



## Design and Optimization of Shell and tube heat exchangers, state of the art.

Maida Bárbara Reyes Rodríguez<sup>1</sup>, Jorge Laureano Moya Rodríguez<sup>2</sup>

Dra. <sup>1</sup> Centro de Estudios de Termodinámica y Tecnologías Ambientales (CEETA). UCLV Email: maidab@uclv.edu.cu

Dr. <sup>2</sup> Instituto e Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM). Avenida Joaquim Nabuco, No. 1950. CEP: 69005-080. Manaus. Amazonas (jorgemoyar@gmail.com)

### ABSTRACT

Optimizing heat transfer processes is of great importance for energy saving and pollution reduction. Within transfer equipment commonly used in the industry are the shell and tube heat exchangers. In the scientific literature, many papers deal with the optimization of these devices. Most of this works focuses in the optimization to a single target, usually increasing the heat transfer coefficient, or diminishing the pump power, although in most cases is to minimize the cost of the exchanger. A recently developed method for optimization of the processes of heat transfer is to minimize the entransy dissipation. In this paper, recent works in this field are discussed, as well as those dealing about the entropy generation in these devices. Scientific publications on the optimization of shell and tube heat exchangers are discussed from the early 90s until today. The use of evolutionary algorithms in optimizing these devices, as well as current trends in the design and optimization of shell and tube heat exchangers was also evaluated.

**Keywords:** Shell and tube Heat exchangers, optimization, mechanical design, entransy.

## Diseño y optimización de los Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza, state of the art

### RESUMEN

La optimización de los procesos de transferencia de calor reviste una gran importancia para el ahorro de energía y la reducción de la contaminación. Dentro de los equipos de transferencia de calor más usados en la industria están los intercambiadores de calor de tubo y coraza. En la literatura científica aparecen numerosos trabajos donde se evalúa la optimización de estos equipos. La mayoría de estos trabajos enfoca la optimización hacia un solo objetivo, por lo general el aumento del coeficiente de transferencia de calor, la disminución de la potencia de bombeo, aunque en la mayoría de los casos se busca minimizar el costo del intercambiador. Un método recientemente desarrollado para la optimización de los procesos de transferencia de calor es la minimización de la disipación de entransía. En este artículo se comentan los últimos trabajos realizados en esta temática, así como los realizados acerca de la generación de entropía en estos equipos. Se comentan las publicaciones científicas sobre la optimización de intercambiadores de calor de tubo y coraza desde la década de los 90s hasta los días actuales. Se evalúa además el uso de los algoritmos evolutivos en la optimización de estos equipos, así como las tendencias actuales en el diseño y la optimización de los intercambiadores de calor de tubo y coraza.

**Palabras clave:** Intercambiadores de calos de tubo y coraza, optimización, diseño mecánico, entransía

### I. INTRODUCCIÓN

La investigación y el desarrollo en la transferencia de calor son de significativa importancia en muchas ramas de la tecnología, en particular de la tecnología energética [1][2]. Los desarrollos incluyen nuevos y eficientes intercambiadores de calor así como la introducción de sistemas de intercambio de calor en los procesos industriales. Las áreas de aplicación incluyen la recuperación del calor en las industrias de procesos, en particular químicas y petroquímicas que cada vez juegan un papel más creciente en Cuba y otros países [3]. Otras

aplicaciones incluyen ingenios azucareros, plantas de procesos industriales, instalaciones de servicio (sector terciario) hoteles, hospitales, centros asistenciales, oficinas de proyectos, etc.) A través del mejoramiento sistemático de los diseños y la operación de los intercambiadores de calor, se inserta la problemática del ahorro de energía, el desarrollo sostenible y la defensa y protección del medio ambiente, políticas que están aprobadas y constituyen planes y programas de investigación suscritos por la Academia de Ciencias de Cuba y el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA)[4].

En la preparación de esta revisión, se han considerado las revistas más importantes relacionadas con la energía y la transferencia de calor. También se han consultado revistas orientadas al modelado, los métodos numéricos y la optimización de los sistemas de ingeniería relacionados con la transferencia de calor, así como revistas de ingeniería química con un contenido de cómputo importante.

## II. IMPORTANCIA DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor (ICs) están presentes en la mayoría de los sistemas térmicos complejos de las industrias y representan el vehículo más ampliamente usado para la transferencia de calor en las aplicaciones de los procesos industriales [5][6]. Ellos son seleccionados para servicios tales como: enfriamiento de líquido o gas, procesos donde se condensen vapores de refrigerantes o condensación de vapor de agua, procesos de evaporación de refrigerantes agua u otros líquidos; procesos de extracción de calor y calentamiento regenerativo del agua de alimentación a calderas; para la recuperación del calor en efluentes gaseosos y líquidos residuales calientes, para el enfriamiento de aire y aceite de lubricación en compresores, turbinas y motores, mediante camisas de enfriamiento y muchas otras aplicaciones industriales [7].

Los ICs tienen la habilidad de transferir grandes cantidades de calor con relativamente bajo costo, poseyendo grandes áreas de superficie de transferencia en pequeños espacios, volúmenes de líquido y peso. Ver un esquema simplificado de un IC, en particular, de tubo y coraza [5], en la Figura 1.

Los ICs están disponibles en un amplio rango de tamaños, se han usado en la industria por más de 150 años [8][9][10][11] con tecnologías de fabricación bien establecidas por modernos y competitivos fabricantes, *que preservan sus softwares de diseño y operación o los venden en el mercado a precios aún no alcanzables por la mayoría de los países en desarrollo.*

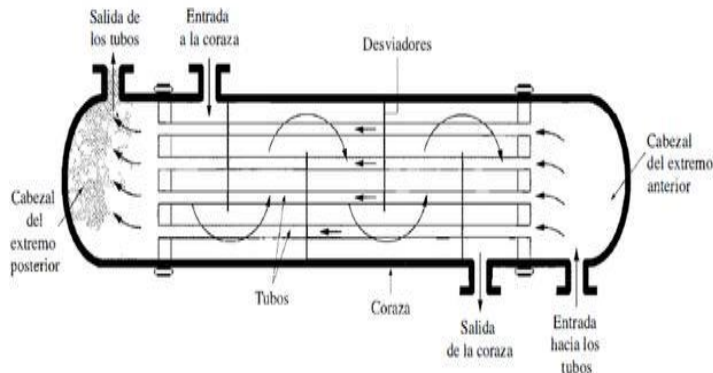


Figura 1. Esquema de un intercambiador de calor de tubo y carcasa con un paso por la carcasa y un paso por los tubos.

Compañías tales como la HTRI [12][13] y HTFS [14] (en idioma inglés: Heat Transfer Research Institute, HTRI; Heat Transfer Flow Systems, HTFS), venden su software en el mercado, incorporando diversas opciones para los intercambiadores de calor.

Dichas compañías no revelan sus métodos de cálculo; y sus puntos de operación, generalmente, no coinciden con el punto de mínimo costo del sistema en el cual se encuentran instalados. La explicación está en que las compañías fabricantes, a la hora de la venta ofrecen una mayor capacidad de calor transferido con el mismo equipo, trasladando el punto de mínimo costo de operación a un valor más alto. De esa manera, se podría operar el mismo intercambiador a mayor capacidad sin necesidad de comprar un equipo nuevo, pero a un mayor costo de producción. Queda por investigar si optimizando localmente dicho intercambiador se pudiera llegar a un mínimo global del sistema, o al menos a su mejoramiento.

## III. DISEÑO Y OPTIMIZACION DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

Generalmente, los problemas que presenta el mundo real tienen un nivel de complejidad considerable. Muchas veces esa complejidad radica en que consisten de varios objetivos y restricciones que deben satisfacerse [15]. La necesidad de seleccionar múltiples variables, tanto de diseño como de operación de los ICs buscando una función objetivo con vistas a la minimización de su costo total conduce a la optimización multicriterial de estos equipos. En este [epígrafe se analizarán fundamentalmente los trabajos realizados en intercambiadores de calor de tubo y coraza tanto en el diseño como en la optimización de un solo objetivo.

De acuerdo con [16] en su trabajo “Dimensionamiento de Intercambiadores de calor de coraza y tubos, con ayuda de computador” realizan la optimización del diseño de un intercambiador de tubo y coraza; para ello utiliza el método de Kern y minimiza el área de transferencia. Desarrolla un software para tal fin. El trabajo en general aporta poco al conocimiento ya establecido sobre intercambiadores de calor.

De acuerdo con [17] desarrollaron en el año 2003 un programa de computación para el diseño de intercambiadores de calor donde se examinan casi todas las alternativas posibles de configuración del intercambiador de tubo y coraza. En un diseño computarizado, muchos millares de configuraciones alternativas del cambiador pueden ser examinados. Entre otros parámetros se evalúan por ejemplo, el diámetro de la coraza, el espaciamento entre bafles. Se evalúa además la caída de presión y el coeficiente global de transferencia de calor. No se optimiza ningún parámetro y solamente abarca fluidos monofásicos y está concebido para uno y dos pases por el tubo.

#### IV. ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Las técnicas evolutivas se han utilizado con el fin de la optimización de un solo objetivo por más de tres décadas [18][19]; pero se descubrió gradualmente que muchos problemas del mundo real están planteados naturalmente como problemas de varios objetivos. Actualmente la optimización multi-objetivo es sin duda un tópico muy popular para los investigadores y los ingenieros. Pero hay aún muchas cuestiones abiertas y sin respuesta en esta área. De hecho no hay incluso una definición universal aceptada del concepto de “óptimo” como lo es en el caso de un único objetivo, lo que hace difícil incluso comparar resultados de un método a otro, porque la decisión sobre cuál es la “mejor” respuesta corresponde normalmente al “decisor”.

Puesto que la optimización multi-criterio requiere de la optimización simultánea de criterios múltiples, muchas veces compitiendo entre sí o inclusive entrando en conflicto de objetivos, la solución a tales problemas es calculada generalmente combinándolos en un problema de optimización de un solo criterio. No obstante la solución resultante al problema de optimización de un solo objetivo entonces es por lo general subjetiva de acuerdo al ajuste de los parámetros elegidos por el usuario [18][19]. Por otra parte, puesto que usualmente se utiliza un método clásico de optimización generalmente, sólo una solución (en el mejor de los casos una solución de Pareto óptima) se puede encontrar en una corrida de simulación. Así pues, para encontrar las soluciones múltiples óptimas de Pareto, los algoritmos evolutivos son la mejor opción, porque ellos tratan con una “población de soluciones”. Esto permite a encontrar un conjunto entero de soluciones de Pareto óptimas en una sola corrida del algoritmo.

Los Algoritmos Genéticos (GAs) se desarrollaron mayormente en los años 70s como una herramienta de optimización, aunque ya se había realizado algún trabajo previo en el campo de la computación evolutiva. [20] introdujo las palabras “algoritmo genético” y publicó la primera aplicación de los GAs. Sin embargo los primeros trabajos importantes relacionados con los Algoritmos Genéticos se atribuyen a [21] y [22].

En los años 80s, [23], [24] y [19] contribuyeron a avances significativos en los algoritmos genéticos. Goldberg presenta en su obra una buena instantánea del estado del arte de los algoritmos genéticos en el año 1989. Una historia más completa de los Algoritmos Genéticos y otros métodos evolutivos se ofrece por [25].

Sin embargo el interés y la utilización de los Algoritmos genéticos en el campo de la transferencia de calor es mucho más reciente. Esto es probablemente debido al hecho que para la mayoría de los problemas numéricos en los cuales se interesa la transferencia de calor los tiempos de cómputo son típicamente largos. En el procedimiento de la optimización mediante

algoritmos genéticos, por lo general se necesita realizar varias simulaciones. Cuando por ejemplo, la simulación de un diseño implica análisis mediante dinámica de los fluidos computacional (CFD), el tiempo de cómputo total requerido para que el Algoritmo Genético funcione podría ser prohibitivo. Sin embargo, los GAs comenzaron a ser utilizados en la transferencia de calor aproximadamente a mediados de los 90s, tímidamente al principio, pero cada vez más regularmente hoy en día, como señalaron [26] “la comunidad de transferencia de calor puede esperar ver un aumento significativo en el uso de tales metodologías [GAs] a muchos problemas complicados de las ciencias térmicas que en un cierto sentido admiten la optimización. Estas aplicaciones están siendo facilitadas por el incremento de las posibilidades de las nuevas computadoras, los ambientes de la computación distribuida y por el mejoramiento de la especificación de los parámetros necesarios de los GAs”

Esto es de hecho lo que ha sucedido y los GAs, han generado mucho interés en el campo de la transferencia de calor, particularmente en los dos últimos años. Es hora de mirar hacia atrás a los últimos 15 años para repasar el trabajo logrado con los GAs en la transferencia de calor para luego mirar adelante a los desafíos y a las posibilidades futuras.

Como se mencionó anteriormente el procedimiento de optimización multi – objetivo mediante GAs no busca una solución óptima particular, si no en su lugar un conjunto de soluciones que representan compromisos entre muchas funciones objetivos. En la mayoría de los artículos recientes el algoritmo específico empleado es el “Algoritmo Genético de Ordenación *No-Dominada Elitista* (NSGA-II) [27].

Los principios en los cuales descansa el NSGA-II son iguales que los de la optimización de un solo objetivo: combinando a los individuos más fuertes para buscar los óptimos mediante el cruce y las mutaciones, y repetir este esquema durante muchas generaciones.

Sin embargo, el algoritmo de optimización multi objetivo debe considerar el hecho de que hay muchas “mejores soluciones”, que modifican el proceso de selección. El NSGA- II clasifica a los individuos basados en el rango de la no-dominación y en la distancia de la multitud, para asegurar un nivel de comportamiento, así como una buena dispersión de los resultados. El elitismo es asegurado realizando el proceso de clasificación entre una población combinada, mezclando padres y descendientes. Este algoritmo se puede implementar tanto con códigos reales como binarios.

Hay varios autores que han publicado revisiones del estado del arte de los algoritmos evolutivos y de los algoritmos genéticos. Entre los trabajos más importantes se encuentran: Multiobjective optimization by genetic algorithms: a review [28], An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization [29], Multiobjective Optimization Using

Evolutionary Algorithms [30][31] y Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art [32].

De acuerdo con [33] desarrolla un nomograma muy sencillo para evaluar el coeficiente de transferencia de calor en intercambiadores de calor de tubo y coraza. Este método es muy práctico, pero realmente no tiene grandes aportes desde el punto de vista científico y por otra parte solamente se puede obtener el coeficiente de transferencia de calor en el lado de la coraza.

De acuerdo con [34] desarrollaron un modelo simplificado para el estudio de intercambiadores de calor de tubo y coraza. A pesar de su simplicidad, el modelo demuestra ser útil para el diseño preliminar de intercambiadores de calor de tubo y coraza que trabajan en los sistemas de refrigeración completos y complejos. El modelo es probado en la modelación de un ciclo de refrigeración general y los resultados se comparan con los datos obtenidos de un banco de prueba específico para estos intercambiadores. Desde el punto de vista científico solamente es de interés la simplicidad del modelo.

A [35] realizaron un estudio experimental para mejorar la transferencia de calor en intercambiadores de calor de tubo y coraza. Con el fin de aumentar la transferencia de calor se mejoró la configuración de un intercambiador de calor de tubo y coraza a través de la instalación de sellos en el lado de la coraza. Las holguras entre las placas de los baffles y la cáscara son bloqueados por los sellos, lo que disminuye con eficacia el flujo de cortocircuito (by pass) en el lado de la cáscara. Los resultados de los experimentos demuestran que el coeficiente de transferencia de calor en el lado de la coraza aumentó entre el 18.2-25.5%, el coeficiente total aumentó entre el 15.6-19.7%, y la eficiencia exergética aumentó del 12.9 al 14.1%. Las pérdidas de presión sin embargo crecieron entre el 44.6-48.8% con la instalación de los sellos, pero el incremento de la energía requerida de la bomba se pueden despreciar en comparación con el incremento del flujo de calor.

El comportamiento de la transferencia de calor en el intercambiador “mejorado” se intensifica, lo cual es un beneficio obvio para la optimización del diseño de intercambiadores de calor desde el punto de vista del ahorro de energía. Tratan el tema de la posibilidad de incrementar la transferencia de calor de un intercambiador de tubo y coraza. Sin embargo, dicho método carece de información acerca de las repercusiones que tiene el instalar sellos desde el punto de vista mecánico estructural; ya que se desconoce cómo se instalan esos sellos.

A [36] aplicaron un nuevo concepto denominado “número del campo sinérgico” para realizar la optimización de intercambiadores de calor de tubo y coraza de baffles segmentados. Este concepto lleva implícito dentro de sí varios criterios de optimización, En este caso los autores tomaron el campo de velocidad y el flujo de calor y usaron el método de los algoritmos genéticos para resolver el problema de la

optimización. Para analizar la transferencia de calor en el lado de la coraza utilizaron el método de Bell Delaware, Este trabajo tiene el mérito de introducir un nuevo concepto para optimizar intercambiadores de calor, sin embargo no profundiza en otros criterios de optimización y usa uno de los métodos más antiguos para calcular la transferencia de calor en el lado de la coraza.

De acuerdo con [37] introdujo en el diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza la influencia de la temperatura local y de la velocidad en el grado de ensuciamiento o incrustamiento. El autor señala que la resistencia al ensuciamiento se considera por la mayoría de los diseñadores como una constante, lo cual es erróneo. No se abordan aspectos de optimización ni de métodos de cálculo.

A [38] utilizan el método de análisis de La sensibilidad global mediante un algoritmo armónico de búsqueda para realizar la optimización de intercambiadores de calor de tubo y coraza. Este método es un método Meta – heurístico de búsqueda de solución de un problema. Utilizan el método de Bell Delaware y optimizan tanto el costo de inversión como de operación. Los autores plantean que este método de búsqueda de la solución es más efectivo que el de los algoritmos genéticos.

De acuerdo con [39] plantean que los intercambiadores de calor de tubo y coraza (STHEs) son el tipo más común en los procesos industriales. Además, mencionan que la minimización del costo de estos equipos es un objetivo clave para diseñadores y usuarios. Debido a la construcción y funcionamiento de dichos equipos, el diseño de los mismos involucra procesos complejos para la selección de parámetros geométricos y de operación. Destacan que el enfoque tradicional de diseño de estos equipos involucra la valoración de diferentes geometrías de los mismos, para identificar aquellas que satisfagan una capacidad calorífica dada y un conjunto de restricciones geométricas y de operación. Sin embargo enfatizan que este enfoque consume mucho tiempo y no asegura una solución óptima.

En el trabajo, se explora el uso de una técnica de optimización no tradicional basada en métodos de la Inteligencia artificial llamada “particle swarm optimization” (Optimización por enjambre de partículas) para la optimización de diseño de los intercambiadores mencionados desde el punto de vista económico. Los autores consideran la minimización del costo anual total como función objetivo. Se toma como variables de diseño a optimizar al diámetro interno de la coraza, diámetro externo del tubo y espaciado entre baffles. Además, también se consideran dos disposiciones para los tubos: triangular y cuadrada. Cuatro diferentes casos de estudio se presentan para demostrar la eficacia y la exactitud del algoritmo propuesto. En el trabajo, se muestran los resultados de la optimización usando la técnica antes señalada y se comparan con los obtenidos usando algoritmo genético (GA).

Sin embargo, se nota de ausencia de parámetros referentes a la resistencia mecánica como la presión a la que están sometidos los tubos; lo cual limita el método propuesto de optimización utilizan el método del enjambre de partículas para realizar la optimización del diseño de un intercambiador de calor de tubo y coraza. Su objetivo fue minimizar el costo del intercambiador y usaron diferentes variables geométricas a evaluar, entre ellas el diámetro interior de la coraza, el diámetro de los tubos y el espaciamiento entre baffles. El trabajo se evaluó para dos disposiciones o arreglos de los tubos, el arreglo triangular y el arreglo cuadrado. Los autores comparan los resultados con otros trabajos donde se usó el método de los algoritmos genéticos. El método de diseño utilizado fue el método de Kern.

En Brasil [40] realizaron un trabajo de optimización del diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza. Minimizaron el área de transferencia de calor teniendo en cuenta variables de decisión tales como el diámetro interior de la coraza, la longitud de los tubos, el número de pases por los tubos y la relación entre el espaciamiento entre los baffles y el diámetro de la coraza.

Usaron varias restricciones geométricas y de servicio. Señalan que la optimización en el diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza se ha enfocado principalmente en la minimización del área de transferencia de calor. En este artículo, los autores estudian dicha minimización para cierto tipo de servicio involucrando variables discretas. Utilizan restricciones adicionales que son de carácter geométrico y condiciones de velocidad las cuales se deben cumplir para alcanzar una solución más realista del proceso en estudio. Los autores basan el algoritmo de optimización en una búsqueda en una tabla de conteo de tubos donde las restricciones establecidas y las variables de diseño investigadas son empleadas para eliminar las opciones no óptimas, reduciendo el tiempo computacional empleado.

Los resultados obtenidos muestran la capacidad de la propuesta de dicha optimización para desarrollar diseños más efectivos, considerando limitaciones generalmente ignoradas en la literatura. Los autores no mencionan alguna información relacionada con la resistencia mecánica del diseño optimizado del tipo de intercambiador analizado.[41] del Idaho National Laboratory hacen énfasis en que las nuevas plantas de generación nuclear (NGNP) tendrán muy altas temperatura del reactor, el cual debe ser enfriado por gas. En estos sistemas se utilizan intercambiadores de calor de tubo y coraza.

#### IV.1 SURGIMIENTO DE LA ENTRANSÍA

A [42] definen una nueva cantidad física como base para la optimización de los procesos de transferencia de calor en términos de la analogía entre el calor y la conducción eléctrica. Esta cantidad, que será referida como “Entransía”

( $E_h = \frac{1}{2} Q_{vh} \cdot T$ ), corresponde a la energía eléctrica almacenada en un condensador. Los análisis de transferencia de calor demuestran que la Entransía de un objeto describe su capacidad de transferencia de calor, de la misma forma la energía eléctrica en un condensador describe su capacidad de transferencia de carga. La disipación de Entransía ocurre durante procesos de transferencia de calor como una medida de la irreversibilidad de la transferencia de calor.

Los conceptos de entransía y disipación de entransía fueron utilizados para desarrollar el principio de la disipación de entransía para la optimización de los procesos de transferencia de calor. Para un flujo de calor en una frontera fija, el proceso de conducción es óptimo cuando se reduce al mínimo la disipación de entransía, mientras que para una temperatura en una frontera fija la conducción se optimiza cuando se maximiza la disipación de entransía

Una resistencia térmica equivalente para los problemas de la conducción multidimensional se define basado en la disipación de Entransía, de tal manera que el principio extremo de disipación de Entransía se puede relacionar con el principio de la mínima resistencia térmica para optimizar la conducción.

De acuerdo con [43] a finales del año 2010 introducen una teoría y un concepto muy novedoso en la optimización de intercambiadores de calor. La llamada “Teoría de la disipación de entransía” ha revolucionado los conceptos y métodos de la transferencia de calor. En el trabajo señalan que la transferencia de calor y la fricción en los fluidos son dos irreversibilidades en los intercambiadores de calor y que la disipación de entransía puede ser empleada para cuantificar dichas irreversibilidades. Aplicando dicha teoría y el método de los algoritmos genéticos realizan la optimización del diseño de intercambiadores de calor utilizando como función objetivo la disipación de entransía.

En Canadá [44] a finales del año 2006 desarrollaron un procedimiento para minimizar el costo de un Intercambiador de calor de tubo y coraza basados en los algoritmos genéticos. Lo más destacable de este trabajo es que manejaron 11 variables de diseño relacionadas con la geometría del intercambiador, entre ellas, el paso de los tubos, el arreglo de los tubos, el número de pasadas por el tubo, el espaciamiento entre baffles, tanto en el centro como en la entrada y en la salida, el corte de los baffles, el diámetro de la coraza, el diámetro de los tubos, etc. El método usado fue una versión adaptada del método de Bell Delaware. Tuvieron en cuenta en los costos además los costos asociados al mantenimiento.

Uno de los pocos trabajos encontrados que aborda la optimización multi objetivo de los intercambiadores de calor de tubo y coraza fue el realizado por los iraníes [45]. En este trabajo los autores consideran la eficacia y el coste como los dos objetivos más importantes en el diseño del intercambiador de



calor. En el coste total incluyen los costos de inversión y los costos de operación. Utilizan como parámetros a variar o variables independientes los siguientes: arreglo de tubos, diámetro del tubo, paso entre los tubos, relación de espaciamiento entre los baffles, longitud de los tubos, número de tubos así como la relación de corte del baffle. Para lograr el diseño óptimo, el intercambiador fue modelado termicamente usando el método de la eficacia – NTU, mientras que se aplicó el procedimiento de Bell Delaware para estimar la caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor en el lado de la coraza. Para obtener la eficacia máxima y el costo mínimo como dos funciones objetivo se aplicó el método de los *Algoritmos Genéticos* de Ordenación *No-Dominada Elitista* (NSGA-II) con variables continuas y discretas. Los resultados óptimos del diseño son un sistema de soluciones óptimas múltiples, llamado frente de Pareto de soluciones óptimas.

Existen otros algoritmos evolutivos como la Evolución Diferencial (DE), introducida por [45]. Este es un método no binario que realiza el cruzamiento basado en el uso de vectores diferenciales de “peso” entre los individuos. Su versión multi objetivo es la “Evolución Diferencial Multi Objetivo” (MODE), descrita por [46]. Otro popular algoritmo es el “Recocido Simulado” (SA) [47-49], el cual como su nombre sugiere se basa en el fenómeno físico del mejoramiento de las propiedades mediante el recocido.

A [50] en una comunicación corta presentan un modelo para estimar el coste total de cambiadores de calor de tubo y coraza, así como una estrategia de diseño para reducir al mínimo este coste. El proceso de la optimización se basa en un algoritmo genético. El coste global incluye el coste energético (es decir energía de bombeo) y el coste de compra inicial del intercambiador. Se optimizan once variables de diseño. Diez están asociadas con la geometría del intercambiador y una relacionada con si el fluido condensado pasa por los tubos o por la coraza. Se presentan dos estudios de caso y los resultados obtenidos demuestran que el procedimiento puede identificar rápidamente el mejor diseño para un proceso dado de transferencia de calor entre dos fluidos, uno de los cuales está condensando.

Los intercambiadores de calor son un componente integral de todos los sistemas térmicos. Sus diseños deben ser adecuadamente adaptados a las aplicaciones en las cuales deben ser usados, de otra manera su comportamiento no sería fiable y su costo sería excesivo. El diseño de los intercambiadores de calor puede ser una tarea muy compleja donde las herramientas de optimización avanzadas son muy útiles para identificar el mejor y más barato intercambiador para un requerimiento específico.

Los algoritmos genéticos están entre las herramientas más comunes para realizar esta tarea de optimización. Los modelos usados para evaluar el comportamiento de los

intercambiadores de calor son en su mayoría analíticos y se basan en relaciones empíricas. [51] realizaron el diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza mediante un algoritmo genético estándar sin elitismo. El objetivo perseguido por los autores en este trabajo fue simplemente minimizar el coste usando como variables independientes el diámetro del tubo, el paso entre los tubos, el número de pases por los tubos, el diámetro exterior de la coraza y el corte de los baffles.

De acuerdo con [52] mencionan que el objetivo principal en cualquier diseño de un intercambiador de calor generalmente es la valoración del área mínima de transferencia satisfaciendo una capacidad calorífica requerida, ya que dicha área gobierna el costo total del equipo. Añaden que diferentes configuraciones son posibles utilizando diversas variables del diseño tales como diámetro externo, paso diametral, longitud de los tubos, etc.; por lo que se hace necesaria una estrategia eficiente en la búsqueda de un mínimo global. El trabajo propone por primera vez una metodología de optimización llamada evolución diferencial (DE) aplicada al diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza; la cual es una versión mejorada de algoritmos genéticos (GAs). Se menciona que se ha aplicado con éxito con diversas estrategias para diferentes configuraciones de diseño usando el método de Bell y así encontrar el área de transferencia de calor.

En el uso del método propuesto, son consideradas 9680 combinaciones de los parámetros claves. Para ese problema de diseño óptimo, se encontró que la DE es una estrategia excepcionalmente simple, siendo notablemente más rápida que el GA, al presentar un óptimo global para una amplia gama de los parámetros dominantes pero sin tomar en cuenta la resistencia mecánica que deberían tener los elementos en el diseño ya optimizado (principalmente los tubos). Los autores minimizaron el coste de los intercambiadores de calor de tubo y coraza basados en el método de optimización de la evolución diferencial. A tal efecto tomaron siete variables de diseño.

A [53] también redujeron al mínimo el coste de los intercambiadores de calor de tubo y coraza, pero en su caso usaron solamente tres variables de diseño (diámetro de la coraza, diámetro del tubo y espaciamiento de los baffles). El Algoritmo genético empleado por los autores incluyó 20 individuos por población. Se empleó también el elitismo y un método de cruzamiento disperso donde se creó un vector binario aleatorio que tiene un número de bits igual al número de genes de un individuo. Entonces, los genes donde el valor es 1 se copian del primer padre, mientras que los genes donde el valor es 0 se copian del segundo padre.

Una sola función objetivo que representa el costo anual (costo exergético y costos capitales) de un intercambiador de calor de tubo y coraza fue minimizada por [54]. La función depende de la longitud del tubo (variable discreta), diámetro exterior de los tubos (variable discreta), tipo de paso (variable

discreta), relación de paso (variable discreta), ángulo de disposición de los tubos (variable discreta), número de pasadas por el tubo (variable discreta), relación de espaciado entre los bafles (variable discreta), y flujo másico (variable continua). Se usó un algoritmo genético mezclado de variables reales continuas y discretas. A este algoritmo se le añadieron características originales tales como la inserción de nuevos individuos generados aleatoriamente en cada generación.

Un artículo de [55] sobre métodos generales de optimización de intercambiadores de calor dio varias consideraciones para la optimización del diseño de los mismos. Primeramente debe establecerse la meta de la optimización: podría ser la reducción del tamaño del intercambiador de calor y/o reducir los gastos de explotación. Las variables operacionales que podrían ser optimizadas son la tasa de transferencia de calor, la energía de bombeo (caída de presión), el flujo y la velocidad del líquido. Al considerar la optimización reduciendo su tamaño (y por lo tanto ahorrando la cantidad de material usado), el aumento en coste de fabricación debe ser considerado.

El objetivo principal en el diseño de los intercambiadores de calor es el incremento de la transferencia de calor. Pero esto se contrapone con el incremento de la potencia de bombeo y la energía consumida en este aspecto. Es posible encontrar un diseño que sea el equilibrio entre estos dos efectos. Existe un método de optimización para lograr esto denominado Minimización de la Generación de la Entropía (EGM). Consiste en calcular la entropía producida y encontrar los parámetros para la entropía mínima.

Un artículo corto sobre la minimización de la generación de la entropía fue publicado por [56]. En el mismo el autor da un criterio general para evaluar el comportamiento de un intercambiador de calor. Describió los dos tipos de pérdidas que un intercambiador de calor puede tener, pérdidas debido a la diferencia de la temperatura del líquido-a-líquido ( $\Delta T$ ) y pérdidas friccionales debido a la caída de presión ( $\Delta P$ ). Una disminución de las pérdidas de  $\Delta T$  daría lugar a un aumento de las pérdidas de  $\Delta P$ . Ambas pérdidas contribuyen a la irreversibilidad del intercambiador de calor.

La entropía fue utilizada para cuantificar esta irreversibilidad y la reducción al mínimo de la cantidad de entropía producida conducirá entonces a un diseño óptimo. El método de la minimización de la generación de la entropía combina los principios de transferencia de calor, de mecánica de los fluidos y de termodinámica y fue utilizado en la optimización de equipos irreversibles verdaderos [57].

Una aplicación del EGM a los intercambiadores de calor de contracorriente fue hecho por [58]. Proporcionó un método de diseño de intercambiadores de calor usando el número de unidades de la generación de entropía. Este método fue aplicado

a un intercambiador de calor regenerador de tubo y coraza para obtener el área mínima de transferencia de calor cuando se fija la cantidad de unidades.

En otro artículo de este propio autor [59] se estudia el método de EGM en la convección forzada para cuatro configuraciones de flujo. Los resultados indicaron que características del flujo actuaban como concentradores de la generación de la entropía. En conclusión el autor afirmó ó que la minimización debe ser encontrada partiendo de las características más elementales del diseño.

La geometría de las aletas fue optimizada por [60]. Después de que la fórmula general fuera derivada usando el método de EGM y los métodos analíticos, fueron desarrollados resultados gráficos que dieron lugar a la selección óptima de las dimensiones de varias diversas configuraciones de la aleta.

El EGM fue aplicado a un intercambiador de calor de contracorriente por [61]. Estos autores desarrollaron una expresión general de la generación de la entropía. Con esta expresión general varios diseños óptimos pueden ser desarrollados.

El método de EGM también fue utilizado para estimar la calidad del proceso del intercambio de calor por [62]. La expresión resultante de la calidad fue aplicada a un intercambiador de calor líquido-líquido para diversos arreglos del flujo. Se despreció la fricción del fluido en este método y los resultados demostraron que la contracorriente era mejor que el flujo paralelo.

Un artículo de [63] combinó métodos numéricos con EGM mediante la combinación de la predicción de la tasa de generación de entropía local con la dinámica computacional de los fluidos (CFD). Los resultados obtenidos fueron aplicados a la transferencia de calor por convección asociada a un chorro de fluido lanzado a una pared calentada.

Un método comparativo para los varios métodos de transferencia de calor utilizados en sistemas de potencia de entrada constante fue introducido por [64] y su investigación fue basada en EGM. Para seleccionar el sistema más eficiente se compararon los cocientes de la distribución de la irreversibilidad para varias configuraciones a una carga dada de transferencia de calor. Este criterio fue aplicado solamente a las aletas. De los resultados se pudo establecer que geometría de la aleta transferiría el calor disipado con una menor potencia de bombeo. El método de EGM se puede aplicar a muchas configuraciones de intercambiadores de calor.

Varios investigadores han utilizado el método de EGM y le han hecho aportes.

En un artículo [65] adaptaron la teoría original de EGM y crearon la termo economía basada en la segunda ley de la termodinámica, la cual incorporó el factor económico. En el método original de EGM los diversos parámetros de la generación de la entropía (para la presión y la transferencia de calor) tenían valores monetarios iguales. Un valor económico basado en costes de capital anuales era estimado y aplicado al valor de la entropía generada. Esto proporcionó un método para establecer un compromiso entre el coste de la generación de la entropía en un intercambiador de calor y los gastos en inversión de capital.

De acuerdo con [66] en otra aplicación de la Termo Economía combina el análisis de la segunda ley con el coste de la propiedad y el uso del intercambiador de calor. El método presentado en este artículo se puede aplicar a cualquier intercambiador de calor para el que se sepan las relaciones  $\epsilon$ -NTU-R (eficacia-número de unidades de transferencia – relación de tasa de capacidad de calor). Para encontrar el coste apropiado de la irreversibilidad, el mismo fue incluido en un parámetro adimensional que representa el cociente de los costes anuales fijos de propiedad a los gastos de explotación anuales. Un diseñador podría estimar los costes de la irreversibilidad para el sistema en particular.

En conclusión el método de la Minimización de la Generación de la entropía es un método establecido de optimización que se utiliza en varias aplicaciones de Transferencia de Calor. Combina los campos de la termodinámica, de la transferencia de calor y de la mecánica de los fluidos. El método puede optimizar sistemas reales y se puede adaptar a cualquier aplicación específica.

Uno de los pocos artículos encontrados de simulación numérica aplicados a los intercambiadores de calor es el de [67]. En el mismo los autores realizan una simulación numérica 3D de un intercambiador de calor con baffles helicoidales usando los Software comerciales del GAMBIT 2.3 y de FLUENT 6.3. Primeramente se presenta detalladamente el modelo y el método numérico de cómputo del intercambiador de calor, y posteriormente se emplea el modo del cómputo en paralelo para lograr la simulación del intercambiador de calor entero con seis ciclos de baffles helicoidales de ángulo de 40° en una malla de 13.5 millones de elementos; en segundo lugar, se valida el modelo de cómputo comparando la caída de presión total y el promedio del número de Nusselt del intercambiador de calor entero con datos experimentales.

Se obtiene buena concordancia entre los resultados teóricos y experimentales y se analizan las razones que causan a la discrepancia. Se presentan los campos de presión y de temperatura del fluido en el lado de la coraza.

Estos propios autores realizaron un segundo artículo basados en los resultados del trabajo anterior donde basados en

un modelo periódico simplificado [68] llevaron a cabo la simulación en 3D para tres ángulos de hélice diferentes de los baffles. Usaron el mismo software comercial que en caso anterior. Encontraron que el mayor coeficiente de transferencia de calor por unidad de caída de presión se alcanzaba para el ángulo de 40°, lo que está de acuerdo con la literatura especializada. El ángulo promedio de intersección previsto en este caso es el más pequeño, siendo consistente con el principio del campo sinérgico. El funcionamiento del modelo periódico con baffles helicoidales continuos es también comparado con baffles no continuos. Se demuestra que el coeficiente de transferencia de calor por unidad de caída de presión de los baffles no continuos es apreciablemente más grande que el de los baffles helicoidales continuos, indicando que el intercambiador de calor con baffles helicoidales no continuos tiene su ventaja con respecto al continuo.

Lo anterior hace notar, que la optimización de intercambiadores de calor es un proceso continuo que no se ha detenido, gracias a los adelantos en las herramientas computacionales [69].

De acuerdo con [70] señalan que en el Heat Exchanger Design Handbook se presenta un procedimiento general para el diseño de intercambiadores de calor, pero que en dicha obra no se precisa el criterio para determinar el espaciamiento entre baffles. En su artículo los autores desarrollan y utilizan un programa de computación para calcular el espaciamiento óptimo entre baffles para todos los tipos de intercambiadores de calor de tubo y coraza usando el procedimiento establecido en el referido handbook, lo que los autores consideran que es una complementación del manual.

Otro de los trabajos de Babu es el denominado “Automated Design of Heat Exchangers Using Artificial Intelligence Based Optimization” [71]. En el mismo el autor señala que los intercambiadores de calor son muy importantes en cualquier proceso industrial y que su diseño óptimo es de crucial importancia en términos de comportamiento y de economía. Plantean que debido a que existen numerosas variables de diseño y diferentes alternativas para cada variable, se puede considerar que la optimización de los intercambiadores de calor de tubo y coraza poseen un problema de optimización discreta a gran escala. Señala además que los Algoritmos Genéticos es una técnica de optimización no convencional que sobresale sobre otras técnicas convencionales y que debido a eso se usó en su trabajo. Los autores lograron aplicar los Algoritmos genéticos al diseño óptimo de intercambiadores de calor para minimizar el área de transferencia de calor.

A [72] presentan un algoritmo de área mínima de redes de intercambio de calor, que considera como variables de diseño a las caídas de presión permisibles de las corrientes en vez de valores supuestos de los coeficientes de transferencia de calor de película. Para una  $\Delta T$  dada, el área mínima se obtiene mediante la resolución secuencial iterativa del modelo de transferencia de



calor vertical y de las relaciones de caídas de presión de las corrientes basadas en el método Kern. Este procedimiento involucra la actualización sucesiva de los coeficientes de las corrientes hasta que el objetivo de área converge. El algoritmo propuesto proporciona el balance correcto del binomio inversión – consumo de energía, en virtud de que toma en cuenta las caídas de presión permisibles de las corrientes de una forma similar a la que se usa en la etapa del diseño detallado de los intercambiadores de calor de las redes.

De acuerdo con [73] del Instituto de Química de La Universidad estadual de Rio de Janeiro desarrollaron un estudio sobre intercambiadores de calor de tubo y coraza con cambio de fase. El trabajo está encaminado AL uso de estos equipos en refinerías de petróleo. Como aspecto novedoso del trabajo se presenta un algoritmo para realizar el cálculo de estos equipos usando el método de la temperatura media logarítmica. Como resultado de las corridas realizadas se presentan los parámetros básicos de comportamiento de estos equipos.

A [74] en su trabajo “Modelagem de trocadores de calor casco e tubos”, señalan que a pesar de la gran aplicabilidad de los intercambiadores de calor de tubo y coraza, su diseño no presenta de acuerdo a los fluidos, a las condiciones de trabajo y a los métodos empleados la precisión deseada. Usando el simulador EMSO (Environment for Modeling, Simulation and Optimization) para el análisis de intercambiadores, el trabajo desarrolla procedimientos de cálculo para los parámetros de diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubo y coraza con una precisión adecuada sin excesivo tiempo ni dificultad de ejecución, lo que facilita la optimización de los diseños. Los modelos creados fueron incorporados a la biblioteca de modelos del simulador EMSO de acuerdo a la designación de las normas TEMA. Para determinar los parámetros en el lado de la coraza se usó el Método de Bell-Delaware.

De acuerdo con [75] desarrollaron experimentos para determinar la respuesta de la caída de presión y de la transferencia de calor local en el lado de la coraza en un intercambiador de tubo y coraza. Se demostró que la fuga entre los baffles y la concha pueden reducir grandemente la caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor pre compartimentado.

Por su parte [76] también desarrollaron experimentos para investigar las fugas en intercambiadores de calor de tubo y coraza con baffles segmentados. En el trabajo investigan el comportamiento de este tipo de intercambiadores teniendo en cuenta cinco variables: dirección de la corriente de flujo, tasa de flujo en el lado de la coraza, tasa de flujo en el lado de los tubos, holgura entre los baffles y la coraza y distancia entre los baffles. Se aplicó un modelo de dispersión axial para predecir adecuadamente el comportamiento térmico real en el intercambiador. Se determinó que la dispersión del número de Peclet depende solamente de la holgura entre los baffles y la

coraza y de la distancia entre baffles, mientras que se pueden usar en todos los casos las mismas correlaciones de transferencia de calor.

El indú [77], señala que para hacer un buen software para el diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza, se necesita entender la clasificación de estos equipos, sus componentes, la disposición de los baffles y de los tubos, la caída de presión y la diferencia media de temperaturas. En su artículo explica los fundamentos del diseño térmico de estos intercambiadores, desarrollando aspectos tales como: componentes del intercambiador, clasificación de según la construcción y según el servicio; datos necesarios para el diseño térmico; diseño del lado del tubo; diseño del lado de la coraza, incluyendo la disposición de los tubos y de los baffles, la caída de presión en el lado de la coraza; y la diferencia de temperatura media. Las ecuaciones básicas para la transferencia de calor del lado del tubo y de la coraza y la caída de presión son bien conocidas; en su artículo el autor se centra en el uso de estas correlaciones para el diseño óptimo de intercambiadores de calor. Uno de los aspectos más importantes en el diseño de los intercambiadores de calor de tubo y coraza es el cálculo del coste de los mismos. Dentro de los múltiples trabajos revisados, uno de los más completos en este sentido es el desarrollado por [78].

En el mismo se hace un análisis pormenorizado de todos y cada uno de los aspectos que intervienen en el coste de un intercambiador de calor de tubo y coraza. La principal deficiencia de este trabajo es que casi todos los cálculos se basan en relaciones empíricas y en nomogramas. [79] de la Universidad de Michigan señalan que la optimización termodinámica de los intercambiadores de calor a través de la minimización de la generación de entropía es un método útil en determinar el diseño más eficiente para unas restricciones termodinámicas dadas. Señalan que el diseño más eficiente termodinámicamente puede no ser el más deseable, ya que la producción del diseño más eficiente termodinámicamente puede ser no costeable desde el punto de vista económico y que por tanto deben ser tenidos en cuenta todos los costos. Se argumenta que la eficiencia termodinámica tiene un importante papel en las consideraciones económicas. En su estudio optimizan el intercambiador con dos funciones objetivos por separado: la minimización de la generación de entropía y la minimización del costo. Posteriormente comparan los dos diseños óptimos y realizan una solución de compromiso.

Un software para el diseño térmico e hidráulico de intercambiadores de calor de tubo y coraza fue desarrollado por [80]. EL Software se desarrolló en un ambiente de programación basado en el ambiente de Delphi para Windows. Su formato de uso fácil para los datos de entrada y las características de los gráficos con excelentes colores le hacen una herramienta excelente para la enseñanza, el aprendizaje y el diseño preliminar de intercambiadores de calor de tubo y coraza. La metodología

de diseño se basa en el método de Bell Delaware de la literatura clásica.

Una mejor definición de la eficiencia térmica de los intercambiadores de calor basada en la segunda ley de la termodinámica es proporcionada por [81]. Se demuestra que correspondiendo con cada intercambiador de calor real, hay un intercambiador de calor ideal que es un intercambiador de calor equilibrado de flujo contracorriente. El intercambiador de calor ideal tiene el mismo valor de UA, la misma diferencia de la temperatura media aritmética, y la misma relación de fluido frío al caliente en la entrada. Las tasas de capacidad de calor del intercambiador ideal son iguales a las tasas de calor mínima del intercambiador real. El intercambiador de calor ideal transfiere la máxima cantidad de calor, igual al producto UA y la diferencia de temperatura media aritmética, y genera la cantidad mínima de entropía, haciendo al intercambiador más eficiente y menos irreversible. La eficiencia del intercambiador de calor se define como la relación entre el calor transferido en el intercambiador de calor real y el calor que sería transferido en el intercambiador de calor ideal. El concepto de eficiencia del intercambiador de calor proporciona una nueva vía para el diseño y el análisis de los intercambiadores de calor y de redes de intercambiadores de calor.

A [82] desarrollaron un modelo para evaluar la caída de presión en el lado de la coraza. Este modelo incorpora la caída de presión en las boquillas de entrada y salida del fluido con las pérdidas en los segmentos creados por los baffles. Los resultados del modelo concuerdan muy bien con los resultados disponibles en la literatura para números de Reynolds entre 105 y 103 y de una manera más precisa si se comparan con otros modelos analíticos desarrollados por otros investigadores para diferentes configuraciones de intercambiadores de calor.

Un intento para mejorar el comportamiento y la simplicidad de fabricación de los intercambiadores de calor de tubo y coraza con baffles helicoidales continuos y múltiples pasadas por el tubo y la coraza (CMSP-STHX) fue realizado por [83].

Se compara este tipo de intercambiadores con los intercambiadores de calor convencionales con baffles segmentados (SG-STHX). Para realizar la comparación usaron métodos de la Dinámica Computacional de los Fluidos (CFD). Los resultados numéricos muestran que para el mismo flujo másico M y la misma tasa de transferencia de calor total  $Q_m$ , la caída de presión promedio  $\Delta p_m$  del intercambiador CMSP-STHX es menor que en el intercambiador convencional SG-STHX como promedio en un 13%. Bajo la misma caída de presión total  $\Delta p_m$  en el lado de la coraza, la tasa de transferencia de calor total  $Q_m$  del intercambiador CMSP-STHX es mayor en un 5,6 % con respecto a la del intercambiador SG-STHX y la tasa de flujo másico en el intercambiador CMSP-STHX es un 6,6 % superior que en el intercambiador SG-STHX. Finalmente los autores concluyen que los intercambiadores CMSP-STHX pueden ser usados para reemplazar los intercambiadores SG-STHX en

aplicaciones industriales para ahorrar energía, reducir costes y prolongar la vida de servicio.

Otro de los trabajos relacionados con la simulación numérica fue realizado por [84]. En el mismo los autores realizan simulaciones numéricas para investigar el aumento de la transferencia de calor mediante el incremento de la turbulencia en tubos rellenos con un medio poroso. Usan simulaciones numéricas en dos dimensiones a través del modelo turbulento  $k - \epsilon$  para calcular las características de flujo y de transferencia de calor. Los parámetros estudiados fueron el número de Reynolds ( $Re = 500 - 15000$ ), el número de Darcy ( $Da = 10^{-1}$  a  $10^{-6}$ ) y una relación de porosidad  $e = 0,0 - 1,0$ . Los resultados numéricos muestran que el campo de flujo puede ser ajustado y el espesor de la capa límite puede ser disminuido mediante la inserción de un medio poroso de tal manera que se pueda aumentar la transferencia de calor en los tubos. Las distribuciones locales del número de Nusselt a lo largo de la dirección del flujo se incrementan con el incremento del número de Reynolds y el espesor de la capa porosa, pero se incrementa con la disminución del número de Darcy. Para una relación de porosidad menor de 0,6, el efecto del número de Darcy en la caída de presión no es tan significativo. La relación óptima de porosidad está alrededor de 0,8, lo que puede aumentar la transferencia de calor en los intercambiadores.

Uno de los pocos software utilizados para la optimización de intercambiadores de calor de tubo y coraza es el OSTHEX, Versión 1.0 desarrollado en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo [85]. Realmente es un software sencillo de usar escrito en C++ en ambiente de Windows. No obstante lo único que optimiza son los costos. El método de cálculo utilizado para el diseño del intercambiador es el de Bell-Delaware

En el trabajo “Optimization of high-pressure shell-and-tube heat exchanger for syngas cooling in an IGCC” [86] se investiga las características del campo de flujo y de la transferencia de calor de un Intercambiador de calor de tubo y coraza para el enfriamiento de un gas sintetizado en una planta de potencia de un ciclo integrado combinado de gasificación de carbón (IGCC). Se aplica el método de los volúmenes finitos usando el FLUENT. Se adoptó el modelo RNG  $k - \epsilon$  para modelar el flujo turbulento. La tasa de porosidad, la distribución de la resistencia y la distribución de la fuente de calor se introdujeron en el FLUENT a través de funciones definidas a tal efecto. Se estudiaron la caída de presión, la distribución de temperaturas y la variación de la transferencia de calor local bajo los efectos del componente del gas sintetizado y la presión de operación, así como de la disposición de los baffles. Los resultados muestran una mayor presión de operación puede mejorar la transferencia de calor, sin embargo acarrea una mayor caída de presión. Los componentes del gas sintetizado afectan significativamente la caída de presión y la transferencia de calor. La disposición de los baffles influye en el flujo del fluido.

De acuerdo con [87] del Instituto de Ingeniería en Energía en la Universidad Técnica de Berlín para entender la relación entre los costes de capital y el índice del coste de destrucción de la exergía en los intercambiadores de calor explora estos aspectos en una central eléctrica de ciclo combinado (CCPP), a través del diseño óptimo económico de un intercambiador de calor considerado como solo componente. Desarrolla expresiones para índices de tiempo de beneficio usando ganancias específicas de exergía y costos.

Estas expresiones son adimensionales y se usan sus derivadas para encontrar la eficacia óptima de los intercambiadores de calor. Este óptimo demuestra ser una función de varios grupos adimensionales. Tres de las variables contenidas dentro de estos grupos son tanto las temperaturas de entrada de la corriente como la temperatura de referencia. Los resultados de la optimización numérica de los intercambiadores de calor confirman la validez de los grupos adimensionales.

Dentro del empleo de los métodos numéricos está también el trabajo “Performance evaluation of crossflow compact heat exchangers using finite elements” [88]. En el mismo se realiza un análisis de un intercambiador de calor compacto de flujo cruzado usando el método de los elementos finitos. Los resultados obtenidos concuerdan con las soluciones analíticas disponibles en la literatura para casos con coeficientes de transferencia de calor constante. Los autores extienden el análisis a casos con coeficientes de transferencia de calor variables. Se calcula además la caída de presión para todos los casos.

Otra técnica empleada en la evaluación de Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza ha sido la Técnica de Modelado Electro Químico de Transferencia de masa [89]. Mediante esta técnica en Inglaterra se determinaron en el año 1976 los coeficientes de transferencia de calor local en el lado de la coraza en un modelo de intercambiador con baffles. La exactitud y validez del método se demostró comparando los resultados obtenidos por otros métodos.

Un modelo usando la Dinámica de los Fluidos Computacional (CFD) se desarrolló para simular y analizar térmica e hidráulicamente en el lado de la coraza una caldera recalentadora [90]. Se usaron dos modelos diferentes de flujo de dos fases, un modelo mezclado y dos modelos de fluidos. Los resultados obtenidos que mejor concuerdan con los datos experimentales son los obtenidos con el modelo de dos fluidos.

El análisis térmico de un intercambiador con flujo dividido con un número arbitrario de pasadas por el lado del tubo fue realizado por [91]. Se obtuvieron las correspondientes ecuaciones de temperatura y por medio de las mismas se calcularon la efectividad térmica, el factor de corrección de la diferencia de temperatura media y la temperatura en una localización de la superficie del intercambiador. También se

analiza en el artículo la localización óptima de la entrada del flujo en la coraza y la influencia de la división del flujo en el lado de la coraza sobre las pérdidas de presión.

En el número 29 de la Revista Applied Thermal Engineering del año 2009 [92] aparece un artículo muy similar de Ponce et al al publicado en la revista Chemical Engineering. En el mismo se presenta una metodología basada en los Algoritmos Genéticos para el diseño óptimo de intercambiadores de calor de tubo y coraza. Utiliza el método de Bell-Delaware sin simplificaciones para la descripción del flujo por el lado de la coraza.

El procedimiento de optimización contempla la selección de la selección de los parámetros geométricos principales tales como el número de pasadas por el tubo, tipo de cabezal, los diámetros internos y externos estándares de los tubos, disposición y paso entre los tubos, localización del fluido frío y del fluido caliente, número de sellos, espaciado entre baffles y caída de presión en el lado del tubo y de la coraza. La metodología toma en cuenta las restricciones geométricas y operacionales recomendadas por las normas y códigos de diseño. Los ejemplos analizados muestran que los Algoritmos Genéticos proveen una valiosa herramienta para el diseño óptimo de intercambiadores de calor.

Sin lugar a dudas la minimización de la entropía como una herramienta para la modelación de los intercambiadores de calor es muy utilizada en la actualidad. [93] de la Universidad de Maryland realizaron un trabajo donde señalan que un Intercambiador de calor se caracteriza por lo general por dos tipos de pérdidas termodinámicas. La primera de esas dos pérdidas está asociada con la transferencia de calor a través de una diferencia de temperaturas finita y la segunda es debido a la caída de presión a causa de la fricción en el intercambiador

La pérdida asociada a la transferencia de calor a través de una diferencia finita de la temperatura puede ser atenuada aumentando el área de transferencia y reduciendo la diferencia de la temperatura local. Sin embargo, el aumento del área de transferencia puede llevar a una mayor pérdida friccional total y a una caída de presión más alta.

Esto demuestra que las dos pérdidas están mutuamente en conflicto, que apunta a la existencia de un diseño “óptimo” del intercambiador de calor donde se reducen al mínimo estas dos pérdidas. Las dos pérdidas se pueden cuantificar por un único número que es la entropía total generada en el intercambiador de calor. La generación total de la entropía debe ser reducida al mínimo para llegar un diseño óptimo del intercambiador de calor. [94] de Malasia combinan el análisis exergético y la tecnología Pinch para el mejoramiento de procesos químicos en general y para el caso particular de los intercambiadores de calor. Hacen una comparación entre estas dos tecnologías y destacan los beneficios que pueden tener la combinación de las mismas.

A [95] realizan un programa en Autolisp que provee dibujos de la disposición de los tubos de acuerdo a los estándares y no estándares en un ambiente de AutoCAD. El programa calcula el número óptimo de tubos, pero no pasa de ser una simple ayuda al dibujo.

De acuerdo con [96] de Brasil realizan la simulación de un intercambiador de calor de tubo y coraza como el componente principal (adsorbente) de una unidad central de aire acondicionado de 20 kilovatios, que funciona principalmente con energía solar, con un calor complementario proporcionado por gas. El sistema propuesto se compone básicamente de un tanque de almacenaje de agua fría producida por un refrigerador de adsorción de carbón activado -metanol, un tanque de almacenaje de agua caliente y un intercambiador de calor entre el agua fría y el aire que se va a acondicionar. Las influencias de varios parámetros operacionales de diseño importantes sobre el funcionamiento del sistema también se estudian.

#### V.OPTIMIZACION MULTICRITERIAL DE LOS ICs

Las formulaciones con varios objetivos son modelos reales para muchos problemas complejos de la optimización en ingeniería. En muchos problemas de la vida real, los objetivos que se analizan entran en conflictos unos con otros, y optimizando una solución particular con respecto a un solo objetivo puede dar lugar a resultados inaceptables con respecto a los otros objetivos. Una solución razonable a un problema con varios objetivos es investigar un grupo de soluciones, las cuales satisfacen los objetivos en un nivel aceptable sin ser dominados por cualquier otra solución [97].

La necesidad de seleccionar múltiples variables, tanto de diseño como de operación de los ICs buscando una función objetivo con vistas a la minimización de su costo total conduce a la optimización multicriterial de estos equipos. [98] *destacan el hecho de que* ningún método de optimización puede solucionar todos los problemas de los intercambiadores de calor, lo cual hace necesaria metodologías más completas donde pudieran lograrse resultados abarcando más de un solo criterio.

Este aspecto también es destacado por [99] en el trabajo *Optimal design of shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms*. En el trabajo los autores insisten en el uso el uso de “algoritmos genéticos” para el diseño óptimo de Intercambiadores de tubo y coraza. El estudio utiliza el método de Bell-Delaware para la modelación del flujo lado coraza sin simplificaciones. El procedimiento de la optimización implica la selección de los parámetros geométricos principales tales como el número de pases en los tubos, los diámetros internos y externos estandarizados de los tubos, disposición de los tubos y distancias entre centros entre tubos adyacentes (tube pitch), tipo de cabezal (head), asignación de los fluidos en tubos y coraza, número de fajas de sello (sealing strips), espaciamento del baffle de entrada y de salida, caídas de presión en la coraza y en los tubos. La metodología tiene en cuenta algunas restricciones

geométricas y de operación recomendadas típicamente por códigos del diseño. Los ejemplos analizados muestran que los algoritmos genéticos proporcionan una herramienta valiosa para el diseño óptimo de cambiadores de calor. En el análisis hay una carencia de elementos mecánicos estructurales.

De acuerdo con [100] también han trabajado la optimización de intercambiadores de calor usando métodos de la inteligencia artificial. No obstante su trabajo está enmarcado a los intercambiadores de calor, de tipo compacto de placas aleteados (CHE). En este artículo, los autores desarrollan un estudio para la optimización de dichos intercambiadores. El método de optimización utilizado es el llamado algoritmo genético (GA) teniendo la función de buscar, combinar y optimizar los tamaños de la estructura del CHE. El volumen total mínimo y/o el costo anual total del CHE se toman como funciones objetivas para el GA. Las geometrías de las aletas permanecen fijas mientras que se varían tres parámetros de forma para los objetivos de la optimización con o sin la caída de presión como restricción, respectivamente. El funcionamiento del CHE se evalúa según las condiciones de los tamaños de la estructura que el GA ha generado, y se calculan el volumen y el costo correspondientes. El estudio muestra que, teniendo como restricción a la caída de presión en el CHE optimizado arroja como resultado, un volumen más bajo del cerca de 30% o un costo anual más bajo de alrededor del 15%; mientras que sin esta restricción, el CHE optimizado proporciona un volumen más bajo del cerca de 49% o un costo anual más bajo de alrededor del 16% de los casos analizados en la literatura. El trabajo resulta muy interesante por la disminución de costos y volúmenes con o sin restricción pero, carece de un enfoque mecánico estructural ya que no hace referencia a propiedades mecánicas con las cuales se garantice la operación adecuada del equipo.

A [101] señalan que uno de los criterios para calificar el funcionamiento de equipos de intercambio de calor es el conocido como generación de entropía, el cual se ha utilizado en el diseño de los intercambiadores de calor de tubo y coraza. En este trabajo, los autores desarrollan una nueva propuesta de optimización del diseño de estos equipos, al relacionar el factor adimensional de generación de entropía, la generación de entropía como tal, la tasa de transferencia de calor y la temperatura de entrada del fluido frío, logrando con lo anterior una función objetivo. Además son tomados como variables de diseño algunos parámetros geométricos y es utilizado el algoritmo genético para resolver el problema asociado de optimización. Los autores destacan que al utilizar su método, se eleva la efectividad del equipo significativamente y al mismo tiempo, se logra una disminución dramática en el requerimiento de potencia en el bombeo. Además, se recalca el hecho de que si se tiene un área de transferencia fija, el beneficio de incrementar la efectividad del intercambiador, es mucho mayor que el incremento en el costo de bombeo. No obstante, en el trabajo no se analiza algún parámetro de resistencia mecánica del equipo,

siendo éste de vital importancia al momento realizar la construcción del mismo.

De acuerdo con [102] en el trabajo Optimal design of shell-and-tube heat exchangers desarrollan un nuevo método para el diseño óptimo de este tipo de intercambiadores, pero enfocado solamente a intercambiadores de tubo y coraza con baffles. Desarrollan además un programa de computación denominado HEATDESIGN, pero enfocan la optimización solamente teniendo en cuenta aspectos térmicos sobre la base de la estimación de la caída de presión óptima considerando los costos mínimos.

De acuerdo con [103] desarrollan un trabajo experimental para determinar el coeficiente de transferencia de calor y de caída de presión lado coraza para un intercambiador de calor de tubo y coraza con tres diferentes haces de tubos. Debido a la naturaleza de los fluidos presentes en los intercambiadores de calor de tubo y coraza, se hace necesaria la utilización de diferentes tipos de tubos. Lo anterior es con el objeto de aumentar el área de transferencia sin aumentar en demasía el volumen de la misma. En este artículo, los autores se enfocan en el estudio del coeficiente de transferencia de calor y la caída de presión en el fluido alojado en el lado de la coraza, utilizando experimentalmente tres diferentes tipos de superficie de tubos de cobre (liso, corrugado y con micro-aletas). Además, los datos experimentales se comparan con datos teóricos disponibles. El trabajo analiza los efectos que tiene el uso de diferentes superficies de tubo sobre el rendimiento, pero no menciona los efectos mecánicos estructurales que se pudieran tener al utilizar cada variante de tubo.

A [104] ofrecen una Metodología de optimización de intercambiadores de calor de tubos con superficies aleteadas. Estos autores plantean que debido a la naturaleza antagonista de transferencia de calor y caída de presión, presente en los intercambiadores de calor, siempre debe ser tomado en cuenta este aspecto al momento de optimizar un diseño de estos equipos. En este trabajo, los autores toman para su análisis un condensador de tubos aleteados usado en sistemas residenciales de aire acondicionado.

De acuerdo con [105] sugieren un método general para el diseño óptimo de un cambiador de calor de placas (PHE) con las superficies onduladas que cumpla con los principios de sostenibilidad. Se utiliza un código previamente validado por CFD para predecir la cantidad de calor a transferir, así como la caída de presión en este tipo de equipo. El modelo computacional es un canal estrecho tridimensional teniendo como variables de diseño al coeficiente del bloqueo, relación de aspecto del canal, relación de aspecto de la corrugación, ángulo de ataque y número de Reynolds propias de este tipo. Los resultados concuerdan bastante bien con datos publicados. Finalmente, las especificaciones del diseño óptimo se sugieren para una gama de números de Reynolds y dos valores del factor de ponderación.

Como se observa, el trabajo se apoya en resultados obtenidos por el uso del CFD, lo cual da lugar al empleo de este tipo de software para robustecer las metodologías de optimización. Por otra parte es uno de los pocos trabajos encontrados que habla de los principios de sostenibilidad.

A [106] plantean que los métodos tradicionales para el diseño de intercambiadores de calor ya apuntaban hacia la optimización desde el punto de vista económico; de ahí que los autores hayan propuesto un nuevo método para diseñar estos equipos basados en estudios realizados por Kays y London. No obstante, el trabajo sólo aborda parámetros energéticos pero no mecánicos estructurales, siendo además el criterio de optimización puramente económico.

De acuerdo con [107] muestran un nuevo método de optimización para un recuperador de superficie primaria (PSR) desde el punto de vista del rendimiento (performance) en la transferencia de calor, peso del equipo y pérdida de presión. Se discuten los factores de relevancia en la estructura del PSR, la transferencia de calor y flujos involucrados para determinar las variables independientes de diseño. Fue establecido un modelo de optimización multi-objetivo para el diseño de estos equipos y las expresiones específicas para cada objetivo fueron deducidas. El resultado del ejemplo tomado para la optimización muestra que los factores subjetivos pueden ser evitados al elegir ciertos tamaños geométricos de hojas acanaladas. Los autores enfatizan la importancia de la metodología expuesta al obtener un beneficio económico alto, al mismo tiempo que se logra un mejor funcionamiento del sistema donde está insertado el intercambiador. Por lo anterior, se visualiza el gran potencial de desarrollar una herramienta de optimización de carácter multicriterial teniendo en cuenta también, aspectos de parámetros de diseño mecánico para lograr una metodología más completa.

De acuerdo con [108] analizan los efectos del ángulo de inclinación de los baffles en la transferencia de flujo y de calor de un intercambiador de calor con baffles helicoidales. Señalan que diversos autores han enfatizado el uso de herramientas computacionales de simulación numérica, como una vía alterna para el estudio de intercambiadores de calor. Los resultados de la simulación muestran que los baffles helicoidales continuos pueden reducir o aún eliminar regiones con pocas posibilidades de transferencia de calor por parte del fluido contenido en la coraza, al variar el ángulo de inclinación de dichos baffles. Además se resalta la variación de la caída de presión de una forma acentuada al variar el ángulo mencionado. También se menciona que haciendo una comparación con equipos de baffles segmentarios y equipos con los baffles helicoidales continuos, estos últimos tienen coeficientes de transferencia de calor más altos para una misma caída de presión. Los autores sugieren una investigación más profunda para este tipo de intercambiadores pero no menciona una extensión del estudio para parámetros de índole mecánico estructural.

Segundo [109] en uno de los trabajos más recientes encontrados en la literatura revisada señalan que debido al desarrollo de la nanotecnología, se hace necesaria la investigación en equipos de transferencia incorporados en dicho ambiente. Los autores analizan soluciones como  $Al_2O_3$ /agua y  $TiO_2$ / agua y su repercusión en el funcionamiento de intercambiadores de calor de tubo y coraza, bajo el régimen de flujo turbulento tomando en cuenta la concentración de nanopartículas suspendidas. Sin embargo, los autores no mencionan algunos aspectos de diseño mecánico que pudiera complementar el trabajo en el ambiente de nanoequipos.

A [110] mencionan que la eficacia de los sistemas criogénicos dependen en gran medida de del buen funcionamiento los intercambiadores de calor utilizados. Como es sabido, la transferencia de calor y la caída de presión de estos equipos, son factores de vital importancia. Enfatizan el hecho de que una mejora considerable en el funcionamiento del intercambiador se logra al elegir una configuración geométrica apropiada para un para una transferencia de calor dada. En el trabajo se aborda un aspecto de construcción del equipo, al tomar en cuenta los ciertos espacios necesarios para realizar dicha tarea; de ahí que, configuraciones optimizadas hayan sido encontradas. Los resultados muestran la posibilidad de variar el funcionamiento térmico y de la caída de presión, así como variar las dimensiones de los espacios en estudio. No obstante, los autores no abordan otros posibles parámetros de construcción los cuales son necesarios para garantizar la resistencia mecánica del equipo.

De acuerdo con [111] toman como herramienta principal, la utilización de redes neuronales artificiales (ANN) para el análisis de la transferencia de calor en intercambiadores de tubo y coraza con baffles segmentarios o baffles helicoidales continuos. Tres intercambiadores de calor fueron investigados experimentalmente. Los autores recomiendan el uso de las redes neurales artificiales para predecir el comportamiento de sistemas térmicos en usos de la ingeniería, tales como modelado de los intercambiadores de calor para estudiar su comportamiento.

Segundo [112] en su tesis de maestría titulada Heat Exchanger Optimization desarrolla un código computacional para el análisis de los intercambiadores de calor enfriados por aire siendo acoplado con otro código de una función a minimizar restringida, para dar origen a un programa de optimización. Esta tesis en realidad aporta muy poco a la optimización de intercambiadores de calor.

A [113] analizan la configuración y los parámetros de funcionamiento óptimos de un intercambiador de calor en un sistema geotérmico de la calefacción urbana. Presentan un algoritmo de optimización para que el obligado problema no lineal maximice el beneficio neto anual para un sistema de intercambiadores de calor de contracorriente. Varios parámetros que afectan al beneficio neto se examinan, incluyendo los flujos

totales del área de los fluidos operantes y del traspaso térmico, ya que ambos directamente afectan a las temperaturas salientes. El funcionamiento del cambiador de calor y las economías de combustible reduciendo el consumo de combustible para generar calor se modelan dentro de la formulación del problema. También, la entrada de potencia a la bomba para la circulación fluida es incluida. Formulando estos parámetros múltiples sobre una amplia gama de condiciones del diseño, el algoritmo presenta una nueva herramienta de diseño útil para la mejora de las redes de intercambiadores de calor en sistemas geotérmicos.

Segundo [5] y [11] son, respectivamente, un libro y una publicación sobre selección, valoración y diseño térmico de intercambiadores de calor donde aparece una estructura lógica-básica del procedimiento de diseño para un intercambiador de calor en aplicaciones de procesos, Figura 2, Esta estructura es una tentativa de flujograma donde aparece una secuencia lógica para el procedimiento del diseño de un intercambiador de calor, partiendo de la identificación del problema y después va a una selección del intercambiador básico, pasando posteriormente a un conjunto de elementos de cálculo que pueden efectuarse tanto manualmente como asistido por una computadora donde se encuentra la selección de un conjunto de parámetros tentativos del diseño del intercambiador y una valoración de ese diseño, considerando tanto al funcionamiento térmico como la caída de presión, llegando a una valoración de la evaluación del diseño: si no se acepta, se modifican los parámetros del diseño y se vuelven a valorar; si se acepta, se pasa finalmente al diseño mecánico y al cálculo de costos. Esta estructura podría desarrollarse de manera que las variables de decisión de una función objetivo del costo total pudieran formar parte del conjunto de parámetros tentativos del diseño óptimo o mejorado del intercambiador. En esta figura el diseño mecánico es un apéndice en lugar de formar parte del proceso de optimización.

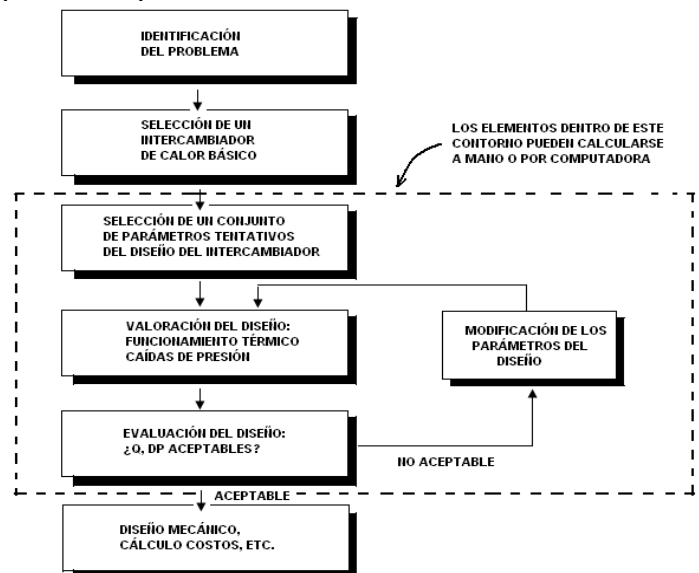


Figura 2. Estructura lógica-básica del procedimiento de diseño para un intercambiador de calor de procesos. Fuente: [11].



Esta metodología quedaría más completa si se le añade un módulo de optimización iterativa, de la cual pudieran obtener valores óptimos o mejorados de parámetros de diseño y operación que intervienen en cálculo de los equipos en estudio. Otras metodologías, más completas, para la optimización de un intercambiador de calor aparecen en [9][10].

A través de esta metodología es considerada cada posible geometría de la superficie y tipo de construcción como una alternativa; así lo indica el bloque superior izquierdo en el recuadro denominado Formulación del Problema. Para comparar, legítimamente, esas alternativas, cada diseño debe ser optimizado para una aplicación dada. De esta manera, pueden surgir varias soluciones perfeccionadas independientes que satisfagan los requisitos del problema. Luego, se hace un análisis de ingeniería, una comparación de los valores de la función objetivo y concluye con una selección de la solución óptima final para su implementación. Su problema fundamental reside en que apunta a un uso exclusivo de los fabricantes, lo que hace su disponibilidad muy limitada, por otra parte la optimización la realiza siempre en función de obtener la menor área posible.

## V.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA

Esta entidad fue fundada en 1958, y actúa en Manaus a partir del año 2011, opera en 21 rutas en las zonas norte y nordeste de la ciudad y cuenta con una flota de 134 vehículos transportando aproximadamente 2 300 000 pasajeros anualmente. La flota actual posee una edad media de 10 años de explotación del total de medios técnicos 116 son de la marca Volkswagen 17.230, 32 vehículos Mercedes Ben 1722 y 10 Volkswagen micro 9.150. Todo el proceso de mantenimiento se desarrolla dentro de la propia empresa que posee los equipamientos e instalaciones adecuadas para tales fines.

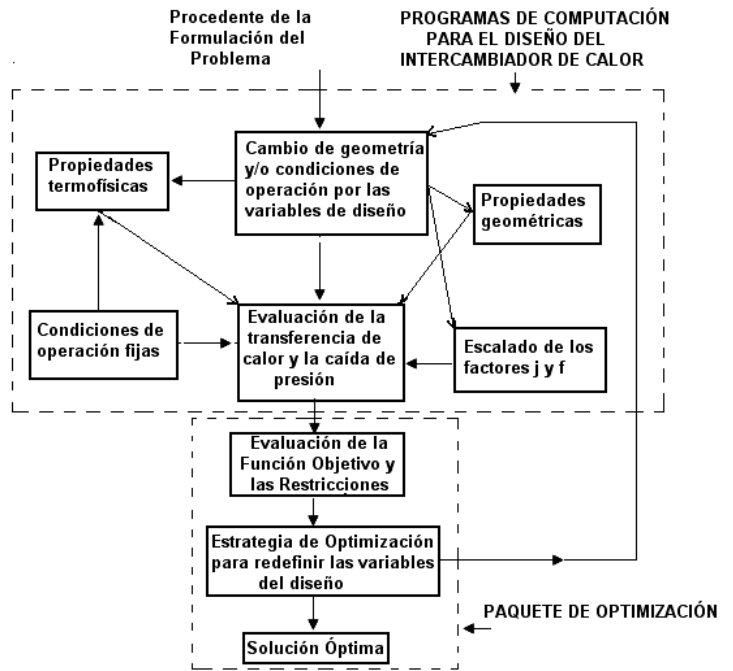


Figura 3. Metodología para la optimización de un intercambiador de calor. Fuente: [10].

En la propia obra citada, más adelante, aparece la optimización termodinámica de un intercambiador de calor, incluyendo el desarrollo de los factores de intercambio entre las irreversibilidades individuales y los costos de energía y capacidad, ver Figura 4.

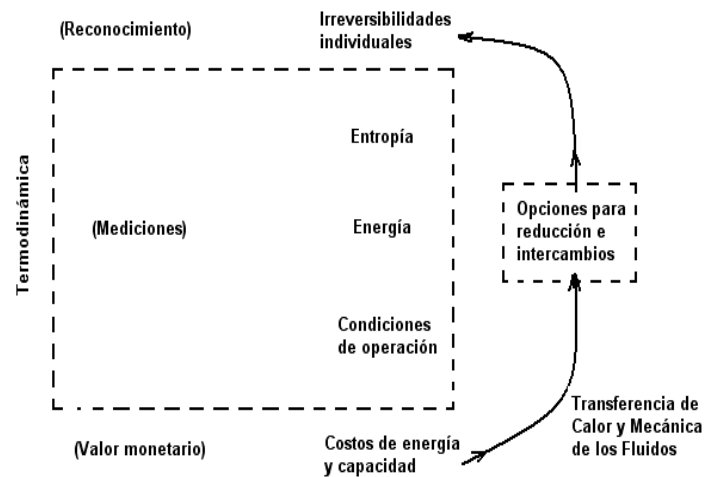


Figura 4. Optimización termodinámica de un intercambiador de calor, incluyendo el desarrollo de los factores de intercambio Fuente: [10].

Una de las últimas publicaciones sobre la optimización de intercambiadores de calor es del año 2015 [114].

## VI. DISEÑO MECÁNICO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR Y CORAZA

Con respecto al diseño Mecánico de los equipos de transferencia de calor se han podido encontrar muy pocos artículos relacionados con el tema, fundamentalmente normas y libros de texto. Sin lugar a dudas las normas más prestigiosas para el diseño mecánico de intercambiadores de calor son las normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) [12, 115]. En las mismas se detalla todo el procedimiento para el diseño mecánico de los Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza. También Brasil dispone de una norma propia para el diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza [116], la cual es algo más simple que la norma TEMA. Algunas transnacionales como la HRS tienen sus normas propias [10].

Segundo [117] planteaba de una manera categórica que debido a la amplia variedad de configuraciones de los intercambiadores de calor de tubo y coraza, así como la gran variedad de fluidos y los amplios rangos de temperatura y presión, el diseño mecánico de los mismos se tornaba una tarea compleja no solo desde el punto de vista técnico, sino también económico.

Muchos de los libros y Manuales clásicos para el Diseño de Intercambiadores de calor contemplan en alguno de sus capítulos el diseño mecánico de Intercambiadores de calor de tubo y coraza, mientras que otros se dedican por entero al diseño mecánico de estos equipos. Entre ellos el hindú [118] en su libro Heat Exchanger Design Handbook, refleja sus experiencias prácticas de muchos años en la industria, en su obra, discute la construcción, las normas, los fundamentos termo-hidráulicos, diseño térmico, etc. [10] de La universidad de Kentucky en su libro Fundamentals of Heat Exchanger Design, en un libro de 941 páginas no dedican ni tan solo un epígrafe al diseño mecánico de los intercambiadores de calor de tubo y coraza; algo similar ocurre con [5] de la Universidad de la Florida en su libro Heat Exchangers. Selection, Rating and Thermal Design, donde se hace un profundo análisis de los Intercambiadores de calor de tubo y coraza desde el punto de vista térmico, pero no incluyen nada del diseño mecánico. Los alemanes [119] desarrollaron tal vez el libro más completo encontrado en la revisión bibliográfica sobre el Diseño Mecánico de Intercambiadores de Calor, en el mismo aparecen fórmula, métodos, recomendaciones, etc. para el cálculo mecánico de estos equipos, en particular para los de tubo y coraza.

Uno de los textos más asequibles desde el punto de vista técnico es el del también Hindú [120] titulado “Working with Heat Exchangers: Questions and Answers”. En este texto el autor le da muchos criterios al lector sobre el trabajo con los Intercambiadores de calor de tubo y coraza. En el texto dedica dos capítulos a la parte mecánica, uno de ellos a los aspectos relacionados con el análisis de las tensiones y las fallas mecánicas y otro a la soldadura y selección de materiales.

Uno de los libros clásicos en el área de los equipos para plantas químicas es el libro Plant Design and Economics for Chemical Engineers de [121]. En este texto uno de los aspectos más interesantes es que en el capítulo 14 los autores hacen una comparación de tres métodos para el diseño de Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza, destacando la gran diferencia entre los resultados obtenidos por cada método en cuanto a coeficiente global de transferencia de calor y caída de presión se refiere. En el texto también vienen aspectos importantes acerca del costo de estos equipos. De la parte Mecánica no viene nada.

El “Heat Transfer Research Institute de Texas [122] tiene un manual muy completo para el diseño de Intercambiadores de calor, particularmente para los de tubo y coraza. En este manual se trata con detalle la vibración inducida en los tubos. [123], también de la India trata los aspectos relacionados con las vibraciones mecánicas en su libro “Practical Thermal Design of Shell and Tube Heat Exchangers, destacando que las mismas tienen una gran influencia en la rotura de los tubos.

De acuerdo con [124] en su libro Mechanical Design of heat exchangers and pressure vessel components, dedican un capítulo al diseño mecánico de los Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza y plantean la necesidad del uso de la computación. También insisten en la importancia de las vibraciones y en los efectos sísmicos.

A [117] ofrece una información bastante precisa del diseño mecánico de los intercambiadores de calor de tubo y coraza.

Uno de los autores clásicos de textos referidos por casi todos los investigadores es el Heat Exchanger Handbook (Hewitt and Barbosa 2008 en el mismo dedica el Volumen IV de la colección al diseño mecánico de los intercambiadores de calor. En este volumen se discuten aspectos tales como: Principios básicos de mecánica, materiales de construcción, códigos de diseño, prueba e inspección, costo, uniones de las bridas y los tubos, etc. También se analizan y se clasifican los materiales para las juntas. Este sin lugar a dudas es uno de los textos básicos de intercambiadores de calor en este momento.

De acuerdo con [125] en el año 2006 publicaron un trabajo acerca del diseño de la placa de tubos y de la unión de la placa de tubo a la coraza para un intercambiador de calor de placa de tubos fijos. En el trabajo los autores señalan que para el diseño mecánico de un intercambiador de calor con placa de tubos fija de un reactor de hidrogenación en una planta petroquímica no eran apropiadas las normas ASME y TEMA y acuden entonces al método de los elementos finitos para determinar las tensiones en el intercambiador.

De acuerdo con [126-128] plantean que las vibraciones inducidas por el flujo son ampliamente reconocidas como una de

las principales preocupaciones en el diseño de los modernos intercambiadores de calor de tubo y con cáscara. Las fallas del tubo originadas por las vibraciones excesivas son relativamente comunes y a menudo muy costosas de reparar. Si bien se han hecho considerables esfuerzos en el desarrollo de herramientas de predicción, todavía quedan muchas incertidumbres.

## VI. 1 TENDENCIAS ACTUALES EN LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los criterios de evaluación del desempeño de los intercambiadores de calor generalmente se clasifican en dos grupos: el primero se basa en la primera ley de la termodinámica, y el segundo se basa en la combinación de la primera y la segunda ley de la termodinámica. La transferencia de calor en los intercambiadores de calor por lo general implica la conducción de calor bajo una diferencia de temperatura finita, la fricción del fluido bajo una caída de presión finita y mezclas de fluidos. Estos procesos son caracterizados como procesos irreversibles de no equilibrio termodinámico

Por lo tanto, en las últimas décadas el estudio del segundo grupo ha atraído mucha atención [136]. Inspirado en el principio de producción de entropía mínima adelantado por [129], [57, 130, 131] desarrolló el enfoque de minimización de generación de entropía (EGM) para la optimización del diseño de Intercambiadores de calor. En este enfoque, Bejan tuvo en cuenta dos tipos de irreversibilidades en el intercambiador de calor, a saber, la conducción de calor de corriente-a-corriente bajo una diferencia de temperatura y la caída de presión por fricción que acompaña a la circulación de fluido a través del equipo.

Por lo tanto, la tasa total de producción de entropía denotada por  $S_{gen}$  es la suma de las producciones de entropía asociadas con la conducción de calor y la fricción del fluido. Sin embargo, entre todos los principios variacionales de la termodinámica, el principio de generación de entropía mínima de Prigogine sigue siendo el más debatido [132].

En consecuencia, el enfoque de minimización de la generación de entropía, ampliamente aplicado a la modelización y la optimización de los sistemas térmicos que deben su imperfección termodinámica a las irreversibilidades de la transferencia de calor, la transferencia de masa, y del flujo de fluido, muestra algunas inconsistencias y paradojas en aplicaciones de diseños de intercambiadores de calor [133]. Esto es debido a que el enfoque del método de minimización de la generación de entropía se basa en los procesos de conversión de calor en trabajo, mientras que en el diseño de intercambiadores de calor lo más importante es la velocidad y la eficiencia de la transferencia de calor.

Por analogía con la conducción eléctrica, [42, 134] definieron un nuevo concepto físico denominado entransía, que

describe la capacidad de transferencia de calor de un cuerpo. Este concepto es ideal para definir la eficiencia de un intercambiador de calor y para realizar la optimización del mismo. Se ha encontrado que en los procesos irreversibles se disipa la entransía y disminuye por tanto la capacidad de transmitir calor [135]. Mientras mayor sea la disipación de entransía, mayor será el grado de irreversibilidad en el proceso de transferencia de calor.

Por lo tanto la disipación de entransía puede servir como un factor de calidad para evaluar el desempeño del intercambiador de calor.

Mucho esfuerzo se ha dedicado al estudio de la teoría de la disipación de entransía. [136] obtuvieron una ecuación de transferencia de entransía para describir los procesos de transferencia de entransía de un fluido viscoso multi-componente sometido a transferencia de calor por conducción y convección, difusión de masa y reacciones químicas.

A [137] definieron una relación de diferencia de temperatura para el flujo de calor como la resistencia térmica generalizada de los procesos de transferencia de calor por convección, y desarrollaron la teoría de la resistencia térmica mínima para la optimización de la transferencia de calor por convección, se encontró que el principio de mínima resistencia térmica es equivalente al principio extremo de disipación de entransía.

A [137] optimizaron el proceso de transferencia de calor por convección en una cavidad cuadrada mediante el principio de minimización de generación de entropía y el principio de disipación extrema de entransía, y los resultados indican que el primero produjo la mayor conversión de calor en trabajo, mientras el último hizo máxima la eficiencia de la transferencia de calor por convección. [138] estudiaron las distribuciones de los parámetros óptimos de un intercambiador de calor de dos fluidos mediante el uso de la teoría de control óptimo bajo la condición de carga de calor fija y tomando la minimización de la disipación de entransía como el objetivo de la optimización

De acuerdo con [139] encontraron que la tasa total de disipación de entransía alcanza el mínimo cuando la tasa local de disipación de entransía se distribuye uniformemente a lo largo del intercambiador de calor, lo que se denomina el principio de equipartición de la disipación de entransía.

Segundo [134] investigaron la aplicabilidad de los principios de extremos de generación de entropía y de disipación de entransía para la optimización de los intercambiadores de calor, y encontraron que el primero es mejor para la optimización de los intercambiador de calor cuando funciona en el ciclo Brayton, mientras que el último da los mejores resultados cuando el intercambiador de calor es sólo para el propósito de calentar o enfriar fluidos.

Recientemente se investigó la influencia de la disipación viscosa durante el calentamiento en la entransía en intercambiadores de calor de dos fluidos [140], y la disipación de principio de disipación extrema de la entransía y se extendió a la transferencia de calor por radiación en [141] y la optimización de las redes de transporte [142].

De acuerdo con [43][143] derivaron las expresiones de disipación de entransía debida a la conducción del calor y a la fricción del fluido en los intercambiadores de calor. Cuando la disipación de entransía es aplicada a la evaluación del rendimiento y la optimización del diseño de los intercambiadores de calor, es necesario que sea adimensional.

De acuerdo con [135] introducen un método adimensional para la disipación de entransía en los intercambiador es de calor y se introduce entonces el concepto de número de disipación de entransía, el cual puede ser utilizado para evaluar el rendimiento de los intercambiadores de calor [144][146].

## VII. CONCLUSIONES

1. La mayoría de los trabajos más actuales relacionados con los intercambiadores de calor de tubo y coraza tiene que ver con la parte térmica, existiendo muy pocos artículos que tratan la parte mecánica.
2. El Diseño Mecánico que se hace de los intercambiadores de calor es a través de fórmulas tradicionales, usándose muy poco métodos modernos como son los métodos numéricos.
3. Existen múltiples trabajos relacionados con la optimización de intercambiadores de calor de tubo y coraza, la mayoría encaminados a disminuir los costos.
4. Los métodos actuales más utilizados para la optimización son los algoritmos genéticos, los números sinérgicos, el enjambre de partículas y el recocido simulado. Aun no se ha usado el método de la colonia de hormigas para este propósito.
5. Los pocos trabajos encontrados de optimización multicriterial de intercambiadores de calor de tubo y coraza usan como funciones objetivo el costo total y la efectividad
6. Cuando se realiza la optimización multicriterial en la bibliografía analizada, no se tienen en cuenta las restricciones mecánicas, lo que provoca que luego al realizar el diseño mecánico por las normas TEMA u otras, se pierda parte de la optimización realizada.
7. A partir del año 2007 se crea una nueva propiedad termodinámica llamada “Entransy”, equivalente a “Entransía” en español (definición de la autora). Este parámetro ha revolucionado los conceptos y métodos de la transferencia de calor

8. Para un flujo de calor en una frontera fija, el proceso de conducción es óptimo cuando se reduce al mínimo la disipación de entransía.
9. La disipación de entransía puede ser empleada para cuantificar las irreversibilidades. Aplicando dicha teoría y el método de los algoritmos genéticos se puede realizar la optimización del diseño de intercambiadores de calor utilizando como función objetivo la disipación de entransía.
10. Otra vertiente apunta a la existencia de un diseño “óptimo” del intercambiador de calor cuando la generación total de la entropía se reduce al mínimo.
11. Parece ser que aún no existe un método exacto para el diseño térmico de intercambiadores de calor debido a las diferencias entre los coeficientes globales de transferencia de calor y la caída de presión obtenida por los diferentes métodos. Esto será objeto de análisis en el capítulo siguiente.
12. Existen muy pocos trabajos en la bibliografía analizada que aplique nos métodos numéricos al diseño de Intercambiadores de calor.
13. Existe una preferencia por los autores que han realizado trabajos de optimización por el uso del método de Bell Delaware
14. Existen muy pocos trabajos relacionados con el Diseño Mecánico, la mayoría por expresiones tradicionales y antiguas y aisladas del cálculo térmico. Ningún trabajo de los analizados combina las dos cosas, esto no solamente se pone de manifiesto en los trabajos de diseño, sino también en los de optimización.
15. Desde el punto de vista mecánico uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta son las vibraciones en los tubos.

## VIII. BIBLIOGRAFIA

- [1] Szargut, J., **Exergy method: technical and ecological applications**. Vol. 18. 2005: WIT press.
- [2] Szargut, J. and W. Stanek, **Influence of the pro-ecological tax on the market prices of fuels and electricity**. Energy, 2008. **33**(2): p. 137-143.
- [3] Arriagada Herrera, G., **Petróleo y gas en América Latina. Un análisis político de relaciones internacionales a partir de la política venezolana**. Boletín Elcano, 2006(84): p. 32.
- [4] de Ciencia, P.N. and I. Tecnológica, **Desarrollo energético sostenible. Red de la Ciencia en Cuba**.
- [5] Kakac, S., H. Liu, and A. Pramuanjaroenkij, **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. 2012: CRC press.

- [6] Hatami, M., D. Ganji, and M. Gorji-Bandpy, **A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **37**: p. 168-181.
- [7] Wang, Q., et al., **Recent development and application of several high-efficiency surface heat exchangers for energy conversion and utilization**. Applied Energy, 2014. **135**: p. 748-777.
- [8] Lienhard, J.H., **A heat transfer textbook**. 2013: Courier Corporation.
- [9] McDonald, A.G. and H.L. Magande, **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. Introduction to Thermo-Fluids Systems Design, 2012: p. 127-211.
- [10] Shah, R.K. and D.P. Sekulic, **Fundamentals of heat exchanger design**. 2003: John Wiley & Sons.
- [11] Thome, J.R., **Engineering data book III**. Wolverine Tube Inc, 2004.
- [12] Chenoweth, J.M., **Final report of the HTRI/TEMA joint committee to review the fouling section of the TEMA standards**. Heat Transfer Engineering, 1990. **11**(1): p. 73-107.
- [13] Palen, J., **Heat Transfer Research Institute**. private communication, Aug, 1978. **15**.
- [14] HYSYS, A., **AspenTech**. 2007, Calgary.
- [15] Mezura-Montes, E., **Uso de la técnica multiobjetivo NPGA para el manejo de restricciones en Algoritmos Genéticos, Maestría en Inteligencia Artificial**. 2001, Thesis, Universidad Veracruzana.
- [16] Camino, G.E.R. and H.A.R. Jara, **Dimensionamiento de intercambiadores de calor de coraza y tubos, con ayuda de computador**. Ingeniería e Investigación, 1985(13): p. 43-52.
- [17] Kara, Y.A. and Ö. Güraras, **A computer program for designing of shell-and-tube heat exchangers**. Applied Thermal Engineering, 2004. **24**(13): p. 1797-1805.
- [18] Sastry, K., D.E. Goldberg, and G. Kendall, **Genetic algorithms, in Search methodologies**. 2014, Springer. p. 93-117.
- [19] Goldberg, D.E., **Genetic algorithms in search optimization and machine learning**. Vol. 412. 1989: Addison-wesley Reading Menlo Park.
- [20] Bagley, J.D., **The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms**, in Ann Arbor, MI: University of Michigan Press. 1967, University of Michigan.
- [21] Holland, J.H., **Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence**, in Ann Arbor, MI: University of Michigan Press. 1975.
- [22] KENNETH, A.D.J., **An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems**. Dissertation Abstracts International ed. D.A. International. Vol. 36, no. 10, 1975, 5140B. 1975, (University Microfilms No. 76-9381). Dissertation Abstracts International.
- [23] Grefenstette, J.J., **Optimization of control parameters for genetic algorithms**. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 1986. **16**(1): p. 122-128.
- [24] Baker, J.E. **Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm. in Proceedings of the second international conference on genetic algorithms**. 1987.
- [25] Bäck, T., U. Hammel, and H.-P. Schwefel, **Evolutionary computation: Comments on the history and current state**. Evolutionary computation, IEEE Transactions on, 1997. **1**(1): p. 3-17.
- [26] Queipo, N., R. Devarakonda, and J. Humphrey, **Genetic algorithms for thermosciences research: application to the optimized cooling of electronic components**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994. **37**(6): p. 893-908.
- [27] Deb, K., et al., **A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II**. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002. **6**(2): p. 182-197.
- [28] Tamaki, H., H. Kita, and S. Kobayashi, **Multi-objective optimization by genetic algorithms: A review. in Evolutionary Computation, 1996., Proceedings of IEEE International Conference on**. 1996. IEEE.
- [29] Fonseca, C.M. and P.J. Fleming, **An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization**. Evolutionary computation, 1995. **3**(1): p. 1-16.
- [30] Deb, K., **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. Vol. 16. 2001: John Wiley & Sons.
- [31] Zitzler, E. and L. Thiele, **Multiobjective optimization using evolutionary algorithms—a comparative case study. in Parallel problem solving from nature—PPSN V**. 1998. Springer.
- [32] Van Veldhuizen, D.A. and G.B. Lamont, **Multiobjective evolutionary algorithms: Analyzing the state-of-the-art**. Evolutionary computation, 2000. **8**(2): p. 125-147.
- [33] Ayub, Z.H., **A new chart method for evaluating single-phase shell side heat transfer coefficient in a single segmental shell and tube heat exchanger**. Applied Thermal Engineering, 2005. **25**(14): p. 2412-2420.

- [34] Vera-García, F., et al., **A simplified model for shell-and-tubes heat exchangers: Practical application.** Applied thermal engineering, 2010. **30**(10): p. 1231-1241.
- [35] Wang, S., J. Wen, and Y. Li, **An experimental investigation of heat transfer enhancement for a shell-and-tube heat exchanger.** Applied Thermal Engineering, 2009. **29**(11): p. 2433-2438.
- [36] Guo, J., M. Xu, and L. Cheng, **The application of field synergy number in shell-and-tube heat exchanger optimization design.** Applied Energy, 2009. **86**(10): p. 2079-2087.
- [37] Butterworth, D., **Design of shell-and-tube heat exchangers when the fouling depends on local temperature and velocity.** Applied Thermal Engineering, 2002. **22**(7): p. 789-801.
- [38] Fesanghary, M., E. Damangir, and I. Soleimani, **Design optimization of shell and tube heat exchangers using global sensitivity analysis and harmony search algorithm.** Applied Thermal Engineering, 2009. **29**(5): p. 1026-1031.
- [39] Patel, V. and R. Rao, **Design optimization of shell-and-tube heat exchanger using particle swarm optimization technique.** Applied Thermal Engineering, 2010. **30**(11): p. 1417-1425.
- [40] Costa, A.L. and E.M. Queiroz, **Design optimization of shell-and-tube heat exchangers.** Applied Thermal Engineering, 2008. **28**(14): p. 1798-1805.
- [41] Oh, C.H., E.S. Kim, and M. Patterson, **Design option of heat exchanger for the next generation nuclear plant.** Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010. **132**(3): p. 032903.
- [42] Guo, Z.-Y., H.-Y. Zhu, and X.-G. Liang, **Entransy—a physical quantity describing heat transfer ability.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007. **50**(13): p. 2545-2556.
- [43] Guo, J. and M. Xu, **The application of entransy dissipation theory in optimization design of heat exchanger.** Applied Thermal Engineering, 2012. **36**: p. 227-235.
- [44] Wildi-Tremblay, P. and L. Gosselin, **Minimizing shell-and-tube heat exchanger cost with genetic algorithms and considering maintenance.** International journal of energy research, 2007. **31**(9): p. 867-885.
- [45] Sanaye, S. and H. Hajabdollahi, **Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers.** Applied Thermal Engineering, 2010. **30**(14): p. 1937-1945.
- [46] Xue, F., A.C. Sanderson, and R.J. Graves. **Pareto-based multi-objective differential evolution.** in *Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on.* 2003. IEEE.
- [47] Brooks, S.P. and B.J. Morgan, **Optimization using simulated annealing.** The Statistician, 1995: p. 241-257.
- [48] Kirkpatrick, S., **Optimization by simulated annealing: Quantitative studies.** Journal of statistical physics, 1984. **34**(5-6): p. 975-986.
- [49] Dowsland, K.A. and J.M. Thompson, **Simulated annealing, in Handbook of Natural Computing.** 2012, Springer. p. 1623-1655.
- [50] Allen, B. and L. Gosselin, **Optimal geometry and flow arrangement for minimizing the cost of shell-and-tube condensers.** International Journal of Energy Research, 2008. **32**(10): p. 958-969.
- [51] Selbaş, R., Ö. Kızıllıkan, and M. Reppich, **A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms from economic point of view.** Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2006. **45**(4): p. 268-275.
- [52] Babu, B. and S. Munawar, **Differential evolution strategies for optimal design of shell-and-tube heat exchangers.** Chemical Engineering Science, 2007. **62**(14): p. 3720-3739.
- [53] Caputo, A.C., P.M. Pelagagge, and P. Salini, **Heat exchanger design based on economic optimisation.** Applied thermal engineering, 2008. **28**(10): p. 1151-1159.
- [54] Özçelik, Y., **Exergetic optimization of shell and tube heat exchangers using a genetic based algorithm.** Applied Thermal Engineering, 2007. **27**(11): p. 1849-1856.
- [55] Webb, R., **Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981. **24**(4): p. 715-726.
- [56] Bejan, A., **General criterion for rating heat-exchanger performance.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978. **21**(5): p. 655-658.
- [57] Bejan, A., **Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes.** Journal of Applied Physics, 1996. **79**(3): p. 1191-1218.
- [58] Bejan, A., **The concept of irreversibility in heat exchanger design: counterflow heat exchangers for gas-to-gas applications.** Journal of heat transfer, 1977. **99**(3): p. 374-380.
- [59] Bejan, A., **A study of entropy generation in fundamental convective heat transfer.** Journal of Heat Transfer, 1979. **101**(4): p. 718-725.
- [60] Poulidakos, D. and A. Bejan, **Fin geometry for minimum entropy generation in forced convection.** Journal of Heat Transfer, 1982. **104**(4): p. 616-623.



- [61]Grazzini, G. and F. Gori, **Entropy parameters for heat exchanger design**. International journal of heat and mass transfer, 1988. **31**(12): p. 2547-2554.
- [62]Sekulic, D., **The second law quality of energy transformation in a heat exchanger**. Journal of heat transfer, 1990. **112**(2): p. 295-300.
- [63] Drost, M. and M. White, **Numerical predictions of local entropy generation in an impinging jet**. Journal of Heat Transfer, 1991. **113**(4): p. 823-829.
- [64] Wilcoxon, R. and A. Moutsoglou, **Second law analysis in assessing constant power input systems**. Journal of heat transfer, 1991. **113**(2): p. 321-328.
- [65] Zubair, S., P. Kadaba, and R. Evans, **Second-law-based thermoeconomic optimization of two-phase heat exchangers**. Journal of heat transfer, 1987. **109**(2): p. 287-294.
- [66]Witte, L., **The influence of availability costs on optimal heat exchanger design**. Journal of heat transfer, 1988. **110**(4a): p. 830-835.
- [67] Zhang, J.-F., Y.-L. He, and W.-Q. Tao, **3D numerical simulation on shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and continuous baffles–Part I: Numerical model and results of whole heat exchanger with middle-overlapped helical baffles**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(23): p. 5371-5380.
- [68] Zhang, J.-F., Y.-L. He, and W.-Q. Tao, **3D numerical simulation on shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and continuous baffles–Part II: Simulation results of periodic model and comparison between continuous and noncontinuous helical baffles**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(23): p. 5381-5389.
- [69] Zhang, J.-F., Y.-L. He, and W.-Q. Tao, **A design and rating method for shell-and-tube heat exchangers with helical baffles**. Journal of heat transfer, 2010. **132**(5): p. 051802.
- [70] Saffar-Avval, M. and E. Damangir, **A general correlation for determining optimum baffle spacing for all types of shell and tube exchangers**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995. **38**(13): p. 2501-2506.
- [71] Babu, B. and S. Mohiddin, **Automated design of heat exchangers using artificial intelligence based optimization**. Proceedings of 52nd Annual session of IChE (CHEMCON-99), 1999.
- [72]Serna-González, M. and A. Jiménez-Gutiérrez, **Area minima de redes de intercambio de calor basada en las caídas de presión de las corrientes. II. Especificaciones no uniformes de intercambiadores heat exchanger network minimum area based on stream pressure DROPS. II. NON-UNIFORM EXCHANGER SPECIFICATIONS**. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 2003. **2**: p. 153-165.
- [73] Silva, J.P., et al., **SIMULAÇÃO DE TROCADORES DE CALOR COM MUDANÇA DE FASE**. 2004.
- [74] Bicca, G.B., A.R. Secchi, and K. Wada, **Modelagem de trocadores de calor casco e tubos**. Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (2005: Porto Alegre, RS).[Anais][recurso eletrônico]. Porto Alegre, RS UFRGS/PPGEQ, 2005, 2005.
- [75] Li, H. and V. Kottke, **Effect of the leakage on pressure drop and local heat transfer in shell-and-tube heat exchangers for staggered tube arrangement**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998. **41**(2): p. 425-433.
- [76] Roetzel, W. and D. Lee, **Experimental investigation of leakage in shell-and-tube heat exchangers with segmental baffles**. International journal of heat and mass transfer, 1993. **36**(15): p. 3765-3771.
- [77] Mukherjee, R., **Effectively design shell-and-tube heat exchangers**. Chemical Engineering Progress, 1998. **94**(2): p. 21-37.
- [78] Purohit, G., **Estimating costs of shell-and-tube heat exchangers**. Chemical engineering, 1983. **90**(17): p. 56-67.
- [79] Ratts, E.B. and A.G. Raut, **Entropy generation minimization of fully developed internal flow with constant heat flux**. Journal of heat transfer, 2004. **126**(4): p. 656-659.
- [80] Leoug, K., K. Toh, and Y. Leong, **Shell and tube heat exchanger design software for educational applications**. International Journal of Engineering Education, 1998. **14**(3): p. 217-224.
- [81] Fakheri, A., **Heat exchanger efficiency**. Journal of Heat Transfer, 2007. **129**(9): p. 1268-1276.
- [82] Kapale, U.C. and S. Chand, **Modeling for shell-side pressure drop for liquid flow in shell-and-tube heat exchanger**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(3): p. 601-610.
- [83] Wang, Q., et al., **Numerical investigation on combined multiple shell-pass shell-and-tube heat exchanger with continuous helical baffles**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(5): p. 1214-1222.
- [84] Yang, Y.-T. and M.-L. Hwang, **Numerical simulation of turbulent fluid flow and heat transfer characteristics in heat exchangers fitted with porous media**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(13): p. 2956-2965.
- [85] Serna, M., J.M. Ponce, and A. Jiménez, **OSTHEX, Versión 1.0 Optimization of Shell-and-Tube Heat Exchangers**.

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. **58060**.

[86] Li, Y., et al., **Optimization of high-pressure shell-and-tube heat exchanger for syngas cooling in an IGCC**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. **53**(21): p. 4543-4551.

[87] Paulus Jr, D.M., **Single-Component Optimal Heat Exchanger Effectiveness using Specific Exergy Costs and Revenues**. International Journal of Thermodynamics, 2006. **9**(1): p. 1-9.

[88] Ravikumaur, S., K. Seetharamu, and P.A. Narayana, **Performance evaluation of crossflow compact heat exchangers using finite elements**. International journal of heat and mass transfer, 1989. **32**(5): p. 889-894.

[89] Gay, B., N. Mackley, and J. Jenkins, **Shell-side heat transfer in baffled cylindrical shell-and tube exchangers—an electrochemical mass-transfer modelling technique**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976. **19**(9): p. 995-1002.

[90] Pezo, M., V.D. Stevanovic, and Z. Stevanovic, **A two-dimensional model of the kettle reboiler shell side thermal-hydraulics**. International journal of heat and mass transfer, 2006. **49**(7): p. 1214-1224.

[91] Xuan, Y., B. Spang, and W. Roetzel, **Thermal analysis of shell and tube exchangers with divided-flow pattern**. International journal of heat and mass transfer, 1991. **34**(3): p. 853-861.

[92] Ponce-Ortega, J.M., M. Serna-González, and A. Jiménez-Gutiérrez, **Use of genetic algorithms for the optimal design of shell-and-tube heat exchangers**. Applied Thermal Engineering, 2009. **29**(2): p. 203-209.

[93] Singh, V., V. Aute, and R. Radermacher, **Usefulness of entropy generation minimization through a heat exchanger modeling tool**. 2008.

[94] Manan, Z.A. and F.S. Hian, **Combining pinch and exergy analysis for process improvement: a case study on an aromatics complex**. 2000.

[95] Murali, S. and Y.B. Rao, **A Simple Tubesheet Layout Program for Heat Exchangers**. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2008. **1**(2).

[96] Riffel, D.B., F.A. Belo, and A.P.F. Leite, **Simulation of a Shell-and-Tube Heat Exchanger for Solar Adsorption Chiller**. Heat SET, Heat Transfer in Component and Systems for Sustainable Energy Technologies, 2007: p. 18-20.

[97] Konak, A., D.W. Coit, and A.E. Smith, **Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial**.

Reliability Engineering & System Safety, 2006. **91**(9): p. 992-1007.

[98] Shah, R., K. Afimiwala, and R. Mayne. **Heat exchanger optimization**. in *Proceedings of 6th Int. Heat Transfer Conference*. 1978.

[99] Ponce, J., et al., **Optimal design of shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms**. Computer Aided Chemical Engineering, 2006. **21**: p. 985-990.

[100] Xie, G., B. Sundén, and Q. Wang, **Optimization of compact heat exchangers by a genetic algorithm**. Applied Thermal Engineering, 2008. **28**(8): p. 895-906.

[101] Guo, J., L. Cheng, and M. Xu, **Optimization design of shell-and-tube heat exchanger by entropy generation minimization and genetic algorithm**. Applied Thermal Engineering, 2009. **29**(14): p. 2954-2960.

[102] Reppich, M. and J. Kohoutek, **Optimal design of shell-and-tube heat exchangers**. Computers & chemical engineering, 1994. **18**: p. S295-S299.

[103] Hosseini, R., A. Hosseini-Ghaffar, and M. Soltani, **Experimental determination of shell side heat transfer coefficient and pressure drop for an oil cooler shell-and-tube heat exchanger with three different tube bundles**. Applied thermal engineering, 2007. **27**(5): p. 1001-1008.

[104] Stewart, S.W., S.V. Shelton, and K.A. Aspelund, **Finned-tube heat exchanger optimization methodology**. Heat transfer engineering, 2005. **26**(7): p. 22-28.

[105] Kanaris, A., A. Mouza, and S. Paras, **Optimal design of a plate heat exchanger with undulated surfaces**. International Journal of Thermal Sciences, 2009. **48**(6): p. 1184-1195.

[106] Fontein, H. and J.G. Wassink, **The economically optimal design of heat exchangers**. Engineering and Process Economics, 1978. **3**(2): p. 141-149.

[107] Liu, Z. and H. Cheng, **Multi-objective optimization design analysis of primary surface recuperator for microturbines**. Applied Thermal Engineering, 2008. **28**(5): p. 601-610.

[108] Lei, Y.-G., et al., **Effects of baffle inclination angle on flow and heat transfer of a heat exchanger with helical baffles**. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008. **47**(12): p. 2336-2345.

[109] Farajollahi, B., S.G. Etemad, and M. Hojjat, **Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. **53**(1): p. 12-17.

[110] Gupta, P.K., P. Kush, and A. Tiwari, **Design and optimization of coil finned-tube heat exchangers for cryogenic applications**. Cryogenics, 2007. **47**(5): p. 322-332.

- [111] Xie, G., et al., **Heat transfer analysis for shell-and-tube heat exchangers with experimental data by artificial neural networks approach**. Applied Thermal Engineering, 2007. **27**(5): p. 1096-1104.
- [112] Hedderich, C.P., **Heat exchanger optimization**. 1980, DTIC Document.
- [113] Bahadorani, P., G. Naterer, and S. Nokleby, **Optimization of heat exchangers for geothermal district heating**. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2009. **33**(2): p. 239.
- [114] Arya, A. and D.S. Dhanjibhai, **Optimization of shell and tube heat exchanger**. International Journal of Advanced Technology for Science & Engineering Research. , 2015. **1**(2): p. 27-35.
- [115] Yang, J., et al., **Optimization of shell-and-tube heat exchangers conforming to TEMA standards with designs motivated by constructal theory**. Energy Conversion and Management, 2014. **78**: p. 468-476.
- [116] Barboza, K.R.A., **Avaliação da técnica de inspeção por correntes parasitas em tubos de permutador de calor**. 2009.
- [117] Gram, A., **Mechanical Design of Heat Exchangers**. Industrial & Engineering Chemistry, 1960. **52**(6): p. 468-473.
- [118] Thulukkanam, K., **Heat exchanger design handbook**. 2013: CRC Press.
- [119] Podhorsky, M., et al., **Heat Exchangers: A Practical Approach to Mechanical Construction, Design, and Calculations**. 1998: Begell House.
- [120] Gupta, J.P., **Working with Heat Exchangers**. 1989: Taylor & Francis US.
- [121] Peters, M.S. and K.D. Timmerhaus, **Plant desing and economics for chemical engineers**. 2007.
- [122] HTRI. **ase login to see all available content.Design Manual**. HTRI 2016; Available from: <https://www.htri.net/design-manual.aspx>.
- [123] Mukherjee, R., **Practical Thermal Design of Shell-and-Tube Heat Exchangers**. High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes), 2008. **12**(1-2).
- [124] Singh, K.P. and A.I. Soler, **Mechanical design of heat exchangers and pressure vessel components**. 1984: Springer Science & Business Media.
- [125] Behseta, K. and S. Schindler, **On the design of the tubesheet and the tubesheet-to-shell junction of a fixed tubesheet heat exchanger**. International journal of pressure vessels and piping, 2006. **83**(10): p. 714-720.
- [126] Weaver, D.t. and J. Fitzpatrick, **A review of cross-flow induced vibrations in heat exchanger tube arrays†† The original version of this paper was prepared for presentation at the International Conference on Flow Induced Vibrations, Bowness-on-Windermere, 12–14 May 1987; proceedings published by BHRA The Fluid Engineering Centre, Cranfield, England (ed. R. King)**. Journal of Fluids and Structures, 1988. **2**(1): p. 73-93.
- [127] Weaver, D., J. Fitzpatrick, and M. ElKashlan, **Strouhal numbers for heat exchanger tube arrays in cross flow**. Journal of pressure vessel technology, 1987. **109**(2): p. 219-223.
- [128] Weaver, D. and J. Fitzpatrick. **A review of flow induced vibrations in heat exchangers**. in **Proceedings of the international conference on flow induced vibrations**. 1987.
- [129] Prigogine, I., **Introduction to thermodynamics of irreversible processes**. New York: Interscience, 1967, 3rd ed., 1967. **1**.
- [130] Bejan, A. and J. Kestin, **Entropy generation through heat and fluid flow**. Journal of Applied Mechanics, 1983. **50**: p. 475.
- [131] Bejan, A., **Entropy generation minimization: the method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes**. 1995: CRC press.
- [132] Bertola, V. and E. Cafaro, **A critical analysis of the minimum entropy production theorem and its application to heat and fluid flow**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. **51**(7): p. 1907-1912.
- [133] Hesselgreaves, J., **Rationalisation of second law analysis of heat exchangers**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000. **43**(22): p. 4189-4204.
- [134] Liu, X., J. Meng, and Z. Guo, **Entropy generation extremum and entransy dissipation extremum for heat exchanger optimization**. Chinese Science Bulletin, 2009. **54**(6): p. 943-947.
- [135] Guo, J., L. Cheng, and M. Xu, **Entransy dissipation number and its application to heat exchanger performance evaluation**. Chinese Science Bulletin, 2009. **54**(15): p. 2708-2713.
- [136] Wang, S., Q. Chen, and B. Zhang, **An equation of entransy transfer and its application**. Chinese science bulletin, 2009. **54**(19): p. 3572-3578.
- [137] Chen, Q. and J. Ren, **Generalized thermal resistance for convective heat transfer and its relation to entransy dissipation**. Chinese Science Bulletin, 2008. **53**(23): p. 3753-3761.

[138] Xia, S., L. Chen, and F. Sun, **Optimization for entransy dissipation minimization in heat exchanger**. Chinese Science Bulletin, 2009. **54**(19): p. 3587-3595.

[138] Guo, J., M. Xu, and L. Cheng, **Principle of equipartition of entransy dissipation for heat exchanger design**. Science China Technological Sciences, 2010. **53**(5): p. 1309-1314.

[139] Guo, J., M. Xu, and L. Cheng, **The influence of viscous heating on the entransy in two-fluid heat exchangers**. Science China Technological Sciences, 2011. **54**(5): p. 1267-1274.

[140] Wu, J. and X. Liang, **Application of entransy dissipation extremum principle in radiative heat transfer optimization**. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008. **51**(8): p. 1306-1314.

[141] Liu, X., et al., **Minimum entransy dissipation principle for optimization of transport networks**. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 2010. **11**(2): p. 113-120.

[142] Xu, M., J. Guo, and L. Cheng, **Application of entransy dissipation theory in heat convection**. Frontiers of Energy and Power Engineering in China, 2009. **3**(4): p. 402-405.

[143] Gao, B., Q. Bi, and M. Gui, **Experimental performance comparison of shell-side heat transfer for shell-and-tube heat exchangers with different helical baffles**. Heat Transfer Engineering, 2016(just-accepted): p. 1-52.

[145] Guo, J. and X. Huai, **The heat transfer mechanism study of three-tank latent heat storage system based on entransy theory**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016. **97**: p. 191-200.

[146] Gao, B., et al., **Experimental study of effects of baffle helix angle on shell-side performance of shell-and-tube heat exchangers with discontinuous helical baffles**. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015. **68**: p. 48-57.