo del tubo [mm]

D_s : Diámetro de la carcasa [m]

l_b : Espaciamiento entre baffles [m]

Es necesario resaltar que para equipos de condensación se considera que $D_s=l_b$, es decir, que el diámetro de la carcasa es igual al espaciamiento entre baffles.

Además, se tiene que el diámetro hidráulico (d_e) se calcula en función del tipo de arreglo seleccionado. De esta forma, se tienen las Ec. 43 y Ec. 44 para arreglo cuadrado y arreglo triangular, respectivamente.

$$d_e = \frac{4 \left(\frac{p_t^2 - \pi d_o^2}{4} \right)}{\pi d_o} = \frac{1.27}{d_o} (p_t^2 - 0.785 d_o^2) \quad (\text{Ec. 43})$$

$$d_e = \frac{4 \left(\frac{p_t}{2} \times 0.87 p_t - \frac{1}{2} \pi \frac{d_o^2}{4} \right)}{\frac{\pi d_o}{2}} = \frac{1.10}{d_o} (p_t^2 - 0.917 d_o^2) \quad (\text{Ec. 44})$$

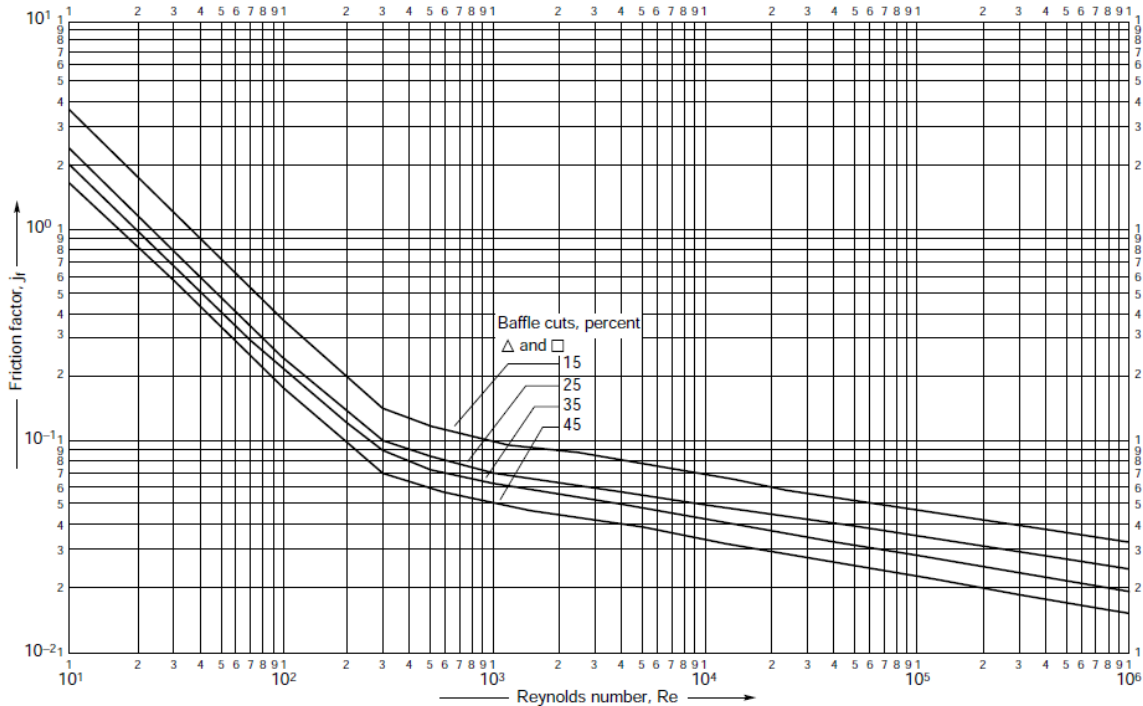
A partir de la Figura 14 se estima el factor de fricción para carcasa j_f . Para determinar este valor, es necesario calcular el número de Reynolds asociado y definir un porcentaje de corte para

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

los baffles; este puede ser de 15, 25, 35 y 45%. Una vez es ubicado este punto de corte, se procede a leer el valor para j_f en el eje Y.

Figura 14

Factor de fricción para carcasa



Nota. Tomada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

4.3.4.9. Estimación de costos del equipo. El costo del equipo es uno de los factores más importantes a la hora de aprobar o rechazar un diseño, pues siempre se debe garantizar la economía sin dejar a un lado la funcionalidad. Para estimar el costo, es necesario que se conozca toda la información correspondiente a dimensiones y características del equipo. Los principales factores que influyen en la variación del costo son el tamaño y el material de fabricación.

4.3.4.10. Optimización del diseño. Una vez el diseño se ha completado, se evalúan otras alternativas de diseño garantizando que los requerimientos técnicos se cumplan. Para esto,

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

se recomienda el uso de programas de simulación de procesos químicos como AspenPlus y Hysys, los cuales facilitan el análisis de otras posibilidades variando dimensiones, materiales, tipos estándar, entre otros.

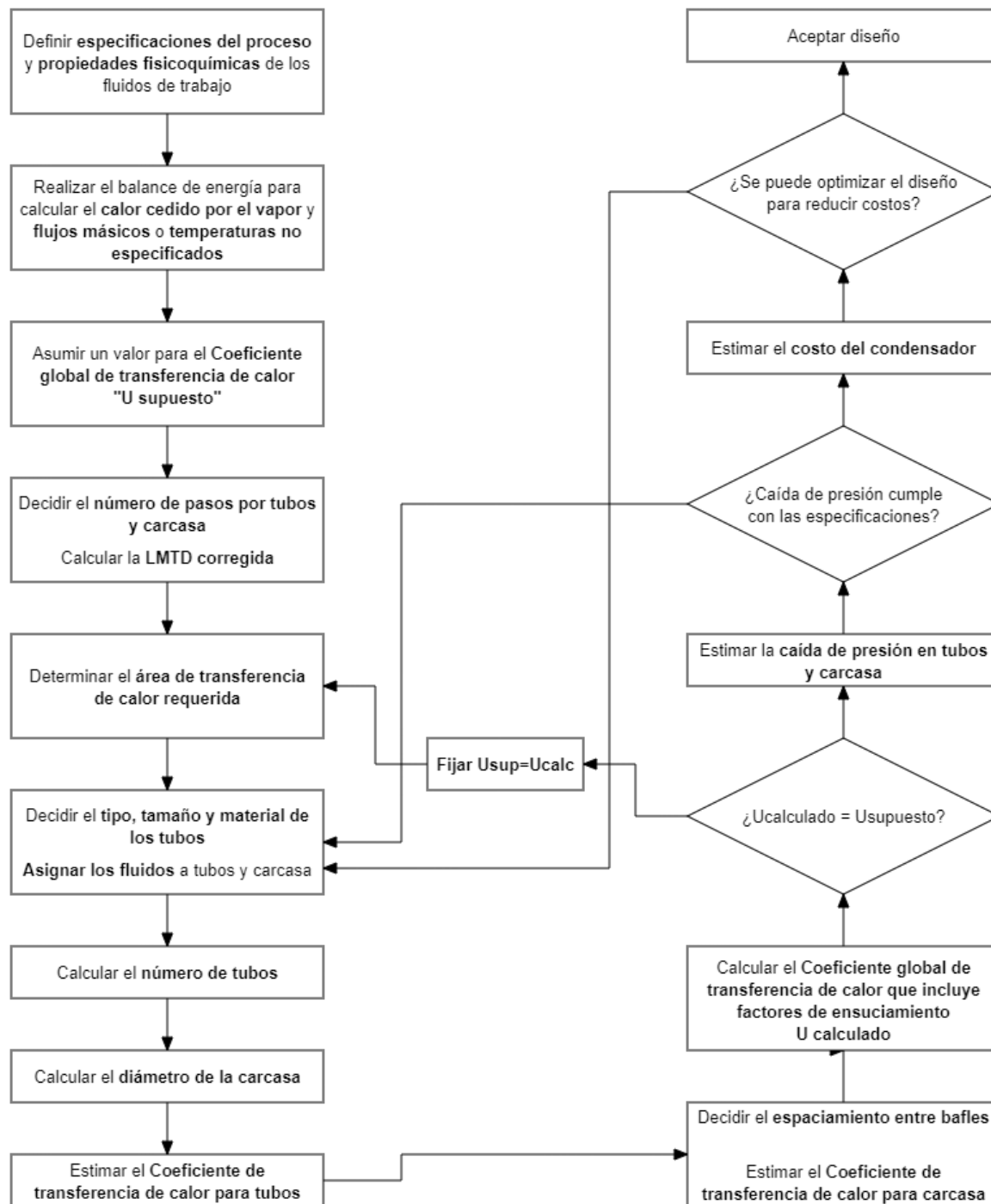
4.3.5. Capítulo 5: Algoritmo de solución

La Figura 15 propone el algoritmo de solución para el diseño de un intercambiador de calor de tubos y carcasa. Este contiene la información presentada durante la sección anterior de forma sintetizada y organizada con el fin de sistematizar el proceso para la estimación del diseño.

Figura 15

Algoritmo de solución para el diseño de condensadores

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES



Nota. Adaptada de *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*, por Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

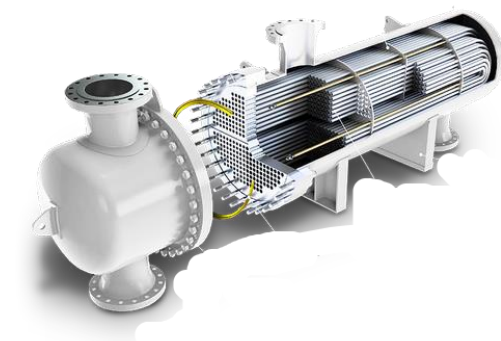
4.4. Diseño del material multimedia

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

El uso de imágenes, figuras, animaciones y videos, entre otras herramientas, resulta significativo para la consolidación audiovisual del proyecto, pues este material beneficia el proceso de comprensión y estimula al usuario por ser de carácter didáctico. Para el desarrollo del presente MEC, se implementaron figuras estáticas y secuencias de imágenes diseñadas en CorelDRAW 2019, estas últimas fueron posteriormente procesadas con Picasion para generar la animación correspondiente y de esta manera, por ejemplo, ilustrar la trayectoria de los fluidos de trabajo dentro del equipo de intercambio de calor. Sin embargo, la mayoría de las imágenes son libres y fueron tomadas de la web, así como también los GIFs. El formato de preferencia para las imágenes implementadas dentro del material fue PNG pues es visualmente prolijo, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Imagen libre de condensador de tubos y carcasa en formato PNG



Nota. Tomada de: https://www.allahwalaengineering.com/wp-content/uploads/2020/07/heat-exchanger-designs_02.jpg

Dentro del cuerpo del MEC se presentaron algunos enlaces a videos obtenidos desde plataformas como YouTube que permiten comprender con mayor facilidad algunos conceptos o

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

procesos específicos. De forma adicional, el material contiene vínculos externos a páginas web para abordar diferentes temáticas de forma individual y profunda.

4.5. Diseño de herramientas interactivas

Adicionalmente, dentro del MEC, se presentó una herramienta libre de cálculo para estimar el diseño de un equipo de condensación partiendo de los requerimientos y especificaciones propias de cierto proceso. El principal objetivo de este instrumento es sistematizar el proceso de cálculo y diseño del intercambiador de calor y, de esta manera, facilitar la comparación de diferentes equipos en función de sus variables de diseño. Sin embargo, esta herramienta también requiere de la participación del usuario para definir ciertos valores bajo los criterios de selección expuestos dentro del MEC. Así, se garantiza la integración de los elementos teóricos y prácticos para obtener un diseño óptimo del equipo de condensación. Para su creación se hizo uso del programa Microsoft Office Excel pues cuenta con un lenguaje sencillo y práctico que puede ser manejado por cualquier usuario. La Figura 17 muestra el entorno de la herramienta presentada.

Figura 17

Entorno de la Herramienta libre de cálculo

INTERCAMBIADOR DE CALOR

DATOS DEL INTERCAMBIADOR 1		
F1	Flujo másico del fluido caliente [kg/s]	1,7571 [1]
F2	Flujo másico del fluido frío [kg/s]	8,8330
T1	Temperatura de entrada del fluido caliente [K]	298,15 [1]
T2	Temperatura de salida del fluido caliente [K]	263,15 [1]
T3	Temperatura de entrada del fluido frío [K]	423,15 [1]
T4	Temperatura de salida del fluido frío [K]	373,15 [1]
CpLiq	Capacidad calorífica del fluido caliente [J/(kg·K)]	6387,14 [5]
CpGas	Capacidad calorífica de la fracción gaseosa del fluido caliente [J/(kg·K)]	6387,14 [5]
CpProm	Capacidad calorífica promedio del fluido caliente [J/(kg·K)]	6387,14
CpAgua	Capacidad calorífica del fluido frío [J/(kg·K)]	1923,00 T3 [4]
V_agua	Volumen del fluido frío [m³/s]	13,3018278
D_agua	Densidad del fluido frío [kg/m³]	0,5762 T3 [4]

DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR 1		
Q1	Calor transferido por fluido caliente [W]	658916,282 Ec.22 [2]
Q2	Calor recibido por el fluido frío [W]	-658916,22 Ec. 21 [2]
DeltaT1	Diferencia de temperatura entre el extremo 1 [K]	85,0000 Ec. 16 [2]
DeltaT2	Diferencia de temperatura entre el extremo 2 [K]	75,00 Ec. 17 [2]
DeltaTLM	Diferencia de temperatura media logarítmica [K]	64,48 Ec. 14 [2]
U	Coefficiente global de transferencia de calor [W/m²·K]	380 T5 [3]
A	Área de transferencia de calor [m²]	23,88 Ec. 13 [2]
F	Factor de corrección de diferencia de temperatura media logarítmica	0,80 [10] [3]
DTL_COR	Diferencia de temperatura media logarítmica corregida [K]	58,035519 Ec. 15 [2]
R	Factor de corrección de temperatura	0,71 Ec. 19 [3]
P	Factor de corrección de temperatura	0,56 Ec. 20 [3]
L	Longitud del tubo [m]	7 [2]
D	Diámetro del área de transferencia de calor [m]	1,35884678 Ec. 23
R_LID	Relación de la longitud-diámetro del área de transferencia	5,16220467 Entre 5 y 10 [2]

DISEÑO DE LOS TUBOS		
NH	Tipo de arreglo de los tubos	Square [2]
Ps	Número de pasos por el tubo	2 [3]
L	Longitud del tubo [m]	7 [2]
do	Diámetro externo del tubo [mm]	30,4 [2]
di	Diámetro interno del tubo [mm]	19,05 [2]
At	Área de superficie de un tubo [m²]	0,66853097 Ec. 23
Nr	Número de tubos	44,63216047 [2] Pág. 693
K1	Constante dependiente del número de pasos y configuración	0,156 [10] [2]
n1	Constante dependiente del número de pasos y configuración	2,231 [10] [2]
Db	Diámetro del paquete [mm]	359,2347651 Ec. 30
Act	Área de sección transversal de un tubo [m²]	0,000285923 [2] Pág. 693
Att	Área total de un tubo [m²]	0,012732282 [2] Pág. 693
Tp	Tubos por paso	22,31608024 [2] Pág. 693
Vel	Velocidad de la masa de vapor de agua [kg/s·m²]	137,9330562 [2] Pág. 694

DISEÑO DEL L		
Tma	Temperatura media del	
ua	Viscosidad dinámica del al	
Hd	Espacio libre de la carc	
Ds	Diámetro de la carc	
Ps	Diámetro de la carc	
As	Área del flujo cruce	
Gs	Velocidad másica del fluido en l	
Bs	Separación del de	
us	Velocidad del fluido en la	
de	Diámetro equivalente del lado	
Re	Número Adimensional Reyno	
jh	Factor de transferencia de ca	
Kf	Conductividad térmico	
Pr	Número Adimensional Pranc	
N	Número Adimensional Nuspe	
hs	Coefficiente de transferencia de cal	

FORMULAS UTILIZADAS

$Re = \frac{\rho u d}{\mu}$
 $Pr = \frac{c_p \mu}{k_f}$

where W_s = fluid flow rate on the shell side, kg/s, ρ = shell-side fluid density, kg/m³.

4.6. Diseño estructural y educativo del MEC

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Con el fin de brindar una interfaz didáctica e interactiva para el usuario, se realizó el montaje del fundamento teórico y el contenido multimedia en Genial.ly. Esta plataforma cuenta con rutas y elementos inteligentes que permiten la fácil navegación del usuario dentro de la herramienta. Además, permite que el usuario pueda retornar a cualquier tema en caso de no haber comprendido totalmente la información expuesta previamente.

Para este proyecto, se direccionó el recorrido a través del contenido con el fin de que el usuario revise toda la información en el orden correcto y sin omitir el fundamento. En adición, se estructuró el contenido teórico por secciones, y estas a su vez, se organizaron en diferentes mapas mentales creados a través de la herramienta GoConqr para brindar al usuario un balance general de la información que encontrará disponible por capítulo, tal como se evidencia en la Figura 18. Al final de cada sección y como requisito para avanzar a la próxima temática, se presentan quices cortos que deben ser respondidos correcta y completamente como indicador de que el conocimiento ha sido adquirido satisfactoriamente.

Figura 18

Mapa mental para la temática Transferencia de Calor dentro del MEC por GoConqr.



4.7. Montaje de la interfaz del MEC

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Esta etapa metodológica es la fase final de diseño, pues se reunieron los resultados obtenidos en cada fase previa y se realizó el respectivo ensamble entre material multimedia, fundamento teórico y herramientas de cálculo dentro de la interfaz seleccionada. Para el montaje, fue necesario normalizar los tipos de archivos disponibles para cumplir con la compatibilidad entre los programas. Adicionalmente, se buscó garantizar un entorno estéticamente agradable y llamativo a través del uso de patrones de colores para unificar las tonalidades.

4.8. Prueba piloto y ajustes

Una vez se obtuvo el resultado final del MEC, este fue sometido a una prueba piloto con el fin de corroborar el correcto funcionamiento de la herramienta y garantizar que el ensamble de todos los contenidos haya sido satisfactorio. Dentro de esta etapa, se corrigieron los errores y fallos encontrados durante su ejecución para su posterior presentación. Para analizar esta herramienta, se solicitó al docente a cargo de la dirección del presente proyecto realizar una exploración dentro del MEC y se realizó un balance de las recomendaciones recibidas, entre las que destacaron la implementación de términos diferentes para facilitar la comprensión de varios conceptos y la transición del recorrido a través del material.

4.9. Prueba de campo

Por último, se presentó la versión final del material con las correcciones y recomendaciones aportadas por el docente debidamente aplicadas al material para mejorar la experiencia del usuario navegando dentro del contenido. Como resultado final se obtuvo el MEC completamente ajustado y listo para su presentación y entrega final.

5. Resultados

En esta sección se presenta el producto final obtenido tras el diseño del material educativo a través de diferentes imágenes propias de la plataforma interactiva. Así pues, la Figura 19 muestra

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

el entorno inicial para acceder al contenido dentro del MEC; esta será la primera vista disponible una vez el usuario acceda a la interfaz y, además, cuenta con botones inteligentes que facilitan la navegación dentro del material.

Figura 19

Entorno del inicio del MEC en Genial.ly



Las Figura 20 y Figura 21 presentan las secciones en las que se estructuró el contenido teórico y estas a su vez se organizaron en mapas mentales, respectivamente. Los mapas mentales presentados cuentan con elementos adicionales que contienen vínculos a páginas web, videos o imágenes para reforzar el aprendizaje en función de diversos conceptos complementarios. En esta línea, la Figura 22 muestra el tipo de imágenes libres utilizadas dentro del MEC y el vínculo a elementos externos a través del botón “How does it work”; este último permite al usuario acceder a videos dentro de la plataforma de YouTube para indagar sobre el funcionamiento de los diferentes posibles equipos de condensación. Además, también se muestran diferentes elementos

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

y botones inteligentes que promueven el fácil acceso y navegación dentro y fuera del material computarizado.

Figura 20

Contenido por secciones dentro del MEC en Genial.ly

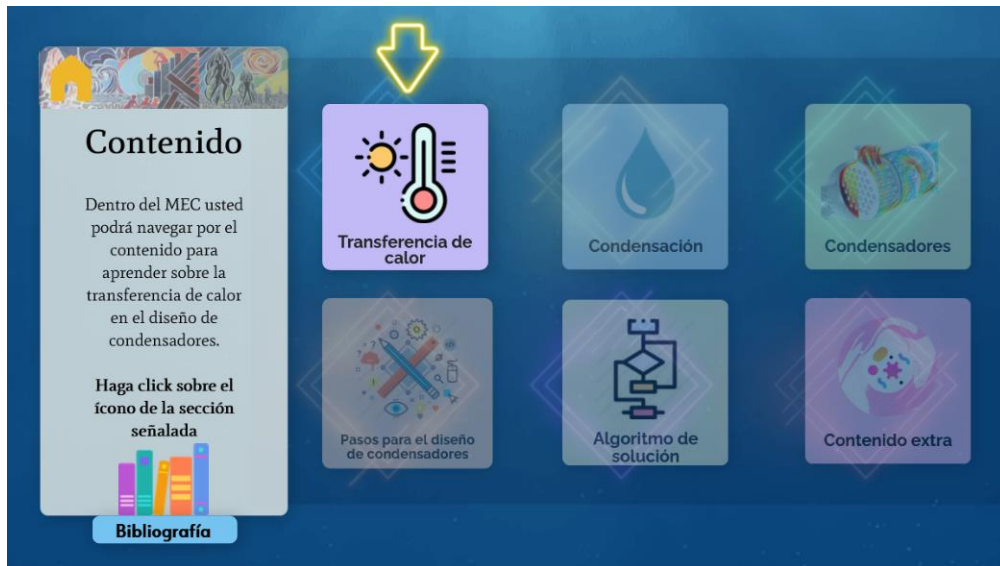


Figura 21

Mapa mental para la sección de Transferencia de calor en Genial.ly

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES



Figura 22

Intercambiador de calor de tubos y carcasa dentro del entorno Genial.ly



5.1. Evaluación del MEC

Para realizar la evaluación del MEC, este fue dispuesto a disposición del docente a cargo con el fin de obtener una valoración integral del contenido teórico y multimedia, así como también del componente pedagógico. De esta forma, se concluyó que la interacción usuario-interfaz es

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

sencilla por la acción de diferentes elementos interactivos que facilitan la navegación direccionada por el material. Además, el contenido teórico y multimedia presentado, aporta y promueve activamente el proceso de enseñanza, impartiendo las bases necesarias para comprender exitosamente las temáticas presentadas.

6. Conclusiones

- Se diseñó un Material Educativo Computarizado de interfaz interactiva, didáctica y de fácil navegación como herramienta de apoyo en el proceso enseñanza-aprendizaje para la transferencia de calor en el diseño de condensadores.
- El presente MEC ofrece el contenido necesario para complementar los conocimientos adquiridos de forma presencial en materia de diseño de condensadores mediante la incorporación de material audiovisual, ejercicios prácticos y herramientas de cálculo.
- La inclusión de este tipo de materiales computarizados fortalece el desarrollo en TICs para la educación y promueve nuevas estrategias en torno a la enseñanza, cambiando la dinámica tradicional de este proceso.

7. Recomendaciones

- La difusión e implementación de estas herramientas educativas deben ser promovidas desde el cuerpo docente para garantizar que llegue de forma satisfactoria a los estudiantes con el fin de complementar y/o reforzar el conocimiento base adquirido curricularmente.
- El tipo de software sobre el que se desarrolló el presente MEC permite la posterior actualización y adición de información para robustecer el material a través de nuevas herramientas multimedia o de cálculo.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

- En función de los diferentes MECs que se han desarrollado dentro de la Escuela de Ingeniería Química, se sugiere disponer de un módulo dentro de la herramienta Moodle que reúna todos los materiales disponibles para que los estudiantes tengan fácil acceso a estos.
- Se sugiere la implementación de saVRee, un software pago que permite el acceso a contenido de índole ingenieril como modelos 3D para facilitar la enseñanza de la estructura y funcionamiento de intercambiadores de calor.

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

Bibliografía

- Agnelli, A. (2020). *Las tecnologías de la Información y la Comunicación y su avance en el contexto educativo*. Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 3, 94–101.
- Aguilera, L. y Díaz, D. (2015). *Desarrollo de un Material Educativo Computarizado (MEC) para el aprendizaje de la operación de humidificación* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Anaya, S., Hernández, U., y Universidad del Cauca. (2010). *Creacion y uso de materiales educativos computarizados desde una perspectiva crítica en la educacion básica*. EDUCyT, 1(1), 1–13.
- Ballesteros, D. y Claro, N. (2009). *Desarrollo de un Material Educativo Computarizado (MEC) para la enseñanza de un sistema de separación por resinas de intercambio iónico en la escuela de Ingeniería Química* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Bohórquez, P., y Hernández, G. (1992). *Simulación de procesos de transferencia de calor en condensadores* (Trabajo de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Çengel, Y. (2016). *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V. 3ra. Edición. México.
- Chacón, A. (2014). *Desarrollo de un Material Educativo Computarizado (MEC) como recurso en el aprendizaje de la asignatura Microbiología Industrial* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Contreras, J. y Sánchez, V. (2005). *Diseño y desarrollo de un Material Educativo Computarizado para la Introducción a la Ingeniería Química* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Dwyer, T. (1974). *Heuristic Strategies for Using Computers to Enrich Education*. Internation Journal of Man-Machine Studies, 6, 137–195.
- Galvis, A. (1993). *Evaluación De Materiales Y Ambientes Educativos Computarizados*. Informática Educativa Proyecto SIIE, 6(1), 9–27. Recuperado de http://www.colombiaaprende.edu.co/html/mediateca/1607/articles-127612_archivo.pdf

CREACIÓN DE MEC PARA EL DISEÑO DE CONDENSADORES

- Incropera, A.; Dewitt, D. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Editorial Wiley. 4a ed. 1996. Estados Unidos.
- Kern, D. (1999). *Procesos de transferencia de calor*. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. 31a reimpresión. 1999. México. Católica del Norte Fundación Universitaria.
- Leguizamón, M. (2006). *Diseño y desarrollo de Materiales Educativos Computarizados (MEC): una posibilidad para integrar la informática con las demás áreas del currículo*. VIII Congreso de Informática Educativa, Cali, Colombia.
- Olarte, J. y Bellido, J. (2005). *Desarrollo de un Material Educativo Computacional (MEC) para la enseñanza de los Fenómenos del Transporte I en la escuela de Ingeniería Química* (Trabajo de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Parra, C. (2012). *Las TIC y la educación en Colombia durante la década del noventa: alianzas y reacomodaciones entre el campo de las políticas educativas, el campo académico y el campo empresarial*. *Revista Educación y Pedagogía*, 24(62), 173–189.
- Salmerón, A. (2017). *Las Tic En La Educación*. MEDAC - Instituto Oficial de Formación Profesional. Recuperado de: <https://medac.es/articulos-educacion-infantil/las-herramientas-tic-en-la-educacion/>
- Sánchez, M. (2014). *Metodologías activas y aprendizaje por descubrimiento*. Las TIC y la educación. Marpadal Interactive Media SL.
- Sepúlveda, C. y Yancy, D. (2009). *Objeto de aprendizaje basado en el estudio de la Transferencia de Calor con aplicaciones a la Ingeniería Química* (Trabajo de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Sinnott, R., Coulson, J., y Richardson, J. (2005). *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.