

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE BANCOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CARCASA Y HAZ DE TUBOS EN UNA PLANTA DE PROCESOS BASADO EN CONFIABILIDAD

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela,
por los Bachilleres:

Moreno V., Dixon E.

Yvimas M., Daniela C.

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE BANCOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CARCASA Y HAZ DE TUBOS EN UNA PLANTA DE PROCESOS BASADO EN CONFIABILIDAD

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Juan Ruilova

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela,
por los Bachilleres:

Moreno V., Dixon E.

Yvimas M., Daniela C.

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA

Caracas, 12 de noviembre de 2012

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el (los) bachiller (es):

Daniela Yuimas y Dixon Moreno

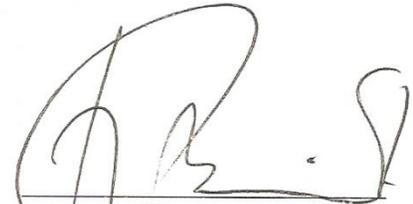
Titulado: *“Optimización de Bancos de Intercambiadores de Calor de Carcasa y Haz de Tubos en una Planta de Procesos Basado en Confiabilidad”*

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. Julio Segura
Jurado




Prof. Juan Ruilova
Tutor


Prof. Rodolfo Berrios
Jurado

“50 años de la creación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales”



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA

Caracas, 12 noviembre de 2012

Ciudadano
Prof. Gerardo Ramírez,
Jefe de División de Control de Estudios
Presente.

Quienes suscriben profesores del Jurado Examinador, designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted, con la finalidad de informarle la decisión de otorgar a el (los) bachiller(s):

Daniela Yoimas

y

Dixon Moreno

Titulares de la Cédula de Identidad N° 19.087.454 y 18.610.345 respectivamente.

“MENCION TRABAJO ESPECIAL DE GRADO”

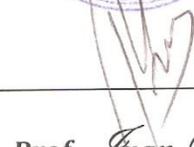
Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado Titulado:

“Optimización de Bancos de Intercambiadores de Calor de Carcasa y Haz de Tubos en una Planta de Procesos Basado en Confiabilidad”

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted.


Prof. Julio Segura
Jurado




Prof. Juan Ruilova
Tutor


Prof. Rodolfo Berrios
Jurado

“50 años de la creación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales”

DEDICATORIA

A mi mamá, a Carlos, Carlos Daniel y a Rumi por apoyarme en todo momento.

Daniela C. Yvimas M.

A Alba Valero, Dixon Moreno, Albanía Moreno, Yralba Moreno, Miguel Contreras y Santiago.

Dixon E. Moreno V.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo a Dios, por guiarnos en todo momento y darnos fuerza para solventar todos los obstáculos que encontramos en el camino.

Agradecemos a las siguientes personas:

- Prof. Juan Ruilova, nuestro Tutor Académico por su constante apoyo durante el desarrollo del Trabajo Especial de Grado, para que siguiéramos adelante con todas las exigencias que el mismo requería.
- Prof. Guillermo Flores, por colaboración, guía y constante ayuda durante todo el desarrollo de este trabajo.
- A nuestras familias, por su apoyo y amor incondicional.
- A Oscarina Muñoz por su paciencia, ayuda y colaboración en todo momento.
- A nuestra querida Oneida.
- A Juan Topo.
- A nuestros compañeros y amigos, por acompañarnos y apoyarnos en todo el transcurso de esta carrera.

Moreno V. Dixon E., Yvimas M. Daniela C.

**OPTIMIZACIÓN DE ARREGLOS DE INTERCAMBIADORES
DE CALOR DE CARCASA Y HAZ DE TUBOS EN UNA PLANTA
DE PROCESOS BASADO EN CONFIABILIDAD**

**Tutor Académico: Prof. Juan Ruilova. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2012. 82 p.**

Palabras clave: Redes de Intercambiadores de Calor, Modelos de Confiabilidad, Optimización, Costos y Punto Pinch.

Resumen. En este trabajo especial de grado se desarrolló una metodología para obtener un arreglo aproximadamente óptimo de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos sin cambio de fase, tomando en cuenta conceptos de confiabilidad. Integrando dos métodos de optimización de estos sistemas: Método Pinch y Método de Optimización Global para Redes de Intercambiadores de Calor, (Grossmann y Quesada, 1993). A este último, se le adicionaron restricciones que permiten la eliminación de lazos de calor dentro del sistema, lo cual simplifica el procedimiento adicional descrito por el método pinch para la obtención de un mínimo número de intercambiadores de calor. A esta red óptima se le aplicaron modelos de confiabilidad que permitieron establecer parámetros de decisión arreglo-costo-confiabilidad. La minimización de la función objetivo a través de un problema de optimización no lineal se pudo resolver con la utilización del complemento SOLVER que ofrece Microsoft Office Excel.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABLAS	xiii
LISTA DE ACRÓNIMOS	xiv
NOMENCLATURA	xv
INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3. ALCANCE	4
1.4. MOTIVACIÓN	5
2. CAPITULO II.....	6
2.1. Antecedentes de la Investigación	6
2.2. Conceptos básicos	7
2.2.1. Intercambiadores de calor	11
2.2.2. Intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos.....	11
2.2.3. Descripción de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos (Normas TEMA).....	12
2.2.4. 1 ^{era} Ley de la Termodinámica	12
2.2.5. 2 ^{da} Ley de la Termodinámica	13
2.2.6. Diferenciales mínimos de temperaturas para la recuperación de calor	13
2.2.7. Método Pinch	14
2.2.7.1. Significado Termodinámico del Punto Pinch	15
2.2.7.2. Diseño de las HENs	15
2.2.7.2.1.Representación de Rejilla.....	15

2.2.7.2.2. Método de Linnhoff y Flower (Problem-Table).....	17
2.2.7.2.3. División de Corrientes y Combinación de Corrientes.....	17
2.2.7.2.4. Combinación cíclica de las corriente.....	18
2.2.7.2.5. Problemas con sólo calentamiento o sólo enfriamiento (Umbrales)...	18
2.2.7.2.6. Mínimo Número de Intercambiadores de Calor.....	20
2.2.8. Elementos básicos de optimización	21
2.2.8.1. Tipos de soluciones óptimas, Himmelblau (1988).....	22
2.2.8.2. Conjuntos convexos y no convexos	23
2.2.8.3. Problemas de optimización no lineal	23
2.2.8.3.1. Términos bilineales.....	23
2.2.8.3.2. Relajación de términos bilineales	24
2.2.8.3.3. Teorema de relajación de términos bilineales.....	24
2.2.8.3.4. Términos fraccionales lineales.....	24
2.2.8.3.5. Teorema de relajación de términos fraccional.....	25
2.2.9. Algoritmo de Optimización Global para Redes de Intercambiadores de Calor.....	25
2.2.10. Integración del Método Pinch y Algoritmo de Optimización Global para Redes de Intercambiadores de Calor.....	29
2.2.11. Elementos básicos de confiabilidad	30
2.2.12. Distribuciones Paramétricas de Probabilidad.....	30
2.2.12.1. Distribución normal	31
2.2.12.2. Distribución Lognormal	31
2.2.12.3. Distribución Exponencial.....	31
2.2.12.5. Distribución Gamma	32
2.2.12.6. Distribución Binomial.....	32
2.2.13. Análisis de árbol de falla.....	32
2.2.13.1. Construcción de árbol de falla	33
2.2.14. Sistemas o modelos de confiabilidad	33
2.2.14.1. En serie.....	33
2.2.14.2. En paralelo	34

2.2.14.3. En STANDBY	35
2.2.14.4. Mixtos	35
2.2.15. Recolección de información.....	35
2.2.16. Proyecto OREDA.....	36
2.2.17. Curva de la bañera o curva de Davis.....	39
2.2.17.1. Burn-in phase (fase de arranque)	39
2.2.17.2. Useful life phase (fase de vida útil).....	39
2.2.17.3. Wear-out phase (Fase de desgaste)	39
3. CAPÍTULO III.....	40
METODOLOGÍA	40
APLICACIÓN DE MÉTODO INTEGRADO.....	40
3.1. Costos asociados al equipo.....	40
3.1.1. Intercambiador de calor con haz tubular fijo	41
3.1.2. Intercambiadores con cabezal flotante	41
3.1.3. Intercambiadores de calor con tubos en U	41
3.1.4. Ecuaciones de estimación de costos para intercambiadores de calor ..	42
3.1.4.1. Intercambiadores con cabezal flotante	42
3.1.4.2. Intercambiadores de cabezal fijo.....	42
3.1.4.3. Intercambiadores con tubos en U	43
3.2. Metodología para el Análisis Pinch.....	44
3.2.1. Curvas Compuestas.....	49
3.3. Metodología de algoritmo global de optimización no lineal para HENs modificado.....	50
3.3.1. Metodología de Optimización Global para HENs modificado	58
3.4. Metodología de confiabilidad.....	59
3.4.1. Justificación del uso de una distribución exponencial	59
3.4.2. Árbol de falla.....	59
3.4.3. Sistema de confiabilidad para el caso de estudio	59
4.1. Resultados	61

4.2. Procedimiento Estandarizado para la Optimización de Bancos de Intercambiadores de Calor basado en Confiabilidad.....	63
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES	66
ANEXOS	67
BIBLIOGRAFÍA	84

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Significado Termodinámico del Punto Pinch	16
Fig. 2. Diagrama de Rejilla	17
Fig. 3 Algoritmos para Combinación o División de Corrientes	19
Fig. 4. Conjunto no Convexo	23
Fig. 5. Conjunto Convexo	23
Fig. 6. Subsistemas en Intercambiadores de Calor	37
Fig. 7. Tabla de los Componentes de los Subsistemas en Intercambiadores de Calor.....	37
Fig. 8. Curva de la Bañera o Curva de Davis.....	39
Fig. 9 Intervalo de Temperatura.....	46
Fig. 10. Diagrama de Cascada.....	48
Fig. 11 Red Básica-Método Pinch	50
Fig. 12. Red a Optimizar-Método Integrado.....	53
Fig. 13. Red Óptima-Método Integrado.....	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de Entrada	44
Tabla 2. Temperaturas Desplazadas.....	45
Tabla 3. Temperaturas Desplazadas Ordenadas.....	46
Tabla 4. Problem-Table Aplicación Caso de Estudio	47
Tabla 5. Comparación de Parámetros de Confiabilidad y Costo para Diferentes Arreglos.....	62

LISTA DE ACRÓNIMOS

AIR	Abnormal Instrument Reading (Lectura anormal del instrumento)
AMTD	Arithmetic Mean Temperature Difference (Diferencia de temperatura media aritmética)
CEPCI	Chemical Engineering Plant Cost Index
ELP	External Leakage-Process Medium (Fuga externa del fluido de proceso)
ELU	External Leakage-Process Utility (Fuga externa del fluido de servicio)
EMAT	Exchanger Minimum Approach Temperature (Temperatura de aproximación mínima del intercambiador)
HENs	Heat Exchangers Networks (Redes de intercambiadores de calor)
HRAT	Heat Recovery Approach Temperature. (Temperatura de aproximación de recuperación de calor)
IHT	Insufficient Heat Transfer (Transferencia de calor insuficiente)
INL	Internal Leakage (Fuga interna)
LMTD	Logarithmic Mean Temperature Difference (Diferencia de temperatura media logarítmica)
MTTF	Mean Time to Failure (Tiempo medio para fallar)
NLP	NonLinear Programming (Programación no lineal)
OREDA	Offshore Reliability Data
OTH	Other (Otros)
PDE	Parameter Deviation (Desviación de parámetros)
PLU	Plugged/Choked (Atasque)
SER	Minor in-service problems (Problemas menores en servicio)
STD	Structural Deficiency (Deficiencia estructural)
TEG	Trabajo Especial de Grado
TEMA	Transfer Exchanger Manufacturer Association
UNK	Unknown (Desconocidas)

NOMENCLATURA

\dot{m}	Flujo másico	kg/s
$\Delta T_{\text{mín}}$	Diferencial de temperatura mínimo	K
ΔT_{sc}	Diferencial de temperatura mínimo, lado frío de las corrientes	K
ΔT_{sh}	Diferencial de temperatura mínimo, lado caliente de las corrientes	K
A_i	Área de transferencia de calor para cada intercambiador de calor i	m^2
CE_i	Costos de cada intercambiador de calor i	\$
C_{p_i}	Calor específico	kJ/kg. K
CU_i	Costos de cada servicio i tanto de enfriamiento (agua) como de calentamiento (vapor).	\$
h_{vg}	Entalpía de vaporización	kJ/kg
N_C	Número de corrientes calientes	
N_H	Número de corrientes frías	
N_u	Número de servicios de la red de intercambiadores de calor	
Q_i	Tasa de transferencia de calor	kW
$S_{\text{inlet}}, S_{\text{outlet}}$	Temperaturas desplazadas	K
$T_{\text{inlet}}, T_{\text{outlet}}$	Temperaturas de entrada y salida de las corrientes	K
U_i	Coeficiente global de transferencia de calor	$\text{W}/\text{m}^2. \text{K}$
u_i	Requerimientos de servicios (calentamiento o enfriamiento)	(kg/hr) (Q/hr)
WC_P	Flujo de calor específico	kJ/s. K
Λ	Tasa de falla	1/h

INTRODUCCIÓN

La calidad de los productos o el buen funcionamiento de los procesos están relacionados con obtener una temperatura específica a la salida de las redes de intercambiadores de calor, las cuales denominaremos HENs (Heat Exchangers Networks). El costo de dichas redes pueden representar un alto porcentaje del costo total del proceso, se han realizado estudios exhaustivos a través de los años que van desde establecer el mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento, número mínimo de intercambiadores, mínima área de transferencia. Todos dirigidos a obtener sistemas con mínimos costos.

El factor económico engranado con los criterios de confiabilidad y seguridad deben ser tomados en cuenta a la hora de la toma de decisiones de un diseño o un arreglo en particular.

Con este Trabajo Especial de Grado (TEG) se pretende establecer una metodología que permita obtener un arreglo de intercambiadores de carcasa y haz de tubos aproximadamente óptimo, integrando dos métodos de optimización de redes de intercambiadores de calor. Estos fueron el método de análisis pinch y método de optimización de redes con topología fija, Grossman y Quesada (1993).

A la red con área óptima obtenida se le elaboraron diferentes arreglos y se evaluó la confiabilidad de cada uno de ellos y su costo de forma tal de contar con una herramienta de toma de decisión que involucre los conceptos; arreglo óptimo- costo-confiabilidad.

CAPITULO I

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las redes de intercambiadores calor son sistemas ampliamente utilizados en la mayoría de las plantas de procesos, su importancia radica en que estos son usados para la recuperación de calor, con el fin de mejorar la eficiencia de la planta y disminuir de manera apreciable los costos por requerimientos de energía. Es por esta razón que se deben contar con adecuados criterios de selección para obtener una red con alta confiabilidad a un costo razonable.

Este TEG propone la optimización de bancos de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos en una planta de procesos basado en confiabilidad. Presentando un producto de este estudio que permita la toma de decisiones, tanto en la fase inicial del proyecto, ampliaciones o mejora a plantas, todo esto bajo el concepto de arreglo-costo-confiabilidad.

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer y describir un procedimiento estandarizado para optimizar bancos de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos sin cambio de fase en una planta de procesos, basados en confiabilidad.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una revisión bibliográfica, con el fin de establecer los aspectos conceptuales y técnicos básicos, concernientes a la ingeniería de confiabilidad y a la optimización de costos en un arreglo de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos sin cambio de fase.
2. Desarrollar una correlación mediante una función lineal o no-lineal del tipo $C = a^b + d$. A partir de las condiciones generales del proceso y costos de operación, dicha correlación tomará como variables el área de transferencia de calor, con la finalidad de ser utilizada en la formulación de la función objetivo a minimizar.
3. Incluir elementos de ingeniería de confiabilidad tales como, y no limitados a; tiempo medio para fallar, funciones generadoras de probabilidad de falla y modelo de fallas según el arreglo de intercambiadores, incorporando estos conceptos a la red obtenida en el aspecto anterior, para así seleccionar la mejor configuración.
4. Realizar un procedimiento paso a paso, para un óptimo arreglo de intercambiadores de calor de carcasa y de haz de tubos, sin cambio de fase. A partir de los resultados proporcionados por la optimización de costos y las utilización de herramientas de confiabilidad.

1.3. ALCANCE

Este TEG se enfoca en la optimización de bancos de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos en una planta de procesos, basado en conceptos de confiabilidad. Esto se cumplirá abarcando lo siguientes aspectos:

- Se recolectará información de los costos de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos, según su área.
- Se correlacionarán estos datos anteriores mediante una función objetivo lineal o no-lineal del tipo $C = a^b + d$, la cual tendrá como variables el área de transferencia de calor y las propiedades de los fluidos.
- Luego a esto se incluirán conceptos de ingeniería de confiabilidad como tiempo medio para fallar, funciones generadoras de probabilidad de falla y modelo de fallas según el arreglo de intercambiadores.
- Finalmente, toda la información anterior se utilizará para formular un procedimiento paso a paso, para la aproximación al arreglo óptimo de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos, sin cambio de fase, en función de la reducción de costos de los equipos y criterios de confiabilidad.

1.4. MOTIVACIÓN

La motivación principal de este TEG radica en aplicar los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela. De estos conocimientos adquiridos, los que más se aplicaran serán: Termodinámica, Mecánica de Fluidos, Transferencia de Calor, Diseño Conceptual, Ingeniería Económica, Procesos de Fabricación y Producción, lo más importante es la aplicación conjunta de todos estos conocimientos en el presente trabajo.

Asimismo, aunque el concepto de confiabilidad ha logrado transformar la industria, ayudando a mejorar en ella aspectos tales como; eficiencia, disminución de los tiempos de parada, mayor continuidad de producción, entre otros orientados al incremento de la producción y por ende el ingreso de las industrias, existen muy pocos estudios en nuestro país dirigidos a la aplicación de dichos conceptos en la búsqueda de un óptimo arreglo de intercambiadores de calor.

De la investigación bibliográfica realizada, no se consiguió un método que integrara el análisis pinch y el algoritmo de optimización global para redes de intercambiadores de calor Quesada y Grossmann (1993), en este TEG se logró la integración de estos métodos obteniendo los mismos resultados que los proporcionados con sólo el uso del método pinch, simplificando el trabajo producido por la eliminación de lazos de calor. Lo anterior representa una fuente de investigación adicional.

Finalmente, queremos dejar a los futuros estudiantes de la escuela de Ingeniería Mecánica un ejemplo o información valiosa del uso de dichos conocimientos en aplicaciones reales de la industria.

2. CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

En la actualidad, la constante búsqueda del desarrollo y eficiencia en materia de recursos energéticos, ha generado un esfuerzo colectivo en función de optimizar los procesos y utilizar al máximo las distintas formas de energía primaria.

Debido a la importancia que constituye el óptimo arreglo de los equipos de transferencia de calor y su evaluación a nivel económico, es primordial la búsqueda de investigaciones o avances relacionados con este aspecto. En función de esto, Yee, T., Grossmann, I. y Kravanja, Z. (1990), publicaron en la revista *Computers Chemical Engineering* un artículo bajo el nombre “*Simultaneous optimization models for heat integration I*”, el cual trata la optimización de redes de intercambiadores de calor a través de la programación no lineal mixta entera.

Luego, Grossmann, I. y Quesada, I. (1993), publicaron un artículo en la revista *Industrial Engineering Chemical Resource*, titulado “*Global optimization algorithm for heat exchanger networks*” en el cual se presenta un algoritmo para la optimización de una función objetivo que toma en cuenta los costos de una red de intercambiadores de calor con topología fija.

Ya que para el algoritmo anterior se requiere un arreglo de intercambiadores establecido, Kemp, I. (2007) en el libro “*Pinch analysis and process integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy*” el cual trata el denominado Pinch Method, presenta una herramienta que permite establecer a partir de los datos del proceso una HENs basada en la máxima recuperación de energía.

En este mismo orden de ideas, Nishida, N., Liu Y. y Lapidus, L. (1997) publicaron un artículo en la revista *AIChE Journal* con el nombre de “*Studies in chemical process design and synthesis*”, el cual habla sobre la obtención de una HEN

mediante el uso de la técnica gráfica, denominada “diagramas de contenido de calor”, donde se busca conseguir la máxima transferencia de calor entre las corrientes de proceso.

Asimismo, para el área de confiabilidad Sikos, L. y Klemeš, J. (2009) publicaron en la revista Applied Thermal Engineering el artículo titulado “*Reliability, availability y maintenance optimisation of heat exchanger networks*” describe una metodología para la optimización de HENs en el ámbito de confiabilidad y mantenimiento con el uso de herramientas computacionales, como Blocksim de ReliaSoft Corporation, el cual ofrece un demo disponible en Internet, cuya licencia se encuentra disponible por un mes.

Melinguen, D. (2010) en su Tesis de Maestría, titulada “*Life cycle cost model for condition monitoring of heat exchanger*”, de Norwegian University of Science and Technology in Trondheim, disponible en Internet, presenta un árbol de fallas para calcular la confiabilidad de un intercambiador de calor.

Finalmente, el Handbook de la Offshore Reliability Data (2002), ofrece datos de confiabilidad referentes a equipos de procesos rotativos y estáticos. Para la utilización de estos datos la norma ISO 14224, establece el manejo adecuado de la data referente a confiabilidad y mantenimiento.

2.2. Conceptos básicos

En todos los procesos industriales, es necesario el calentamiento o enfriamiento de los fluidos de proceso que se transportan de un equipo a otro o de una zona a otra. Dicho proceso se realiza en equipos especiales conocidos como intercambiadores de calor. Cuando existe un número específico de estas corrientes de procesos que deben ser calentadas o enfriadas naturalmente surge la idea de aprovechar el calor de ciertas corrientes, para calentar las corrientes que requieren mayores temperaturas, por lo tanto enfriando las primeras. Aunque, esta idea parece algo trivial, es fundamental en la disminución de costos de muchos procesos

industriales, ya que ayuda a minimizar los servicios de calentamiento y enfriamiento necesarios en el proceso. A la configuración de dichas corrientes que van a intercambiar calor, sus equipos y el arreglo de dichos equipos se le llama HEN.

Debido a su importancia a nivel industrial, se han realizado numerosos trabajos enfocados en sintetizar las HENs. Desde un punto de vista industrial el problema de síntesis de redes de intercambiadores de calor se puede formular como; dado un conjunto de corrientes que necesitan ser enfriadas, un conjunto de corrientes que necesitan ser calentadas y uno o más servicios auxiliares para calentar o enfriar. ¿Cuál es la mejor combinación de corrientes de proceso y de servicio?, de tal forma que se consiga la máxima recuperación de energía, la utilización del menor número de equipos o en general el menor costo total del proceso.

Desde el punto de vista de ingeniería, este problema de síntesis se puede tomar como un problema de optimización de una función, donde dicha función toma en cuenta no sólo el costo de los equipos de intercambio de calor, sino también los servicios auxiliares requeridos.

Las corrientes de proceso que necesitan ser calentadas se llaman corrientes frías, independientemente de cuales sean las temperaturas antes y después del intercambio de calor. Las corrientes que necesitan ser enfriadas, también independientemente de las temperaturas antes y después del intercambio de calor, se llaman corrientes calientes. Los servicios auxiliares del proceso utilizados para calentar una corriente fría se llaman servicios de calentamiento, y los utilizados para enfriar una corriente caliente de proceso se llaman servicios de enfriamiento.

Los equipos más utilizados en las HENs son los de carcasa y haz de tubos debido a su construcción resistente, su flexibilidad y la facilidad de adaptación a diferentes condiciones de operación del proceso. Dependiendo de la función que un intercambiador de calor desempeñe en el proceso se puede clasificar como un recuperador de calor, si el intercambio se produce entre dos corrientes de proceso (una caliente y otra fría). Como un calentador, si el intercambio se produce entre una

corriente fría y un servicio de calentamiento y un enfriador si el intercambio de calor tiene lugar entre una corriente caliente y un servicio de enfriamiento.

Por causa de la dificultad que genera la naturaleza combinatoria de decidir qué corrientes de proceso o de servicio deben intercambiar calor y en la secuencia que deben hacerlo, además tomando en cuenta que en un proceso industrial pueden existir docenas de corrientes a ser enfriadas o calentadas, el proceso de síntesis de HENs puede ser bastante complicado. A todo esto se le puede sumar factores como los tipos de intercambiadores a usar, las caídas de presión permitidas dentro de los equipos, cambio de fase de los fluidos de proceso, disminución de la eficacia en la transferencia de calor debido al ensuciamiento, etc. Debido a todos estos factores que afectan el diseño de una HENs y tomando en cuenta el peso que tienen estas redes sobre el costo global de los procesos industriales, la síntesis HENs continúa siendo uno de los temas más estudiados dentro del campo de la síntesis de procesos.

Los primeros intentos de síntesis de HENs aparecieron en el año 1944 y se basaron en la minimización de una función de costos a través de métodos numéricos, pero debido a la alta complejidad del problema se hizo necesario un gran número de simplificaciones que hicieron el modelo matemático manejable, pero dicho modelo seguía siendo limitado debido a que solo podía manejar un número máximo de 10 corrientes.

En el año 1960 fue cuando se reconoció la importancia de las HENs y el estudio de su síntesis fue retomado por Westbrook (1961) utilizando programación dinámica y Hwa (1965) que consideró la síntesis como un problema de programación separable. Sin embargo los verdaderos pioneros en esta área se presentaron a continuación:

Masso & Rud (1969) utilizaron un método heurístico para el desarrollo de un programa de cálculo para la síntesis de procesos con aplicaciones en HENs e hicieron la primera definición formal del problema de síntesis de HENs.

Kesler & Parker (1969) dividieron las corrientes de proceso en pequeños elementos finitos de igual tamaño que llamaron exchangelets, que permitían la transferencia de calor entre corrientes disminuyendo la complejidad del problema original.

Lee et al. (1970) Aplicaron la técnica de ramificación y acotamiento ampliamente utilizada en programación lineal y no lineal con variables enteras. El procedimiento consiste en dos operaciones básicas, la ramificación que divide el espacio de soluciones del problema en dos sub-espacios y el acotamiento que corresponde a una posible solución del problema y por lo tanto fija una cota al máximo (mínimo) valor que puede tomar la función objetivo. La idea es hacer una búsqueda rigurosa en todo el espacio de alternativas.

Kobayashi et al. (1971) perfeccionaron el trabajo de Kesler & Parker (1969), introduciendo el diagrama de contenido de calor para permitir división de corrientes.

Nishida et al. (1971) propusieron un método gráfico para obtener la estructura óptima de la red, proponiendo reglas para la obtención de la mejor red posible. El criterio de optimización era la minimización del área total de intercambio de calor.

Los trabajos de Umeda et al., Linnhoff & Flower (1978) Fueron los primeros en identificar la relación del punto de pinch con las posibilidades de recuperación de calor y junto con el trabajo de Hoffmann (1971) establecieron las bases para el desarrollo de la Tecnología Pinch.

Fue en la década 1980 donde llegó el máximo desarrollo de la síntesis de HENs, es durante esta época donde se completa el concepto de análisis pinch. Y además comienzan a desarrollarse técnicas que combinan lo mejor de los métodos termodinámicos y de optimización matemática.

En 1983 Papoulias & Grossmann utilizaron el método de transbordo para calcular el mínimo costo de servicio de la red. En ese mismo año Cerda cumplió este mismo objetivo formulándolo como un problema de transporte.

Luego en 1986 Floudas estableció una superestructura para obtener el costo mínimo de inversión.

Basados en estos dos últimos trabajos, Floudas & Ciric en 1989 desarrollaron una superestructura que permitía determinar los intercambios entre corrientes y la red con mínimo costo de forma simultánea.

Siguiendo esta línea de ideas Yee & Grossmann, en 1990 desarrollaron una superestructura, en la cual en cada etapa se postula el posible intercambio de calor entre todos los pares posibles de corrientes calientes y frías. Aunque es bastante complejo, es el método de optimización simultánea que ha tenido mayor aceptación. A partir de este surgieron en los años subsiguientes técnicas para disminuir el esfuerzo computacional de este método.

En 1993 Quesada & Grossmann desarrollaron un método que se basa en un algoritmo de optimización global para una HENs con una topología ya establecida.

A partir de la década 1990 hasta hoy estos métodos han permanecido como la base conceptual más importante en las técnicas de optimización de estos sistemas.

2.2.1. Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo que facilita la transferencia de calor de una corriente de fluido a otra. Se pueden clasificar según el tipo de construcción o según su servicio.

En un intercambiador de calor cuando un fluido se calienta o enfría lo hace a expensas de que otro fluido le ceda o sustraiga calor, respectivamente. En base al tipo de proceso que ocurre en uno de los fluidos, se clasifican a los intercambiadores como calentadores, enfriadores, evaporadores, condensadores, etc.

2.2.2. Intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos

Los intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos están compuestos por tubos cilíndricos, montados dentro de una carcasa también cilíndrica, con el eje de los

tubos paralelos al eje de la carcasa. Un fluido circula por dentro de los tubos, y el otro por el exterior (fluido del lado de la carcasa). Los componentes principales son descritos en el Anexo 1.

2.2.3. Descripción de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos (Normas TEMA)

Un intercambiador de calor de carcasa y haz de tubos conforme a la norma TEMA (Transfer Exchanger Manufacturer Association) se identifica con tres letras, el diámetro en pulgadas de la carcasa y la longitud nominal de los tubos en pulgadas.

La primera letra es la indicativa del tipo de cabezal estacionario. La segunda letra es la indicativa del tipo de carcasa. La tercera letra nos indica el tipo de cabezal del extremo posterior (Anexo 2).

Es necesario resaltar, que el alcance de este TEG sólo se limita a obtener la red óptima del proceso, combinando parámetros que permitan la máxima recuperación de energía, los mínimos requerimientos de servicios de calentamiento y enfriamiento, para obtener así el mínimo costo de inversión, junto con el costo de los servicios para un año cero. El diseño térmico, hidráulico y mecánico de los equipos no están contemplados en los objetivos de este TEG.

2.2.4. 1^{era} Ley de la Termodinámica

La primera ley de la termodinámica, también conocida como principio de conservación de la energía, para un sistema estacionario como en el caso de los intercambiadores de calor, comprende sólo transferencia de calor y no interacciones de trabajo. Entonces, para estos equipos la primera ley de la termodinámica requiere que la tasa de transferencia de calor desde el fluido caliente sea igual a la tasa transferencia de calor hacia el fluido frío; es decir,

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot (T_{c,outlet} - T_{c,inlet})$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h \cdot Cp_h \cdot (T_{h,outlet} - T_{h,inlet})$$

En donde los subíndices c y h se refieren a los fluidos frío y caliente, respectivamente,

$\dot{m}_c, \dot{m}_h =$ flujo másico de corriente fría y caliente

$Cp_h, Cp_c =$ Capacidad calorífica

$T_{(c,/h),inlet/outlet} =$ Temperaturas de entrada y salida de los fluidos

2.2.5. 2^{da} Ley de la Termodinámica

La primera ley como principio básico no restringe la dirección de un proceso, así que satisfacerla no asegura que en realidad ocurra, por lo tanto para que este suceda se debe satisfacer tanto la primera como la segunda ley.

La segunda ley de la termodinámica enuncia que los procesos van en cierta dirección y no en la opuesta. Para la transferencia de calor, se tiene que el flujo de calor es unidireccional, desde los cuerpos de mayor temperatura a los de menor temperatura, hasta lograr un equilibrio térmico.

2.2.6. Diferenciales mínimos de temperaturas para la recuperación de calor

Dentro del diseño de las HENs, se encuentra métodos de aproximación de temperaturas, dos diferencias de temperatura mínimas (ΔT_{\min}): HRAT y EMAT.

Heat Recovery Approach Temperature (HRAT), establece el límite sobre la cantidad de calor que se quiere recuperar en el sistema. Es la mínima diferencia de temperaturas entre las curvas compuestas de las corrientes, la que determina los mínimos requerimientos de servicios. En consecuencia, un incremento de HRAT corresponde a separar las curvas.

Exchanger Minimum Approach Temperature (EMAT), establece el límite inferior de la diferencia de temperatura que debe existir entre las corrientes frías y calientes de cada intercambiador de la red, para un dimensionamiento razonable.

En general, $HRAT > EMAT$.

Se debe tomar en consideración, que en el caso del método pinch una pequeña violación del ΔT_{\min} , puede ser permitida para evitar la colocación de más unidades de intercambiadores, en este caso el EMAT será reducido mientras que el HRAT seguirá igual. Este es un parámetro importante en la aplicación del método pinch que se explicará más adelante.

2.2.7. Método Pinch

El Análisis Pinch es un método que permite obtener una red de intercambiadores de calor, determinando la estructura que corresponda a los mínimos requerimientos de energía de la red, adicionando después algunos pasos para determinar el número mínimo de intercambiadores de calor.

Este método provee una estrategia que permite generar e identificar las redes de intercambio calórico que minimizan tanto el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento (costo operativo), como el área de intercambio y el número de unidades (costo de inversión o costo capital fijo).

Las corrientes que intervienen en el proceso se pueden clasificar como frías o calientes, esta clasificación no se basa en la temperatura de dichas corrientes, sino en la tarea que hay que realizar sobre ellas.

Para el uso de este método, inicialmente se deben tener los siguientes datos:

1. Un conjunto de corrientes calientes y un conjunto de corrientes frías.
2. Temperaturas de entrada y salida de cada una de las corrientes.
3. Calor específico, así como el flujo másico de cada una de las corrientes. En su defecto, el flujo de calor específico $WC_p = \dot{m} \cdot Cp$.

Se puede decir que el problema a resolver consiste en combinar las corrientes de la forma más conveniente, aprovechando la carga térmica de cada una, de forma que estas alcancen sus especificaciones de salida, detallando entre otras cosas, las

temperaturas intermedias, consumos de agua de enfriamiento y vapor para el calentamiento, si los hubiese. Todo esto con el fin de que el costo sea el mínimo.

2.2.7.1. Significado Termodinámico del Punto Pinch

El punto pinch es el mínimo ΔT entre todas las corrientes frías y calientes del sistema, divide el sistema en dos regiones termodinámicamente diferentes, un sumidero de calor (temperaturas por encima del punto pinch) y una fuente de calor (temperaturas por debajo del punto pinch), se ha probado que a través del punto pinch no debe existir transferencia de calor (Fig. 1.). Esto quiere decir, que no se debe transferir calor desde las corrientes de arriba del pinch hacia las corrientes de abajo del mismo, ya que de hacerlo debe incrementarse exactamente la misma cantidad el consumo de ambos servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, por encima del mínimo requerido.

La utilización del método pinch es muy útil para el diseño de HENs, ya que descompone el problema en dos sub-problemas, además de indicar la región donde la transferencia de calor entre las corrientes está más restringida, en el pinch o en puntos cercanos a este. Cuando existen múltiples servicios de calentamiento y enfriamiento en la red, podrían presentarse casos con múltiples puntos pinch, la descomposición de este problema es presentada con detalle en Smith (2005), no es objeto de este trabajo.

2.2.7.2. Diseño de las HENs

2.2.7.2.1. Representación de Rejilla

Para el diseño de las HENs, es conveniente representarlas mediante un diagrama de rejilla (Fig. 2.). Las corrientes del proceso son dibujadas como líneas horizontales, la identificación o número de la corriente es mostrada en recuadros. Las corrientes calientes son dibujadas en el extremo superior, de izquierda a derecha y las frías de derecha a izquierda. Las temperaturas de entrada y salida se colocan en la línea correspondiente a la corriente, en el orden correcto. Los WC_p son mostrados en una columna al final de las líneas. Los intercambiadores son dibujados como dos

círculos conectados con una línea vertical, que enlazan las corrientes que están intercambiando calor. Los calentadores y enfriadores son dibujados con un sólo círculo. Las cargas de los intercambiadores usualmente son colocadas en la parte inferior del intercambiador.

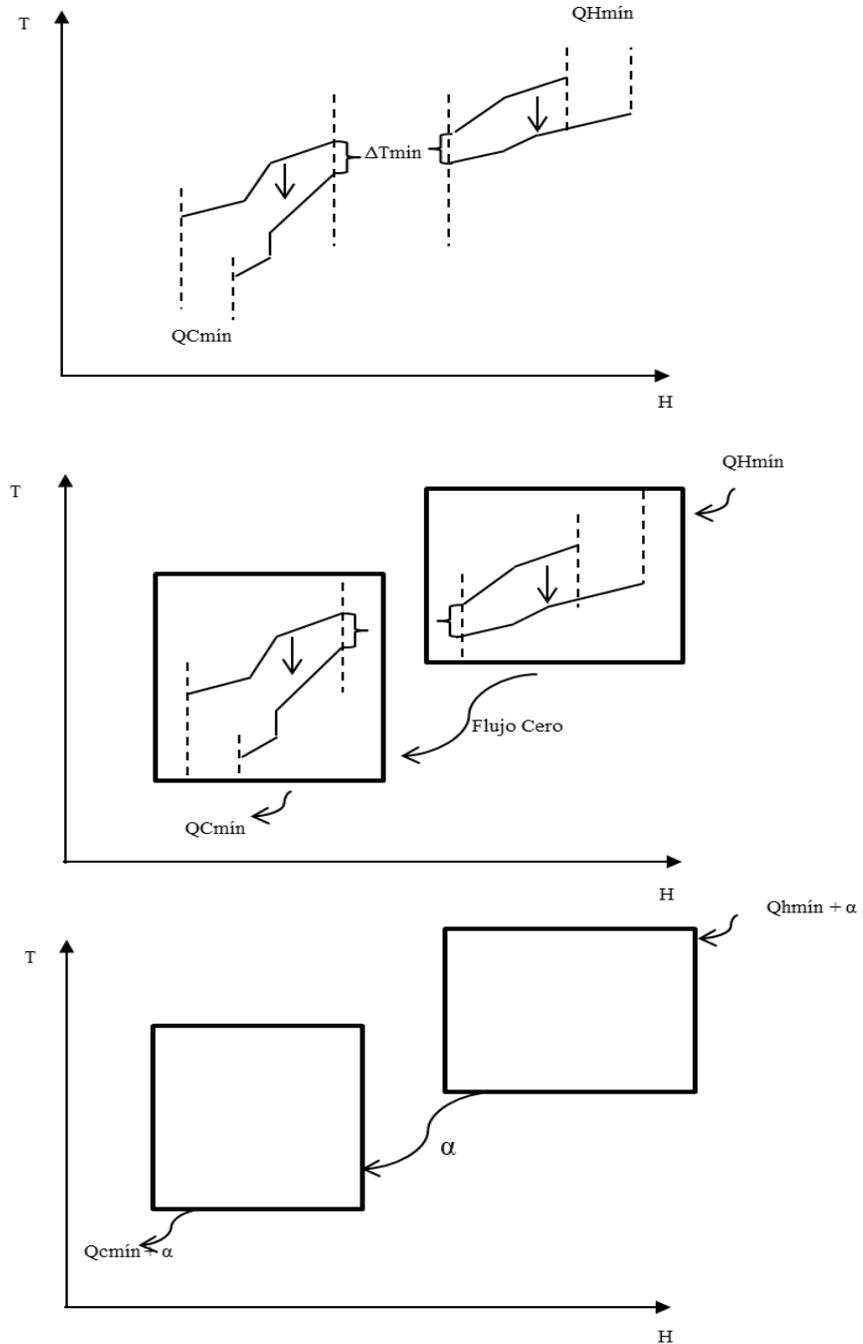


Fig. 1. Significado Termodinámico del Punto Pinch

2.2.7.2.2. Método de Linnhoff y Flower (Problem-Table)

El método de Linnhoff y Flower denominado *problem-table* desarrollado en 1978, tiene como función determinar las temperaturas pinch, para las corrientes frías y calientes, así como los mínimos requerimientos de servicios. De todas las metodologías esta es la preferida. El procedimiento es descrito en detalle en el capítulo de metodología.



Fig. 2. Diagrama de Rejilla

2.2.7.2.3. División de Corrientes y Combinación de Corrientes

Con el objetivo de lograr la máxima recuperación de energía, a menudo se requiere la división de corrientes en ramificaciones paralelas, esto ocurre para casos con corrientes múltiples. Para esto, un conjunto de reglas guías son establecidas, basándonos en el trabajo “Pinch Method Desing” de Linnhoff y Hindmarsh (1983).

División de Corrientes

Para la correcta combinación de las corrientes en el diseño del pinch debemos cumplir inicialmente con el criterio del flujo de calor específico, es decir:

Arriba del pinch, (lado caliente), $WC_{pH} \leq WC_{pC}$

Abajo del pinch, (lado frío), $WC_{pH} \geq WC_{pC}$

Asimismo, se debe establecer adicionalmente que:

Arriba del pinch (lado caliente), $N_H \leq N_C$

Abajo del pinch (lado frío), $N_H \geq N_C$

Donde, N_H es igual al número de corrientes calientes, incluyendo ramificaciones paralelas que se hayan establecido inicialmente. De forma equivalente, N_C para corrientes frías.

Finalmente, los criterios básicos para la división de corrientes pueden ser resumidos y establecidos por medio de los algoritmos mostrados (Fig. 3.).

Adicionalmente, puede decirse que la división de corrientes:

1. A menudo es necesaria para obtener el diseño de red con máxima recuperación de calor.
2. Si la división de la corriente no puede llevarse a cabo, por condiciones del proceso u otro motivo, se puede llevar a cabo una combinación de corrientes cíclica.

2.2.7.2.4. Combinación cíclica de las corrientes

En algunos casos existen corrientes que no pueden ser divididas, ya sea por razones del proceso u otro motivo. En estos casos, el método pinch no puede satisfacerse del todo. Sin embargo, en función de obtener una solución viable desde el punto de vista energético y económico, es posible recurrir a una técnica llamada combinación cíclica. Esta consiste en colocar una serie de intercambiadores de forma cíclica. El tamaño de cada combinación de las corrientes será determinado por el ΔT_{\min} , como restricción. En este caso se debe tener en cuenta que no se obtendrá el mínimo número de intercambiadores, el incremento del costo adicional de los intercambiadores debe ser contrastado con el ahorro de energía obtenido.

2.2.7.2.5. Problemas con sólo calentamiento o sólo enfriamiento (Umbrales)

Los problemas que muestran sólo uno de los requerimientos de servicios, calentamiento o enfriamiento (pero, no ambos) sobre el rango de diferencia de temperatura mínima establecida, son llamados problemas umbrales.

El diseño de una HENs para un problema umbral normalmente comienza en el extremo más restringido. El problema puede ser tratado como la mitad de un

problema pinch corriente. El procedimiento para el diseño de este problema junto con el de combinación cíclica es discutido por Smith (2005) y IChemE (1994), y no será desarrollado en este trabajo.

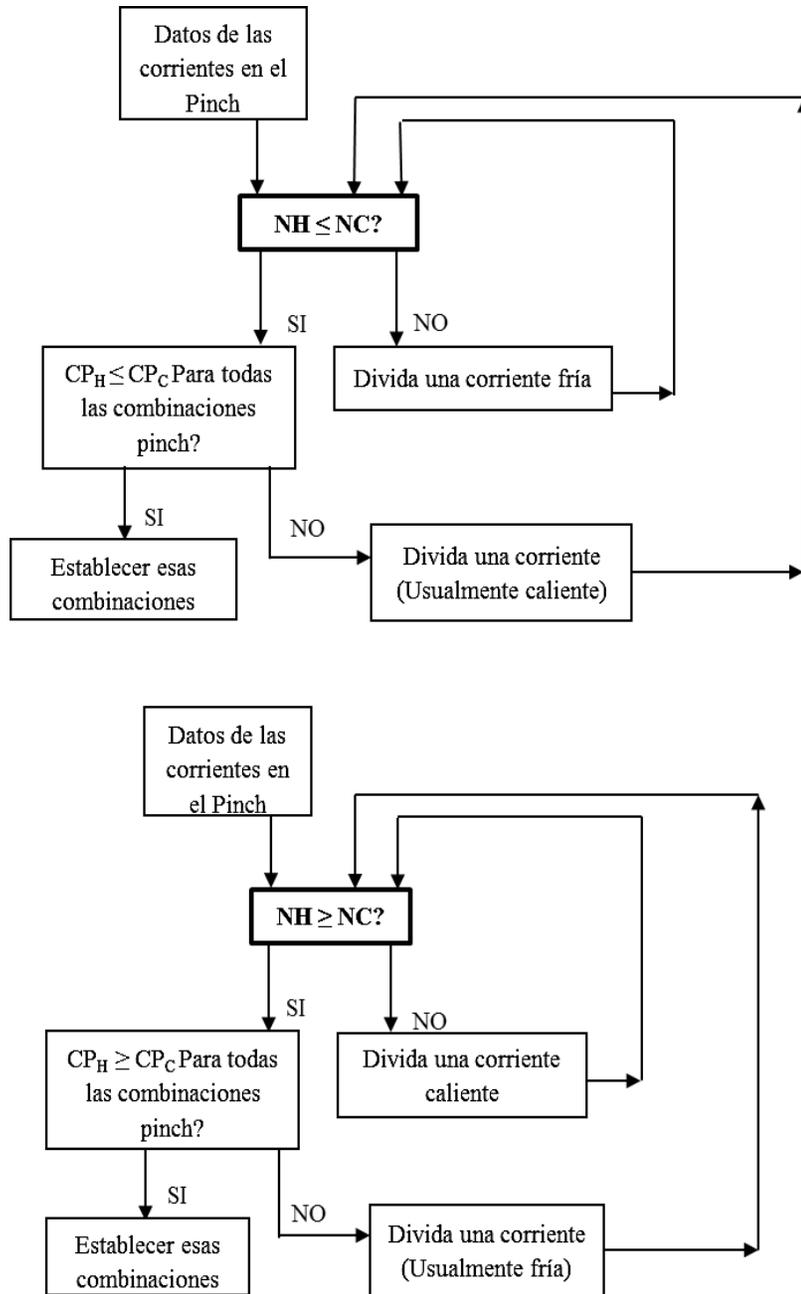


Fig. 3 Algoritmos para Combinación o División de Corrientes

2.2.7.2.6. Mínimo Número de Intercambiadores de Calor

Uno de los objetivos principales del método pinch es obtener una red con la máxima recuperación de energía y en consecuencia los mínimos requerimientos de servicios de calentamiento y enfriamiento.

El diseño óptimo será el que tenga el costo total más bajo, tomando en consideración el costo capital del sistema y el costo de operación. El número de intercambiadores en la red determinará los costos inversión.

Aplicando el método pinch a una red, podemos obtener varias configuraciones. Se debe notar que estas no son necesariamente las óptimas, ya que el método divide el sistema en dos subsistemas, por lo cual se deben sumar los intercambiadores de ambos subsistemas, por lo general ese número de equipos no es el mínimo.

Debe existir entonces un criterio, que permita hallar el mínimo número de intercambiadores, Hoffmann (1971), estableció que el número mínimo de intercambiadores, para redes simples esta dado por:

$$N_{\text{mín intercambiadores}} = N - 1$$

Donde,

$N_{\text{mín intercambiadores}}$: Número mínimo de intercambiadores requeridos, incluyendo calentadores y enfriadores.

N : Número de Corrientes, incluyendo los servicios.

Para redes más complejas, una expresión más general es la siguiente:

$$N_{\text{mín intercambiadores}} = N + N_u - 1$$

N_u : Número total de servicios de calentamiento y enfriamiento

En consecuencia, si al aplicar esta fórmula y compararla con la red en estudio, esta resulta tener más número de intercambiadores, será debido a la presencia de lazos de calor en el sistema.

Un lazo existe, cuando un camino cerrado puede ser hallado a través de la red. La presencia de un lazo indica que se puede reducir el número de equipos en la red.

En resumen, para obtener un diseño de red óptimo, se debe:

1. Comenzar con un diseño para la máxima recuperación de calor. El número de intercambiadores requeridos será igual o menor que el número para la máxima recuperación de energía.
2. Identificar los lazos en la red. Empezando con el lazo con menor carga térmica, romper el lazo para adicionar o sustraer calor.
3. Verificar que la diferencia de temperatura mínima establecida, no sea incumplida. De ocurrir esto, se debe restaurar el $\Delta T_{\text{mín}}$.
4. Estimar el costo total.
5. Repetir el proceso eliminando un lazo diferente de la red (de haberlo) hasta encontrar el costo mínimo de la red.

2.2.8. Elementos básicos de optimización

Se puede considerar como una herramienta cuantitativa de conceptualización y análisis, que permite resolver problemas de toma de decisiones de una manera sistemática, seleccionando los valores del conjunto de variables de decisión interrelacionadas a través de la maximización o minimización de una función objetivo que cuantifica la calidad de la decisión a tomar bajo restricciones que pueden limitar la selección de valores para las variables decisión.

Considerando el problema de optimización (P), Himmelblau (1988)

Minimizar $f(x)$

Sujeto a: $h_i(x) = 0$ $i = 1, 2, \dots, m$

$g_j(x) \leq 0$ $j = 1, 2, \dots, r$

$x \in D$

Donde f es una función que depende de las variables (factores) de decisión y que puede tener soluciones dentro del espacio limitado por las restricciones $h_i(x)$ y $g_j(x)$ impuestas por las variables o factores de decisión. Así, en términos

matemáticos, f es una función que va de \mathbb{R}^n a los números reales es decir $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ y D es un subconjunto de \mathbb{R}^n .

Se dice que un punto $x^* \in \mathbb{R}^n$ es un punto factible del problema (P) si satisface todas y cada una de las restricciones del problema, es decir, está dentro del espacio solución.

2.2.8.1. Tipos de soluciones óptimas, Himmelblau (1988)

Dentro de las soluciones óptimas que se pueden obtener se encuentra la global, que es la mejor solución del problema de interés, y la local, la cual dentro de una región pequeña del espacio solución es la mejor.

Sea $f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ y considerado el problema (P), donde $D \subseteq \mathbb{R}^n$, a un punto x^* que satisface:

$$f(x^*) \leq f(x) \forall x \in D$$

Se le llama solución óptima global. Esto quiere decir que el valor de la función en el punto x^* tendrá el valor mínimo en comparación con los demás puntos del espacio solución.

Para definir la solución óptima local primero es necesario definir la ε -vecindad. Dado un punto $x \in \mathbb{R}^n$ y un escalar $\varepsilon \in \mathbb{R}$ y además $\varepsilon \geq 0$, se denomina ε -vecindad de x al siguiente conjunto.

$$N_\varepsilon(x) = \{y \in \mathbb{R}^n; \|y-x\| \leq \varepsilon\}$$

Considerando al problema (P), si $x^* \in D$ y si existe una ε -vecindad $N_\varepsilon(x^*)$, esto es alrededor de x^* , tal que:

$$f(x^*) \leq f(x) \forall x \in D \cap N_\varepsilon(x^*)$$

Entonces x^* es llamado un punto óptimo local del problema (P), en este caso, el valor de f en el punto x^* es el mínimo valor encontrado dentro de un pequeño espacio de soluciones.

2.2.8.2. Conjuntos convexos y no convexos

Un conjunto convexo juega un papel importante en la optimización con restricciones. Un conjunto de puntos convexos existe si, para cualesquiera dos puntos en una región, x_a y x_b todos los puntos del segmento de la línea recta que une a los puntos x_a y x_b están dentro del conjunto. (Fig. 5).

Un conjunto es no convexo cuando, si al unir cualesquiera dos puntos de la región, x_a y x_b con un segmento de recta alguno de los puntos de este segmento se encuentra fuera de la región.(Fig. 4).

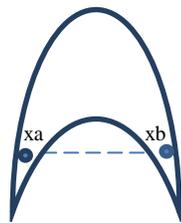


Fig. 4. Conjunto no Convexo

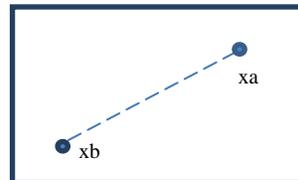


Fig. 5. Conjunto Convexo

2.2.8.3. Problemas de optimización no lineal

Se dice que un problema de optimización no es lineal si, dentro de la función objetivo o en cualquier de las restricciones a las que está sujeto, se encuentran términos que involucren la multiplicación, división, potenciación o una combinación de las variables de decisión.

2.2.8.3.1. Términos bilineales

Se denomina termino bilineal a aquel que involucra la multiplicación de dos variables. La importancia de este tipo de términos radica en la no convexidad de los problemas de optimización que los contienen, ya sea en la función objetivo o en alguna de las restricciones; esto se traduce en:

- Múltiples soluciones óptimas locales.
- El no poder asegurar que la mejor solución disponible sea el óptimo global.

2.2.8.3.2. Relajación de términos bilineales

El tener conjuntos no convexos implica tener problemas al momento de obtener el punto de solución óptima global, la razón deriva de la forma de búsqueda del resolvidor, generalmente realiza una búsqueda lineal para quedarse con una solución óptima local al no explorar todo el conjunto, la relajación de los conjuntos no convexos a un conjunto mayor convexo, ayuda a establecer límites estrictos de la función objetivo, mas allá de los cuales no existen soluciones factibles.

2.2.8.3.3. Teorema de relajación de términos bilineales

$$\varphi_{ij}^{bl}(x_i, x_j) = \text{Max}[x_j^L x_i + x_i^L x_j - x_i^L x_j^L, x_j^U x_i + x_i^U x_j - x_i^U x_j^U]$$

Esta es la envoltura convexa del término bilineal $x_i x_j$, sobre el rectángulo

$$\Omega_{ij} = \{(x_i, x_j) \in R^2: x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, x_j^L \leq x_j \leq x_j^U\}$$

Los superíndices L y U, indican los valores inferiores y superiores, respectivamente, de las variables sobre las que se están aplicando la relajación.

Algo similar puede hacerse para encontrar la envoltura cóncava.

La relajación del conjunto a través de un término bilineal arroja 4 nuevas restricciones relativas de las cuales se utilizaron 2. Haciendo la sustitución del término por la nueva variable $BL_{i,j}$; se tiene un problema no lineal sobre un conjunto relajado convexo.

2.2.8.3.4. Términos fraccionales lineales

Se denomina término fraccional a aquel que involucra la división de dos variables. Estos términos también pueden generar problemas a la hora de buscar el óptimo global.

2.2.8.3.5. Teorema de relajación de términos fraccional

Para realizar una relajación de términos fraccionales se introduce una variable z_{ij} con la cual se sustituirán los valores de x_i/x_j .

$$\varphi_{ij}^{lf}(x_i, x_j) = \text{Max} \left[\frac{x_i}{x_j^L} + x_i^U \left(\frac{1}{x_j} - \frac{1}{x_j^L} \right), \frac{x_i}{x_j^U} + x_i^L \left(\frac{1}{x_j} - \frac{1}{x_j^U} \right) \right]$$

Es la envoltura convexa del término fraccional x_i/x_j sobre el rectángulo:

$$\Omega_{ij} = \{(x_i, x_j) \in R^2: x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, x_j^L \leq x_j \leq x_j^U\}$$

Al igual, esto se puede realizar para la envoltura cóncava.

La relajación del conjunto a través de un término fraccional arroja 4 nuevas restricciones relativas de las cuales se utilizaron 2. Haciendo la sustitución del término por la nueva variable $lf_{i,j}$; ahora se tiene un problema no lineal sobre un conjunto relajado convexo.

2.2.9. Algoritmo de Optimización Global para Redes de Intercambiadores de Calor

Este trabajo fue realizado por Grossmann, I. y Quesada, I., en Pittsburgh Pennsylvania en 1993. Este es un método matemático que se basa en la optimización de una HENs con topología fija, es decir con una configuración definida.

En este trabajo los autores se enfocan en la minimización de los costos de las HENs. Deciden tomar esta minimización como un problema de programación no lineal (P), donde la función objetivo a minimizar es la siguiente:

$$\min C = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{U_i} \frac{Q_i}{\Delta T_i} + \sum_{i \in EU} d_i Q_i$$

Q_i : Corresponde al calor transferido por el intercambiador i .

ΔT_i : Es la fuerza motriz o diferencia de temperatura en el intercambiador i .

U_i : Es el coeficiente global de transferencia de calor para el intercambiador i .

c_i : Es el coeficiente de costo de área del intercambiador i .

d_i : Es el costo de los servicios de calentamiento y enfriamiento.

Esta función objetivo a su vez está sujeta a un conjunto de restricciones las cuales están basadas en las leyes de la termodinámica, además de algunas consideraciones que provienen de la experiencia como la EMAT.

Con referencia a los Q_i , para cumplir la primera ley de la termodinámica, se realiza un balance de energía para cada corriente que intercambia calor en los diferentes equipos y dicho calor debe ser el mismo para ambas. La segunda ley establece que todos los valores de Q_i deben ser mayores o iguales a cero, lo que no permite que exista transferencia de calor de una corriente de baja temperatura a una de alta temperatura.

Para los ΔT_i se mantiene que deben ser mayores o iguales al EMAT. Asimismo, los autores utilizan la diferencia de la temperatura media aritmética, Arithmetic Mean Temperature Difference (AMTD, por sus siglas en inglés) y no la diferencia media logarítmica, Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD, por sus siglas en inglés) para el cálculo de los ΔT_i .

Como se puede ver en la función objetivo los autores asumen el costo de área de los intercambiadores como una relación lineal.

La dificultad para resolver este problema (P) radica en la no convexidad de la función objetivo ya que esta puede tener múltiples mínimos locales. Además, estos mínimos no necesariamente corresponden a un punto extremo de la región factible ya que la función objetivo es la suma de funciones fraccionales lineales.

Para resolver este problema los autores reformulan el problema (P), introduciendo una nueva variable A_i , que representa un área a escala para cada

intercambiador (producto del área con el coeficiente global de transferencia de calor). Con esta reformulación establecen nuevas restricciones. El problema (P) ahora queda reformulado como el problema (P1):

$$\min C = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{U_i} A_i + \sum_{i \in EU} d_i Q_i$$

En el cual las restricciones adicionales serían:

$$A_i \Delta T_i - Q_i \leq 0$$

Con esta reformulación la no convexidad aparece en el problema (P1) en forma de términos bilineales en la nueva restricción. En pro de desarrollar un límite inferior válido los autores remplazaron dicha restricción por la función lineal de sobre-estimación desarrollada por McCormick (1976). Estas pueden ser expresadas como un conjunto de dos desigualdades para cada intercambiador:

$$A_i \Delta T_i \leq A_i^L \Delta T_i + A_i \Delta T_i^U - A_i^L \Delta T_i^U$$

$$A_i \Delta T_i \leq A_i^U \Delta T_i + A_i \Delta T_i^L - A_i^U \Delta T_i^L$$

Generando sobre-estimadores del problema que se pueden resolver por programación no lineal. Sin embargo, los límites obtenidos por este método no son muy precisos. Por esta razón un nuevo conjunto de funciones sub-estimadoras convexas no lineales son propuestas basándose en el trabajo anterior, y pueden ser generadas del problema original (P) sobre los términos lineales fraccionales de la función objetivo. Expresando estos sub-estimadores en forma de desigualdades nos quedan:

$$\frac{Q_i}{\Delta T_i} \geq \frac{Q_i}{\Delta T_i^U} + Q_i^L \left(\frac{1}{\Delta T_i} - \frac{1}{\Delta T_i^U} \right)$$

$$\frac{Q_i}{\Delta T_i} \geq \frac{Q_i}{\Delta T_i^L} + Q_i^U \left(\frac{1}{\Delta T_i} - \frac{1}{\Delta T_i^L} \right)$$

Ahora, teniendo este conjunto de nuevas restricciones para los términos bilineales y fraccionales de los problemas (P) y (P1) un problema (NLP_L) de sub-estimación no lineal convexo para el problema (P) puede ser definido como:

$$\min C = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{U_i} A_i + \sum_{i \in EU} d_i Q_i$$

Sujeto a,

$$A_i \geq \frac{Q_i}{\Delta T_i^U} + Q_i^L \left(\frac{1}{\Delta T_i} - \frac{1}{\Delta T_i^U} \right)$$

$$A_i \geq \frac{Q_i}{\Delta T_i^L} + Q_i^U \left(\frac{1}{\Delta T_i} - \frac{1}{\Delta T_i^L} \right)$$

$$Q_i \leq A_i^L \Delta T_i + A_i \Delta T_i^U - A_i^L \Delta T_i^U$$

$$Q_i \leq A_i^U \Delta T_i + A_i \Delta T_i^L - A_i^U \Delta T_i^L$$

$$\Delta T_i \geq \frac{Q_i}{A_i^U} + Q_i^L \left(\frac{1}{A_i} - \frac{1}{A^U} \right)$$

$$\Delta T_i \geq \frac{Q_i}{A_i^L} + Q_i^U \left(\frac{1}{A_i} - \frac{1}{A^L} \right)$$

Límites válidos son generados para Q_i , A_i y ΔT_i , definiendo así un conjunto de áreas para cada intercambiador y las no convexidades del problema original han sido sustituidas por estas funciones de aproximación convexa. Este problema mantendrá las restricciones definidas en la sección anterior, referente a primera ley, segunda ley y ΔT .

Aunque el problema (NLP_L) provee en general un preciso límite inferior del problema original (P1), podría existir una brecha entre el valor obtenido de C_L por el problema (NLP_L) y el valor obtenido de la función C , los autores sugieren aplicar el método de ramificación y acotamiento para asegurar la solución óptima global.

2.2.10. Integración del Método Pinch y Algoritmo de Optimización Global para Redes de Intercambiadores de Calor

Una vez establecidas las características de los dos métodos. Se presenta la idea de combinar ambos para aprovechar sus ventajas. En primer lugar, en el método pinch se presenta una metodología sencilla para calcular el arreglo de la red, intentando mantener un valor mínimo de servicios en primer lugar y garantizando la máxima recuperación de energía. Luego, este contempla pasos para obtener el mínimo número de unidades, este mínimo número de unidades dependerá de la eliminación de los lazos de calor del sistema, esto es un proceso largo, que a menudo requiere experticia por parte del diseñador.

El método de Grossmann y Quesada como se explicó es un método matemático de optimización en donde la función objetivo son los costos, en el cual se busca la mejor combinación de servicios y áreas de intercambiadores de calor, para obtener el valor mínimo de costos. Es decir, que este método toma en cuenta en su solución la importancia de cada costo en particular. La deficiencia básica de este método es que no nos ayuda a establecer una configuración de la HEN, ya que este se diseñó para redes con topología establecida. Aunque, los autores presentaron un método especializado en el cual no sólo se encuentra la topología de red óptima, sino también tomando en cuenta los costos de cada equipo y de las utilidades que optimizan los costos de la red final. En particular, este método considera de manera meticulosa cada uno de los factores que intervienen en la diseño de una HENs óptima, pero este método requiere resolver problemas de programación lineal, programación no lineal y programación mixta no lineal entera, lo cual posee cierto grado de dificultad.

En este TEG se propone combinar estos dos métodos, el método pinch el cual permite establecer una red factible con máxima recuperación de calor, que garantiza el mínimo de servicios necesarios en el sistema. Luego, a esa red se le aplicará el método de Grossman y Quesada (con ciertas modificaciones dadas por la integración

de los métodos), con el fin de establecer la red óptima evitando la aplicación de eliminación de lazos de calor utilizada por el método pinch.

2.2.11. Elementos básicos de confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que un equipo o componente pueda ejecutar una función requerida bajo condiciones establecidas por un periodo de tiempo determinado.

Para HENs, la confiabilidad es la probabilidad de que la red pueda cumplir con su función satisfactoriamente por al menos un período de tiempo dado, cuando está operando bajo ciertas condiciones Sikos, L. y Klemeš, J. (2009).

La confiabilidad se puede expresar como una función dependiente del tiempo y su forma más simple es:

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{1}{MTTF}t}$$

Dónde,

t: Es el tiempo de la misión (horas, días, semanas, meses, años)

λ : La tasa de falla.

MTTF= $1/\lambda$ Mean Time to Failure (Tiempo medio para fallar)

Esta ecuación es válida para tasas de falla constantes.

2.2.12. Distribuciones Paramétricas de Probabilidad

Las distribuciones paramétricas de probabilidad, son funciones matemáticas teóricas, que relacionan los diversos valores probables que puede tomar una variable aleatoria, con la probabilidad de ocurrencia de cada una de ellas. Describen la forma en la que se espera que se comporte una variable.

Existen muchas distribuciones paramétricas de probabilidad, de amplio uso en todo tipo de análisis de confiabilidad, entre estas tenemos:

2.2.12.1. Distribución normal

Es una de las más conocidas y se reconoce por su forma de campana simétrica, donde el valor más probable de la variable es el valor central, promedio o media de la distribución. La variable podría tomar algún valor por encima o por debajo de la media pero se espera que al menos el 68 % de los posibles valores se encuentren dentro del rango de una desviación estándar alrededor de la media.

2.2.12.2. Distribución Lognormal

Esta distribución es ampliamente usada para variables que muestran valores que tienen un alto sesgo o tendencia; muchos valores están cerca del valor mínimo. Los parámetros de la distribución Lognormal son la media logarítmica μ , y la desviación estándar logarítmica σ . Muchas variables físicas y procesos de deterioro pueden ser representados con la función lognormal. Las variables aleatorias que resultan de la multiplicación o producto de varias variables aleatorias siguen esta distribución.

2.2.12.3. Distribución Exponencial

Es ampliamente usada en análisis de confiabilidad, como distribución de la variable aleatoria (tiempo entre fallas) de equipos o sistemas. Describe la cantidad de tiempo que transcurre entre eventos. El parámetro de distribución exponencial es λ . La característica fundamental de las variables que siguen la distribución exponencial es que el número de ocurrencias de eventos por unidad de tiempo es aproximadamente constante.

2.2.12.4. Distribución de Weibull

Es muy útil para estudios del tiempo de vida o tiempo para la falla de componentes mecánicos. El número de ocurrencia de eventos por unidad de tiempo

no permanece necesariamente constante, la tasa de ocurrencia de eventos puede crecer o decrecer con el tiempo, es un modelo de distribución bastante flexible el cual es descrito por dos parámetros.

2.2.12.5. Distribución Gamma

Es muy flexible para modelar probabilidades basadas en estadísticas bayesianas; se aplican a un amplio rango de variables físicas y es similar a una gran cantidad de otras distribuciones como la lognormal, exponencial, entre otras. Es considerada como la distribución del tiempo que transcurre hasta la ocurrencia de un número particular de eventos, tienen gran aplicabilidad en el análisis de confiabilidad.

2.2.12.6. Distribución Binomial

Permite estimar el número de éxitos que se alcanzarán en un número específicos de intentos, dada una probabilidad de éxito por intento determinado. Los parámetros de la distribución: probabilidad (p) y número de ensayos (n).

2.2.13. Análisis de árbol de falla

El análisis de causas de fallas es un método riguroso para la solución de muchos problemas en cualquier tipo de falla, que se basa en un proceso lógico en el cual se diseñan arboles de fallas. Estos consisten en una representación visual de los eventos que llevan a una falla, para así identificar de manera fácil y fluida las causas originales de esta.

Un árbol de falla es un diagrama de eventos en el cual se usan las llamadas puertas lógicas:

La puerta lógica “y” indica que para que una falla ocurra deben ocurrir otros eventos en simultáneo.

La puerta lógica “o” indica que para que una falla ocurra deben presentarse un evento u otro. Es decir, que con que uno de dos eventos que ocurran se genera la falla.

2.2.13.1. Construcción de árbol de falla

1. Definir las condiciones de falla y escribir el evento más importante en la parte superior del diagrama.
2. Utilizando información técnica y juicios profesionales, determinar las posibles razones por la que ocurre la falla.
3. Detallar cada elemento con puertas adicionales a niveles más bajos. Considere la relación entre los eventos con las puertas lógicas.
4. Finalizar y verificar el diagrama completo. La cadena sólo puede terminar en una falla o evento principal.
5. Calcular la probabilidad de cada ocurrencia o cada elemento de nivel bajo y calcular la probabilidad estadística de abajo hacia arriba.

2.2.14. Sistemas o modelos de confiabilidad

2.2.14.1. En serie

Es aquella en que todos los equipos deben funcionar adecuadamente para que funcione el sistema. Una falla de uno de los equipos, implica la no funcionalidad de todo el sistema.

El sistema en serie no necesariamente tiene que estar físicamente conectado de esta manera; por ejemplo, un sistema con dos componentes en paralelo en el cual deben funcionar los dos para que el sistema cumpla las especificaciones que se desean, es un sistema que desde el punto de vista de confiabilidad está conectado en serie.

La confiabilidad de un sistema en serie aumenta, si la confiabilidad de uno de los equipos que lo componen aumenta.

La confiabilidad de un sistema en serie puede ser calculado como:

$$R_s = R(x_1) R(x_2) \dots R(x_n)$$

$$R_s = \prod_{j=1}^N R(x_j) \equiv \prod_{j=1}^N R_j$$

Dónde,

R_s : La confiabilidad del sistema.

$R(x_j)$: La confiabilidad del equipo x_j .

2.2.14.2. En paralelo

Es aquella en que el funcionamiento de k , de los n componentes, implica el de todo el sistema. Esto quiere decir que estas estructuras solo fallan si todos los componentes del sistema dejan de funcionar.

La confiabilidad de un sistema en paralelo se puede expresar como:

$$R_s = 1 - [F(x_1') F(x_2') \dots F(x_n')]$$

$$R_s = 1 - \prod_{j=1}^N R(1 - (x_j)) \equiv 1 - \prod_{j=1}^N F_j$$

Dónde,

R_s : Es la confiabilidad de todo el sistema.

F_j : Es la no confiabilidad del equipo j .

$R(x_j)$: Es la confiabilidad dada o calculada del equipo j .

2.2.14.3. En STANDBY

También conocida como estructura con respaldo, son aquellas donde existe una unidad principal respaldada por n unidades de reserva. Si tenemos dos elementos A y B, donde A se encuentra en funcionamiento hasta un tiempo “ t_1 ” en el cual falla, siendo en este instante remplazado por B. Entonces, B funcionaría desde un tiempo t_1 hasta el tiempo donde falla, que denominaremos t_2 . Si se considera el caso particular de que $\lambda_A = \lambda_B = \lambda$, la confiabilidad del sistema estará dada por:

$$R_s(t) = e^{-\lambda t}(1 + \lambda t)$$

R_s : Es la confiabilidad de todo el sistema.

2.2.14.4. Mixtos

Una estructura mixta es la combinación de dos o más tipos de estructuras elementales. Para su estudio es necesario realizar equivalencias entre sus componentes.

2.2.15. Recolección de información

La Recolección de información es un aspecto importante al realizar el estudio de confiabilidad de un sistema. Ya que si no se tiene la información correcta de los modos de fallas del sistema, de las causas de estas fallas, de los componentes afectados, la rata de falla del equipo, etc. No se podrá realizar una buena representación del sistema físico real por lo que los resultados no serán tan precisos.

Esta información puede ser obtenida de datos de equipos similares operando en otras plantas o de procesos productivos similares.

La opinión de expertos representa una fuente valiosa para el cálculo de la confiabilidad ya que nos pueden dar datos preciosos o rangos de datos para variables como la rata de falla, obtenida por sus años de experiencia trabajando con equipos similares al que se está estudiando. Ellos también pueden ser capaces de corroborar (dar el visto bueno) de los resultados obtenidos de confiabilidad y disponibilidad.

Otra fuente importante de información son las bases de datos genéricas que contienen información de parámetros de confiabilidad de diferentes equipos. Estos datos son obtenidos de la observación de poblaciones de equipos en distintas plantas de procesos. Entre las bases de información más conocidas tenemos:

- Offshore Reliability Data (OREDA).
- European, Safety Reliability & Data Association (ESReDA).
- Non-electronic Parts Reliability Data (NPRD).
- Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, (NSWC).

2.2.16. Proyecto OREDA

Es una base de datos que contempla información de parámetros de confiabilidad de equipos mecánicos rotativos o estáticos. Estos datos son obtenidos por la recolección de información de los equipos de 11 empresas diferentes participantes.

Estos datos aunque provienen de diferentes empresas bajo diferentes condiciones de procesos y diferentes condiciones ambientales, la institución OREDA estableció un procedimiento que nombraron como “The multiple-sample estimator”, donde toman en cuenta la heterogeneidad de los datos y los procesan para darnos datos adecuados y confiables para realizar un estudio apropiado de la confiabilidad.

Para este TEG se utilizó la base de datos de OREDA para realizar el estudio de confiabilidad en redes de HENs.

Para intercambiadores de calor la base de datos OREDA nos presenta un esquema que representa los subsistemas que componen el estudio de fallas en intercambiadores de calor (Fig. 6.).

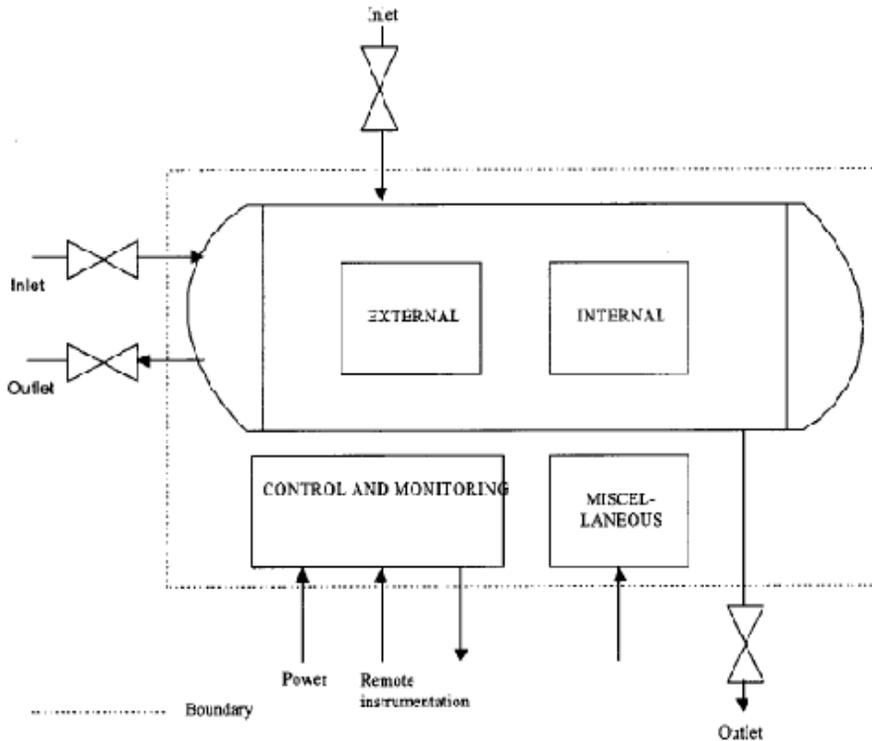


Fig. 6. Subsistemas en Intercambiadores de Calor

Donde se puede observar los límites de los datos que presentan, y además de los subsistemas que componen estos equipos.

Luego en detalle presenta los componentes que integran estos subsistemas:

HEAT EXCHANGERS			
External	Internal	Control and Monitoring	Miscellaneous
<ul style="list-style-type: none"> • Support • Body/Shell • Valves & piping • Instruments 	<ul style="list-style-type: none"> • Body/shell • Instruments • Plates • Seals (gaskets) • Tubes 	<ul style="list-style-type: none"> • Actuating device • Cabling & junction boxes • Control unit • Instruments • Monitoring • Internal power supply • Valves 	<ul style="list-style-type: none"> • Fan w/motor

Fig 7. Tabla de los Componentes de los Subsistemas en Intercambiadores de Calor

Además nos presentan una lista de los modos de fallas que pueden afectar el funcionamiento del intercambiador de calor, como son:

AIR: Abnormal Instrument Reading (Lectura anormal del instrumento)

ELP: External Leakage-Process Medium (Fuga externa del fluido de proceso)

ELU: External Leakage-Process Utility (Fuga externa del fluido de servicio)

IHT: Insufficient Heat Transfer (Transferencia de calor insuficiente)

INL: Internal Leakage (Fuga interna).

SER: Minor in-service Problems (Problemas menores en servicio)

OTH: OTHER (Otros)

PDE: Parameter Deviation (Desviación de parámetros)

PLU: Plugged/Choked (Atasque)

STD: Structural Deficiency (Deficiencia estructural)

UNK: Unknown (Desconocidas)

Una vez establecidos los modos de falla OREDA nos presenta la tabla que contiene la información de MTTF (tiempo medio para fallar) y MTTR (tiempo medio para reparar) de cada uno de estos modos (Anexo 3). Estos datos se presenta para dos escalas de tiempo diferentes, una conocida como calendar time (tiempo de calendario) y operational time (tiempo de operación). La diferencia entre estas dos es que la primera representa el tiempo en el que el equipo estuvo bajo observación y la segunda el tiempo de operación del equipo es decir hasta ser desmantelado. También nos presentan tablas en las cuales se muestran las posibles causas de la falla para los distintos componentes (tubos, válvulas, carcasa, etc.) y su porcentaje de ocurrencia (Anexo 4 y 5). Es importante tomar en cuenta que para este TEG se realizó estudios de confiabilidad de HENs con intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos, el operational time como escala de tiempo.

2.2.17. Curva de la bañera o curva de Davis

Es la curva que representa el comportamiento de un equipo relacionando su tasa de fallos con su tiempo de vida útil (fig. 8).

Como se puede observar la curva de la bañera nos divide la vida de un equipo en tres zonas:

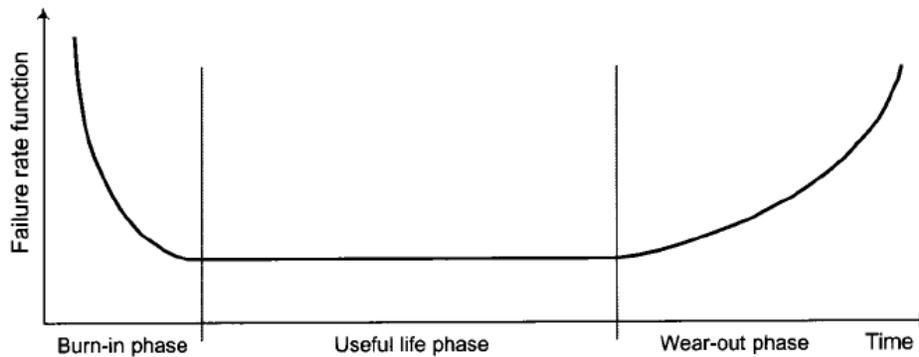


Fig. 8. Curva de la Bañera o Curva de Davis

2.2.17.1. Burn-in phase (fase de arranque)

Esta etapa se caracteriza por tener una elevada tasa de falla que desciende rápidamente con el tiempo. Estas fallas pueden referirse a equipos defectuosos, malas instalaciones, errores en el diseño del equipo, entre otros.

2.2.17.2. Useful life phase (fase de vida útil)

Esta etapa tiene una tasa de falla menor que la fase anterior y esta se caracteriza por ser constante, indiferente del tiempo que transcurra.

2.2.17.3. Wear-out phase (Fase de desgaste)

Esta fase se caracteriza por tener una tasa de falla creciente con el tiempo. Las fallas durante esta etapa se deben al desgaste natural del equipo.

3. CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

APLICACIÓN DE MÉTODO INTEGRADO

3.1. Costos asociados al equipo

Podemos estimar el costo de un intercambiador de calor por métodos muy diversos, todos dependen del área de intercambio de calor y del tipo de intercambiador, siendo más precisa la estimación cuanto más datos de la construcción del intercambiador utilicemos.

Ya que la obtención de datos actualizados para la estimación del costo del equipo fue difícil de conseguir, para este TEG se tomaron datos propuestos en una recopilación de costos para equipos de procesos presentados en Current Cost of Process Equipment (1982). Este libro, presenta un conjunto de alrededor de cincuenta gráficas que incluyen equipos de procesos en general.

Para intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos, los costos representados por las gráficas cuentan con las siguientes consideraciones (tomadas en los costos del libro mencionado en el apartado anterior):

1. Todas las curvas presentadas representa el costo en F.O.B (Free on Board) para carcasas de un solo paso de acero al carbono.
2. Tubos sin costura de acero al carbono
3. Tubos de $\frac{3}{4}$ de pulgada
4. Temperatura de diseño de 400°F (477,5 K)
5. Presión de diseño de 75 psi (0,517 Mpa)
6. La longitud de los tubos 8ft (2,4 m), 12ft (3,7 m) y 16ft (4,9 m)

En este libro se presentan gráficas para tres distintos tipos de intercambiadores de calor:

3.1.1. Intercambiador de calor con haz tubular fijo

Tiene tubos rectos asegurados por soldadura en ambos extremos de la placa de los tubos. Tienen costo moderado y facilidad de limpieza del lado de los tubos.

3.1.2. Intercambiadores con cabezal flotante

Tiene tubos rectos que son asegurados en cada extremo con placas de tubos, la diferencia con el anterior es que una de estas placas es libre de mover, permitiendo de este modo una expansión diferencial entre los tubos y la carcasa. Este tipo tienen un alto costo, pero tanto el lado de los tubos como el de la carcasa son fáciles de limpiar.

3.1.3. Intercambiadores de calor con tubos en U

En este caso los dos extremos de los tubos en forma de U están asegurados a una misma placa de tubos. Esto permite eliminar el problema de expansión térmica ya que los tubos tienen la libertad de contraerse y expandirse. Estos intercambiadores son bajos en costos y ya que el haz de tubos se puede extraer y limpiar fácilmente de manera manual del lado de la carcasa pero no ocurre lo mismo para el lado de los tubos.

Basándonos en estas gráficas obtuvimos una aproximación del costo de adquisición de los intercambiadores de calor en base a su área. Esto se logró utilizando The Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI). Estos índices nos proporcionan la inflación de equipos de plantas de proceso. En la revista Chemical Engineering se presentan los diferentes índices de inflación de equipo por año. La fórmula que se usó para calcular el valor actual del equipo por ajuste de inflación está dada por:

$$\frac{Costo_{tiempo2}}{Costo_{tiempo1}} = \frac{indice_{tiempo2}}{indice_{tiempo1}}$$

En este caso se tomaron los CEPCI de los años 1982 y 2012 los cuales son respectivamente 314 y 661,6 correspondiente al mes de junio de este año (Anexos 6 y 7).

Las gráficas con los costos actualizados de los diferentes intercambiadores se presentan en los Anexos 8, 9 y 10. A estas gráficas se les genero una curva aproximación de tipo lineal. Las ecuaciones de estas aproximaciones se presentan a continuación.

3.1.4. Ecuaciones de estimación de costos para intercambiadores de calor

3.1.4.1. Intercambiadores con cabezal flotante

Para una longitud de tubos 8ft (2,44 m)

$$C1(A) = 250,03(A) + 3920,4$$

$$R^2 = 0,9956$$

Para una longitud de tubos 12ft (3,66 m)

$$C2(A) = 217,84(A) + 3930,5$$

$$R^2 = 0,9969$$

Para una longitud de tubos 16ft (4,88 m)

$$C3(A) = 199,6(A) + 3813$$

$$R^2 = 0,9977$$

3.1.4.2. Intercambiadores de cabezal fijo

Para una longitud de tubos 8ft (2,44 m)

$$C1(A) = 216,4(A) + 3580$$

$$R^2 = 0,9932$$

Para una longitud de tubos 12ft (3,66 m)

$$C2(A) = 192,58(A) + 3617$$

$$R^2 = 0,9877$$

Para una longitud de tubos 16ft (4,88 m)

$$C3(A) = 171,15(A) + 3490,9$$

$$R^2 = 0,9909$$

3.1.4.3. Intercambiadores con tubos en U

Para una longitud de tubos 8ft (2,44 m)

$$C1(A) = 208,22(A) + 3014,2$$

$$R^2 = 0,9977$$

Para una longitud de tubos 12ft (3,66 m)

$$C2(A) = 171,33(A) + 2932,1$$

$$R^2 = 0,9987$$

Para una longitud de tubos 16ft (4,88 m)

$$C3(A) = 151,65(A) + 3072,6$$

$$R^2 = 0,999$$

Las ecuaciones anteriores nos ayudan a calcular el valor de adquisición de los equipos, para la función objetivo que será desarrollada en la siguiente sección, será necesario conocer el costo anual de dichos equipos, para esto se supondrá que este

sólo depende de la depreciación anual de los mismos, para el calculo dicha depreciación se utilizará el método de la línea recta con un valor de salvamento del 10 % y una vida útil de 20 años, basándonos en esto el costo anual del equipo va a ser igual a 0,045 multiplicado por el costo de adquisición.

3.2. Metodología para el Análisis Pinch

Inicialmente, organizamos los datos proporcionados para cada una de las corrientes, en una tabla en la cual además, podemos calcular la carga térmica disponible de cada corriente, para ilustrar el procedimiento en este TEG, se utilizó un ejemplo de cuatro corrientes de procesos formulado Yee y Grossmann (1990), sus datos son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 1. Datos de Entrada

Corriente	T_{inlet} Temperatura de Entrada (K)	T_{outlet} Temperatura de Salida (K)	WFC_p Flujo de Calor Específico (kJ/kg.K)	Q Carga Térmica (kW)
h1	443	333	30	3300
h2	423	303	15	1800
c1	293	408	20	-2300
c2	353	413	40	-2400

Además, proporcionan los factores de costos para los servicios de vapor y agua de enfriamiento, los cuales son 80 (\$/kW año) y 20 (\$/kW año), respectivamente, así como sus temperaturas de entrada y salida, las cuales son:

- Para vapor 450 K
- Para agua de enfriamiento 293 K de entrada y 313 K de salida

El procedimiento del método Linnhoff y Flower mencionado con anterioridad, ahora es descrito en detalle:

1. Luego de establecer los datos de forma esquemática, seleccionar un $\Delta T_{\text{mín}}$ para los cálculos. Para este ejemplo tomamos $\Delta T_{\text{mín}} = \text{HRAT} = \text{EMAT} = 10$ K.
2. Restar $\Delta T_{\text{mín}} / 2$ a cada temperatura de entrada y salida de cada corriente caliente.
3. Sumar $\Delta T_{\text{mín}}/2$ a cada temperatura de entrada y salida de cada corriente fría. A las nuevas temperaturas obtenidas las llamaremos *temperaturas desplazadas* S_{inlet} , S_{outlet} por sus siglas en inglés (Shifted Temperatures).

Tabla 2. Temperaturas Desplazadas

Temperaturas Desplazadas	
S_{inlet} (K)	S_{outlet} (K)
438	328
418	298
413	298
418	358
$\Delta T = 10$ K	

4. Hacer una lista de todas las temperaturas desplazadas (temperaturas desplazadas de entradas y salida, para corrientes frías y calientes simultáneamente).
5. Se eliminarán las temperaturas repetidas y luego estas temperaturas se ordenarán de forma descendente (de mayor a menor).

Tabla 3. Temperaturas Desplazadas Ordenadas

S_i
438
418
413
358
328
298

6. De esta forma se obtendrán los intervalos de temperatura i entre dos temperaturas desplazadas, luego de esto sumar todos los flujos de calor específico de las corrientes calientes existentes en ese intervalo de temperatura, (para este paso se usará el diagrama de intervalos de temperatura, como se muestra en la fig. 9., identificando las corrientes en cada intervalo), luego restarles los flujos de calor específico de las corrientes frías, para obtener el flujo de calor específico neto $WC_{P_{neto}}$ de ese intervalo. Realizar este procedimiento en los intervalos restantes.

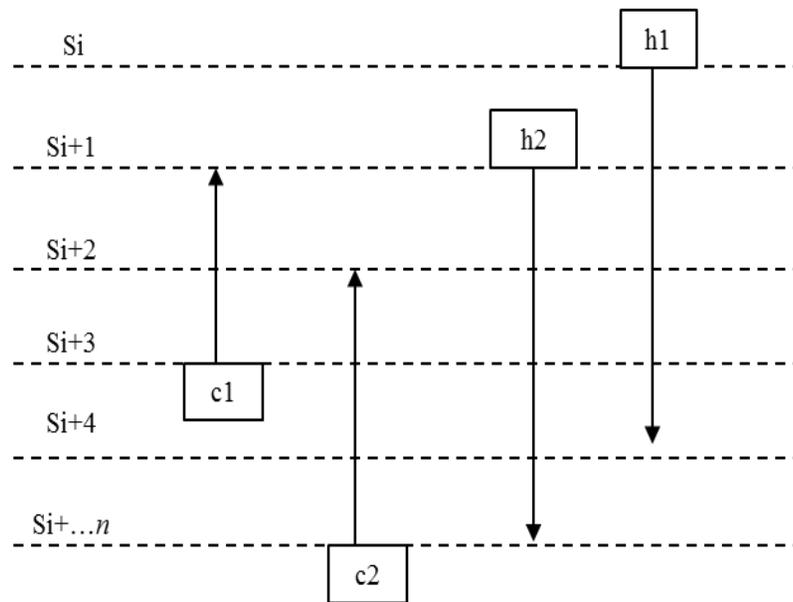


Fig. 9. Intervalo de Temperatura

7. Multiplicar WC_{Pneto} de cada intervalo por el rango de temperatura del intervalo S_i-S_{i+1} , para obtener el calor liberado (positivo) o el calor requerido (negativo) para cada uno de los intervalos.
8. Los datos obtenidos anteriormente (temperaturas desplazadas, número de intervalo, rango de temperatura del intervalo, flujo de calor específico neto y la carga térmica del intervalo) pueden ser esquematizadas como se refleja en la tabla 4.

Tabla 4. Problem-Table Aplicación Caso de Estudio

S_i	Intervalo	$T_{di}-T_{di+1}$	$\Sigma WC_{\text{ph}}-\Sigma WC_{\text{pc}}$	ΔH_i	Excedente o déficit
438	1	20	30	600	Excedente
418					
413	2	5	5	25	Excedente
	3	55	-15	-825	Déficit
358	4	30	25	750	Excedente
328					
298	5	30	-5	-150	Déficit

9. Ahora, para construir el diagrama de cascada, deben colocarse las temperaturas de lado izquierdo (temperaturas desplazadas), empezando por la más alta. Teniendo estos intervalos y empezando desde cero, se deben ir añadiendo las cargas térmicas netas de cada intervalo de temperatura. Así, se representa el calor que pasa a través de cada intervalo de temperaturas desplazadas.

10. El diagrama de cascada descrito en el paso anterior normalmente contiene cargas térmicas negativas y es termodinámicamente infactible. Tomar el valor mínimo de la carga térmica neta en el diagrama (el valor negativo más grande) y añadir esta cantidad de carga térmica al primer intervalo del diagrama de cascada. Ahora, todas las cargas térmicas netas en el diagrama son incrementadas esta cantidad, y el mínimo valor se convierte en cero. Este último diagrama representa entonces, el diagrama de cascada factible.
11. El calor añadido en el primer intervalo es el requerimiento mínimo de calentamiento $Q_{H\text{mín}}$. El o los puntos donde la carga térmica neta es cero en el diagrama de cascada es denominado *punto pinch*. La gráfica del flujo de calor de la red (eje horizontal), contra la temperatura desplazada (eje vertical) es la denominada Gran Composite Curve (GCC).

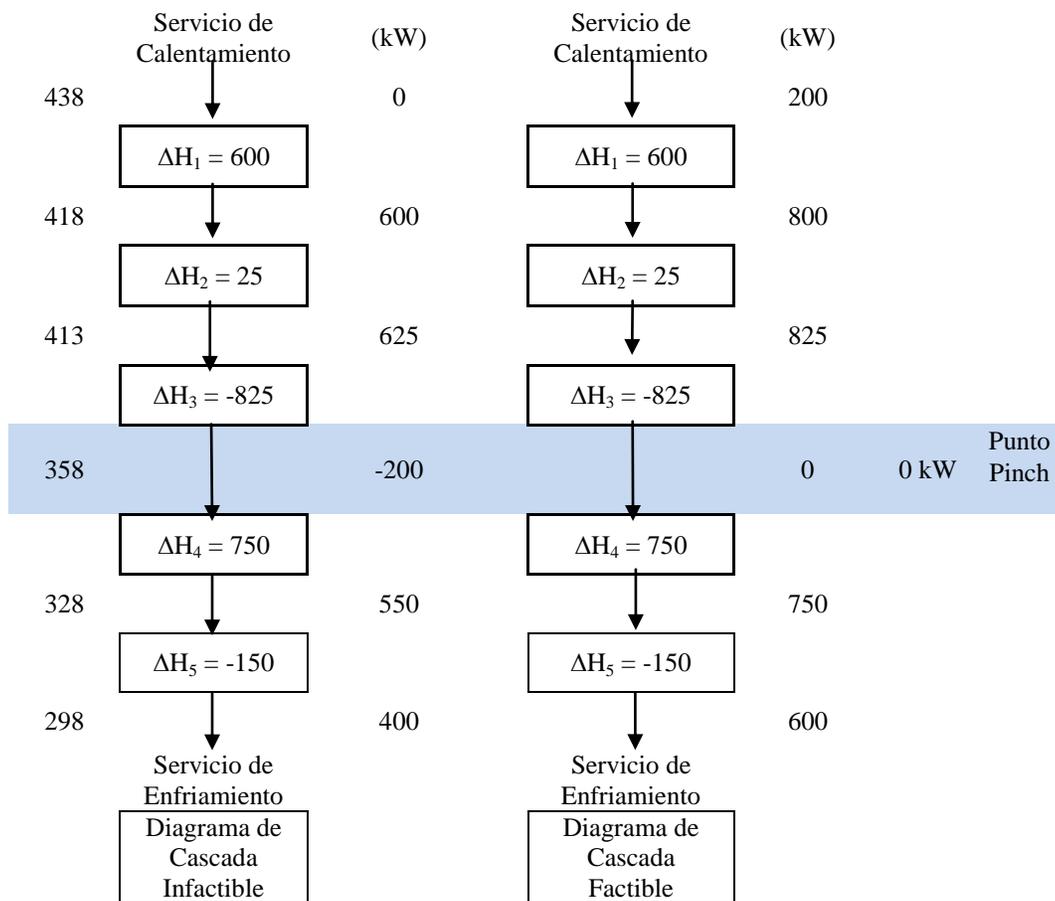


Fig. 10. Diagrama de Cascada

3.2.1. Curvas Compuestas

Un método de graficación para las curvas compuestas fría y caliente, similar a lo realizado en el método de Linnhoff y Flower se presenta a continuación:

1. Realizar una lista de todas las temperaturas de entrada y de salida de las corrientes calientes (no repetir valores de temperatura).
2. Ordenar estas temperaturas en orden ascendente (la temperatura más baja primero).
3. En cada intervalo de temperatura i , sumar los WC_P de todas las corrientes calientes existentes en dicho intervalo, para dar el flujo de calor específico neto para las corrientes calientes $WC_{PH\ neto}$.
4. Multiplicar $WC_{PH\ neto}$ para cada rango de temperatura del intervalo $(T_{i+1}-T_i)$, para obtener la carga térmica requerida para cada intervalo de las corrientes calientes.
5. Empezando de cero (para el eje horizontal) y a partir de la temperatura más baja, añadir la carga térmica de cada uno de los intervalos, para mostrar la carga térmica total (acumulativa) para las corrientes calientes.
6. La carga térmica al final del intervalo nos da la carga de enfriamiento mínima requerida. Entonces, la gráfica de la carga térmica (acumulativa) (eje horizontal), contra la temperatura real (eje vertical) es la Curva Compuesta Caliente (CCC).
7. Repetir los pasos 1-5 para las corrientes frías, para dar su carga térmica total (acumulativa). La carga térmica al final de los intervalos para las corrientes frías nos da la carga de calentamiento mínima requerida. Añadiendo los requerimientos mínimos de servicios de enfriamiento $Q_{Cmín}$ (calculados también usando el método de Linnhoff y Flower) a todas las cargas térmicas de cada intervalo para las corrientes frías, así obtenemos las Curva Compuesta

Fría (CCF). Las curvas correspondientes al caso de estudio son mostradas en el Anexo12.

Aplicando los pasos descritos anteriormente, y aplicando el concepto de diagrama de rejilla. Se obtuvo la siguiente red básica (fig. 10), la cual cuenta con número de intercambiadores mayor al mínimo (ver marco teórico, sección de mínimo número de intercambiadores de calor), esto se debe a presencia de lazos de calor dentro de la red, el procedimiento para eliminación de estos es a menudo tedioso, ya que pueden existir múltiples lazos de calor y la obtención de la red óptima requiere de experticia por parte del diseñador.

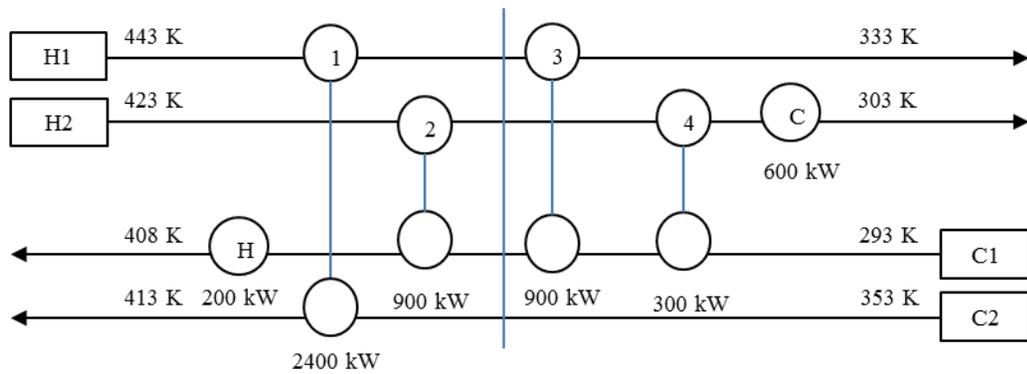


Fig. 11 Red Básica-Método Pinch

3.3. Metodología de algoritmo global de optimización no lineal para HENs modificado.

Una vez establecida la topología básica con el método pinch se procedió a optimizar dicha red, basándonos en el método de algoritmo global de optimización no lineal establecido por Grossmann y Quesada (1993), presentado en el capítulo II, pero con ciertas modificaciones.

Para aplicar este método es necesario en primer lugar establecer la función objetivo a optimizar.

Para este TEG se tomó como función objetivo a ser minimizada, los costos de las redes de intercambiadores de calor. Para establecer una función objetivo fue necesario en primer lugar, tener en cuenta las variables representativas que afectan el costo de una HEN.

Basándonos en esto, entre las variables que afectan estos costos tenemos; costos de los equipos de intercambio de calor, los costos de instalación, costos de energía auxiliar requerida, costos mantenimiento, costos de operación, etc.

Como se puede observar existen muchas variables a tomar en cuenta en la función objetivo por lo cual, fue necesario delimitar dichas variables. En el caso de este TEG se tomaron en cuenta en la función objetivo solo los costos de equipos de intercambio de calor y de los servicios de energía auxiliares requeridos, como son los costos de vapor para calentamiento y los costos de agua para enfriamiento. Tomando en cuenta estas variables la función objetivo se estableció de la siguiente forma:

$$\text{Min } C_{HEN} = \sum_{i=0}^n CE_i + \sum_{i=0}^n CU_i$$

Donde,

CE_i : Representan los costos del intercambiador de calor i

CU_i : Representan los costos de los servicios i tanto de enfriamiento (agua) como de calentamiento (vapor).

Esta fue la representación más sencilla de la función objetivo que se aplicó en este TEG. Ya que por último se debió realizar un análisis de los factores que afectan las variables CE_i y CU_i . Al analizar el primer término de la ecuación de costo de equipo nos dimos cuenta que podían variar por diversos factores como: el área de transferencia de calor, el tipo de intercambiador de calor, el material de construcción, características de diseño (temperatura y presión de diseño), etc. Por lo cual fue necesario establecer y especificar como se manejaron estas variables en la función

objetivo. Por lo tanto, el término CE_i fue expresado como una función del área de la siguiente manera:

$$CE_i = d \cdot [b \cdot A + c]$$

Donde,

A_i : Es el área de transferencia de calor del intercambiador de calor i .

b y c : Son factores que dependen del tipo de intercambiador de calor a usar.

d : Es un factor de corrección que incorpora los costos asociados a los siguientes factores:

- f_m = Factor de material
- f_d = Factor característico por el tipo de intercambiador
- f_{n-t} = Factor debido al número de pasos de los tubos
- f_T = Factor corrector por temperatura
- f_L = Factor corrector longitud de tubos
- f_{d-t} = Factor corrector del diámetro de tubo y paso
- f_p = Factor debido a la presión entre la carcasa y los tubos

Estos factores se pueden utilizar para obtener una aproximación más real de costo de cada intercambiador (Anexo 10).

Por lo cual d se puede expresar como:

$$d = f_m \cdot f_d \cdot f_{n-t} \cdot f_T \cdot f_L \cdot f_{d-t} \cdot f_p$$

En segundo lugar el costo de la energía requerida de servicios auxiliares de enfriamiento (agua) y calentamiento (vapor) se tomó de la siguiente forma:

$$\sum_{i=0}^n cui \cdot ui$$

Donde,

cu_i : Es un coeficiente de costo que dependerá del servicio. Que puede estar dado en (\$/kW año).

ui : Representa los requerimientos de servicios dados en (kW).

Para esta parte del método se tomará la red básica, proporcionada por el método pinch en la sección anterior, en la cual se tomaron como variables las temperaturas intermedias y las cargas térmicas de los intercambiadores, como se muestra en la fig. 11.

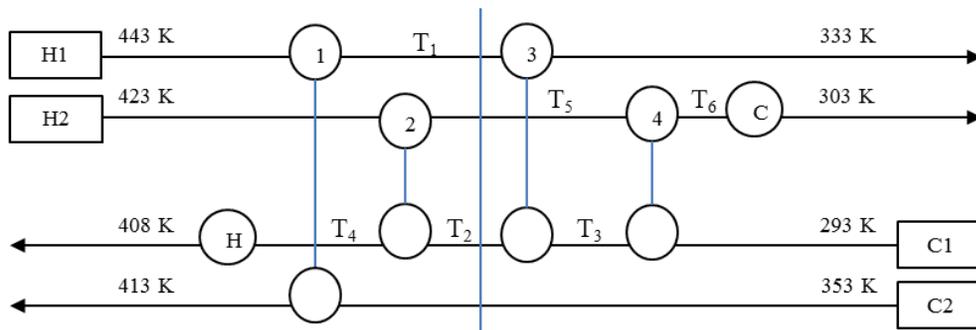


Fig. 12. Red a Optimizar-Método Integrado

En esta red podemos observar que en total se tienen 6 intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos. De los cuales se tienen 4 intercambiadores en los cuales intercambiarán calor las corrientes de proceso, 1 calentador y 1 enfriador.

En segundo lugar necesitamos conocer las características de las corrientes de proceso y de servicio del problema caso de estudio las cuales fueron presentadas en la metodología pinch. Luego asumimos que dicha red está compuesta por intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos de un solo paso y del tipo Cabezal Flotante con una longitud de tubos 12ft (3,66m), con tubos y carcasa de

acero al carbono, cuyos coeficientes globales de transferencia de calor son los siguientes:

$$U1=U2=U3=U4= U6= 0,8$$

$$U5=1,2$$

Una vez establecido esto se procedió a aplicar el problema (P)_{modificado}. Integrando a este problema la función objetivo definida para este TEG.

La función objetivo del problema (P)_{modificado} para este caso de estudio queda definida como:

$$\begin{aligned} \min C_{HENS} = & 0,045 \left[x_1 \left[217,84 \left(\frac{Q_1}{0,8 \cdot \Delta T_1} \right) + 3930,5 \right] + x_2 \left[217,84 \left(\frac{Q_2}{0,8 \cdot \Delta T_2} \right) + 3930,5 \right] \right. \\ & + x_3 \left[217,84 \left(\frac{Q_3}{0,8 \cdot \Delta T_3} \right) + 3930,5 \right] + x_4 \left[217,84 \left(\frac{Q_4}{0,8 \cdot \Delta T_4} \right) + 3930,5 \right] \\ & + x_5 \left[217,84 \left(\frac{Q_5}{1,2 \cdot \Delta T_5} \right) + 3930,5 \right] + x_6 \left[217,84 \left(\frac{Q_6}{0,8 \cdot \Delta T_6} \right) + 3930,5 \right] \left. \right] + 80Q_5 \\ & + 20Q_6 \end{aligned}$$

Los valores de las variables x_i tomaran dos valores; 1 si $Q_i > 0$ y 0 si $Q_i = 0$. Esto fue necesario debido a que la función de costos del intercambiador en función de su área es del tipo;

$$CE_i = d \cdot [b \cdot A + c]$$

Por tanto, si $Q_i = 0$ el área de la función anterior sería igual a cero, con lo cual me quedaría el término c remanente dentro de esta, aumentando el costo de la red de forma errónea.

La función objetivo del problema (P)_{modificado} estará sujeto a las siguientes restricciones mostradas a continuación. Tomando en cuenta la primera y la segunda ley de la termodinámica y aplicándolas a cada intercambiador de calor nos queda:

Para E1

$$Q1=WC_{Ph1} (443-T1) ; Q1= WC_{Pc2} (413-353) ; Q1 \geq 0$$

Para E2

$$Q2= WC_{Ph2} (T4-T2) ; Q2= WC_{Pc1} (423-T5) ; Q2 \geq 0$$

Para E3

$$Q3= WC_{Ph1} (T2-T3) ; Q3= WC_{Pc1} (T1-333) ; Q3 \geq 0$$

Para E4

$$Q4= WC_{Pc1} (T5-T6) ; Q4= WC_{Ph2} (T3-293) ; Q4 \geq 0.$$

Para E5

$$Q5= WC_{Pc1} (408-T4) ; Q5 = \dot{m}_{vapor} (h_{vg}) ; Q5 \geq 200$$

Para E6

$$Q6= WC_{Ph2} (T6-303) ; Q6 = \dot{m}_{agua}(cp_{agua}) (313 - 293); Q6 \geq 600.$$

Donde,

WC_{Phi} : Representan los flujos de calor específico para las corrientes calientes.

WC_{Pci} : Representan los flujos de calor específico para las corrientes frías.

\dot{m}_{vapor} : Representa el flujo másico del vapor de calentamiento.

h_{vg} : Representa la entalpía de vaporización del vapor.

\dot{m}_{agua} : Representa el flujo másico del agua de enfriamiento.

cp_{agua} : Representa el calor específico del agua.

Restricciones de ΔT_i ; como se puede observar para su cálculo se utilizó la AMTD y no la LMTD ya que estas generan muchas dificultades numéricas, sin embargo se pueden utilizar ciertas aproximaciones como la de Chen, Paterson y Chen extendido, Yee y Grossmann (1990), esto no es objeto de este TEG.

$$\Delta T1 = \frac{(443-413+T1-353)}{2}; \Delta T1 \geq 10$$

$$\Delta T2 = \frac{(423-T4+T5-T2)}{2}; \Delta T2 \geq 10$$

$$\Delta T3 = \frac{(T1-T2+333-T3)}{2}; \Delta T3 \geq 10$$

$$\Delta T4 = \frac{(T5-T3+T6-293)}{2}; \Delta T4 \geq 10$$

$$\Delta T5 = \frac{(450-408+450-T4)}{2}; \Delta T5 \geq 10$$

$$\Delta T6 = \frac{(T6-313+303-293)}{2}; \Delta T6 \geq 10$$

Restricciones de T_i ,

$$333 \leq T1 \leq 443$$

$$293 \leq T2 \leq 408$$

$$293 \leq T3 \leq 408$$

$$293 \leq T4 \leq 408$$

$$303 \leq T5 \leq 423$$

$$303 \leq T6 \leq 423$$

Restricciones adicionales por integración de métodos, para evitar la violación de los ΔT_{\min} establecidos en el método pinch.

$$\Delta T1_{sh} = (443 - 413); \Delta T1_{sh} \geq 10$$

$$\Delta T1_{sc} = (T1 - 353); \Delta T1_{sc} \geq 10$$

$$\Delta T_{2_{sh}} = (423 - T_4); \Delta T_{2_{sh}} \geq 10$$

$$\Delta T_{2_{sc}} = (T_5 - T_2); \Delta T_{2_{sc}} \geq 10$$

$$\Delta T_{3_{sh}} = (T_1 - T_2); \Delta T_{3_{sh}} \geq 10$$

$$\Delta T_{3_{sc}} = (333 - T_3); \Delta T_{3_{sc}} \geq 10$$

$$\Delta T_{4_{sh}} = (T_5 - T_3); \Delta T_{4_{sh}} \geq 10$$

$$\Delta T_{4_{sc}} = (T_6 - 293); \Delta T_{4_{sc}} \geq 10$$

$$\Delta T_{5_{sh}} = (450 - 408); \Delta T_{5_{sh}} \geq 10$$

$$\Delta T_{5_{sc}} = (450 - T_4); \Delta T_{5_{sc}} \geq 10$$

$$\Delta T_{6_{sh}} = (T_6 - 313); \Delta T_{6_{sh}} \geq 10$$

$$\Delta T_{6_{sc}} = (303 - 293); \Delta T_{6_{sc}} \geq 10$$

Una vez establecida las restricciones del problema $(P)_{\text{modificado}}$ se establecen los límites superiores e inferiores, que podrían tomar las variables Q_i , ΔT_i , A_i .

Finalmente se aplicó el problema NLP_L relajado al caso en estudio, donde se deben agregar las restricciones de sub-estimación y sobre-estimación para cada intercambiador de calor. Obtenidas de la relajación de términos bilineales y fraccionales, como se explicó en la revisión del método descrito por Grossmann y Quesada. Además de las establecidas en el Problema $(P)_{\text{modificado}}$.

En nuestro TEG en particular utilizamos el complemento SOLVER que ofrece Microsoft Office Excel el cual se toma como una herramienta para resolver problemas de programación lineal o no lineal.

Al tener este problema relajado el programa SOLVER nos arroja el valor resultado, el cual en este TEG se tomó como el valor óptimo, ya que tomando en cuenta lo expresado por los autores mencionados en el párrafo anterior, sobre lo

ajustado que es la sub-estimación dada por el problema NLP_L , con esta relajación la brecha entre el valor real y el valor resultado es muy pequeña.

Para asegurarnos de que este es el óptimo global de la función de manera práctica se tomó el problema $(P)_{\text{modificado}}$ y se le ingresaron distintos valores iniciales y este nos arrojó 2 mínimos locales. Luego estos mínimos locales fueron introducidos en el problema relajado y todos convergieron al valor mínimo global.

3.3.1. Metodología de Optimización Global para HENs modificado

1. En primer lugar es necesario tener una topología de la red, esta será el arreglo a optimizar.
2. Se debe contar con los datos de temperatura de entrada y salida de las corrientes de proceso y de los servicios, además de los flujos de calor específico.
3. Se debe establecer la función objetivo a optimizar que tendrá la forma mostrada en la sección anterior, la cual toma en cuenta los costos de los intercambiadores (costo de inversión) en función del área y los costos de servicios de calentamiento y enfriamiento para el primer año.
4. Determinar las variables de la función objetivo.
5. Establecer las restricciones para dichas variables, que vendrán dadas por los balances térmicos, las AMTD, los límites superiores e inferiores de las temperaturas, el establecimiento de no-negatividad de las cargas térmicas, y el valor de $\Delta T_{\text{mín}}$.
6. Incluir restricciones para la eliminación de lazos de calor.
7. Programar en SOLVER el problema $(P)_{\text{modificado}}$.
8. Establecer los límites superiores e inferiores de las variables (Q_i , A_i y ΔT_i)
9. Programar en SOLVER el problema NLP_L agregando sub-estimadores y sobre-estimadores.
10. Con la aplicación de estas estrategias se obtendrá el costo mínimo global.

3.4. Metodología de confiabilidad

3.4.1. Justificación del uso de una distribución exponencial

En este TEG se utilizó una distribución de probabilidad exponencial para representar la probabilidad de falla de los equipos del sistema en estudio, es decir que presenta una tasa de falla aproximadamente constante. Esto se puede justificar tomando en cuenta que OREDA nos dice que los datos mostrados en sus bases de datos, no contemplan la primera fase (burn-in phase) de la curva de la bañera, ya que la recolección de datos de falla se realizaron en equipos que ya habían sido instalados y tenían un tiempo de funcionamiento. Otras de las razones que justifica el uso de esta distribución es que por lo general los equipos son remplazados antes de llegar a la etapa de desgaste, también se debe tomar en cuenta que la distribución exponencial facilita el cálculo de los parámetros de confiabilidad.

3.4.2. Árbol de falla

En función de obtener la confiabilidad para un intercambiador de carcasa y haz de tubo, se realizó un árbol de falla con datos extraídos del Handbook de OREDA (2002). El árbol de falla obtenido junto al valor resultante de confiabilidad para un año se muestra en el Anexo 11. Los resultados mostrados fueron calculados a través de un software conocido como Blocksim de la corporación ReliaSoft.

Para este TEG, dicho valor de confiabilidad se aplicará a todos los equipos del sistema, ya que se tomaron datos generales para intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos, para cualquier fluido en general.

3.4.3. Sistema de confiabilidad para el caso de estudio

Para el caso de estudio de este TEG, se calculó la confiabilidad del sistema en serie, debido a que si uno de los intercambiadores de calor del sistema falla, no se obtendrían las especificaciones de temperatura a la salida de la red. Por lo cual se utilizará la fórmula expresada en la sección de sistemas en serie del marco teórico.

Para la configuración con equipos en Standby, se utilizó la fórmula descrita también para estos sistemas. Los resultados de todas las configuraciones propuestas son mostrados en la tabla 5.

4. CAPÍTULO IV

4.1. Resultados

Aplicando el método integrado se obtuvo el siguiente arreglo (fig. 12). Comparándolo con el resultado óptimo que se obtendría eliminando los lazos de calor en red básica, procedimiento que se muestra con detalle en el libro *Pinch analysis and process integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy*, Kemp, I. (2007), se puede observar que a través del método integrado se obtiene exactamente el mismo arreglo óptimo, demostrando así la veracidad del método utilizado en este TEG.

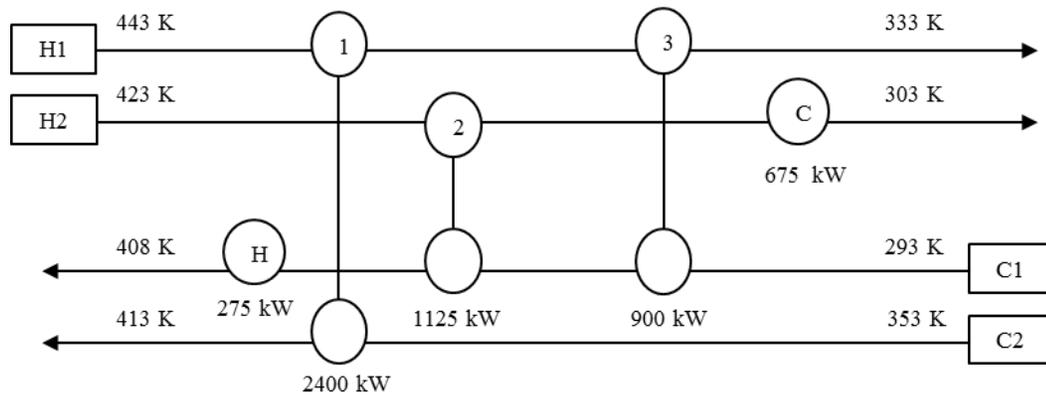
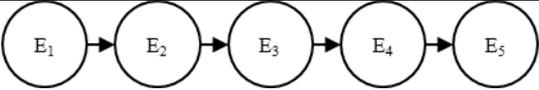
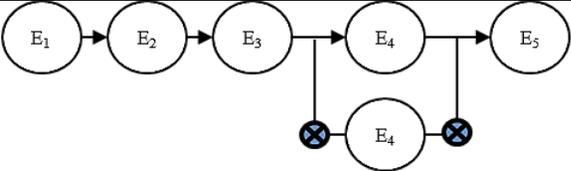
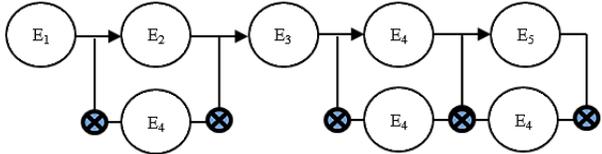
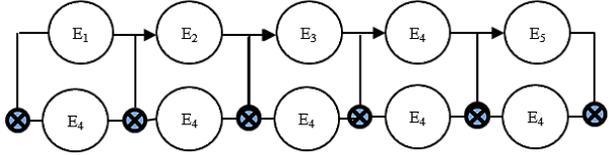


Fig. 13. Red Óptima-Método Integrado

Aplicando modelos de confiabilidad a la red obtenida, se puede establecer el siguiente cuadro comparativo, que involucra parámetros de decisión arreglo-costo-confiabilidad. Dichos parámetros podrían ser usados por expertos para la toma de decisión, en cuanto al arreglo a utilizar. Es importante destacar que cada uno de estos arreglos representa el óptimo desde el punto de vista de mínimo número de intercambiadores posibles, mínimo costo y máxima confiabilidad. Asimismo, debe resaltarse que en dichos valores de costo no se están tomando en cuenta factores como mantenimiento, costos operativos, entre otros. Esta tabla comparativa sigue siendo un punto de partida importante a la hora de realizar la selección del arreglo a utilizar.

Tabla 5. Comparación de Parámetros de Confiabilidad y Costo para Diferentes Arreglos

Topología	Nº Inter .	Configuración	Confiabilidad	Área total (m ²)	Inversión (\$)	Costo Anual de Equipos (\$/año)	Costo de Servicios (\$/año)	Costo total anual (\$/año)
Red Optimizada	5		0,7179	299,38	84870,4	3819,17	35500	39319,17
Red 5 en Función y 1 Standby (E4)	6		0,7677	304,07	89822,41	4042,01	35500	39542,01
Red 5 en Función y 3 en Standby (E2, E4 y E5)	8		0,8797	414,15	121663,38	5474,85	35500	40974,85
Red 5 en Función y 5 en Standby	10		0,997	598,77	169740,90	7638,34	35500	43138,35

De los resultados obtenidos en este TEG, se puede establecer el siguiente procedimiento:

4.2. Procedimiento Estandarizado para la Optimización de Bancos de Intercambiadores de Calor basado en Confiabilidad

1. A partir de los datos dados por el proceso, tales como; temperatura de entrada y salida de las corrientes, flujo de calor específico, entre otros, establecer una red básica con máxima recuperación de calor mediante el método pinch (procedimiento descrito con detalle en el marco teórico y la metodología).
2. Definir una función objetivo según el tipo de intercambiador de calor a utilizar.
3. De la red básica obtenida en el paso 1, aplicar la metodología de algoritmo global de optimización no lineal para HENs modificada, para obtener la red con mínimo costo.
4. Realizar una recolección de datos de parámetros de confiabilidad para el equipo a utilizar, obtenidos a través de bases de datos u opinión de expertos en el tema.
5. Realizar un árbol de falla para el equipo o los equipos a utilizar, que detalle las posibles causas de falla, con el fin de obtener un valor para la confiabilidad de estos.
6. Modelar la red con mínimo costo a través de un sistema de confiabilidad (serie o paralelo), dependiendo de las características que se requieran a la salida de la red, como; temperatura y caudal final requerido.
7. Aplicar sistemas de Standby o redundancia a los diferentes equipos de la red.

8. Realizar un cuadro comparativo que contenga parámetros de costo y confiabilidad, los cuales permitan tomar una decisión a la hora de seleccionar un arreglo para el sistema.

CONCLUSIONES

- En base a la revisión bibliográfica realizada durante este TEG, se puede concluir que existen pocos trabajos disponibles con respecto a la síntesis de HENs y en menor grado a la aplicación de conceptos de confiabilidad en estas.
- Se estableció una función objetivo de tipo lineal, que toma como variables el costo de cada intercambiador en función de su área de transferencia de calor y el costo de la energía de los servicios de calentamiento y enfriamiento.
- Mediante la integración del método Pinch y el algoritmo de optimización global para redes de intercambiadores de calor se logró obtener una red óptima con máxima recuperación de calor.
- Se pudieron agregar conceptos de confiabilidad a la red óptima, modelando ésta con sistemas de confiabilidad (serie, paralelo, Standby, etc.), además se utilizaron funciones exponenciales para representar la probabilidad de falla de los intercambiadores de calor.
- Se obtuvo una metodología que permite establecer parámetros de comparación para lograr un equilibrio entre el costo mínimo y una alta confiabilidad en la red.
- Dado que dentro de la bibliografía consultada no se encontró una herramienta de trabajo tal como el método integrado, este será un aporte adicional por parte de los autores de este TEG.

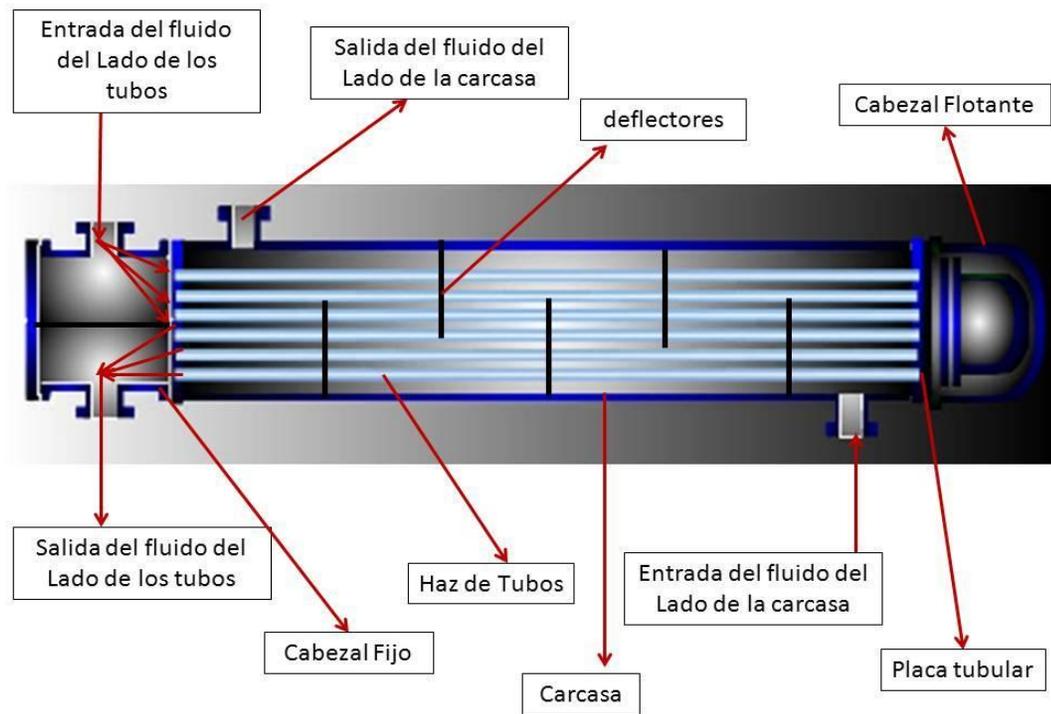
RECOMENDACIONES

Con base en los resultados de este estudio y sus conclusiones, surgen las siguientes recomendaciones:

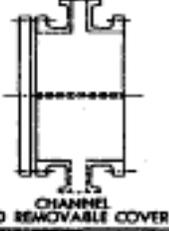
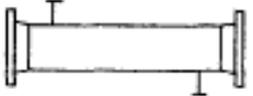
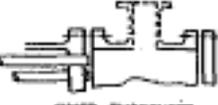
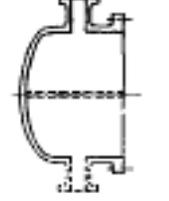
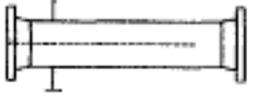
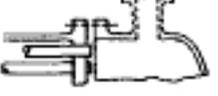
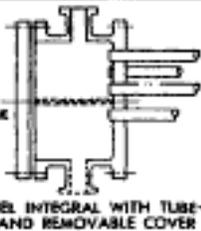
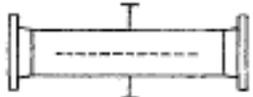
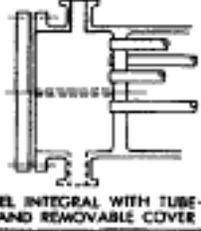
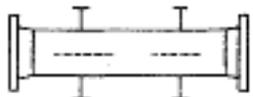
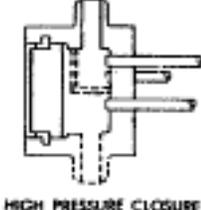
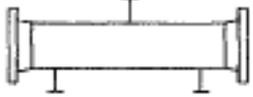
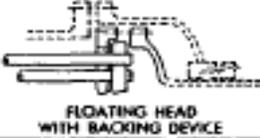
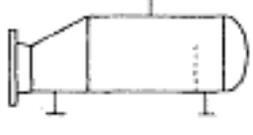
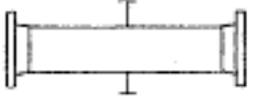
- Aplicar el método integrado para redes más complejas.
- Integrar a la función objetivos otros parámetros de costos, tales como; instalación, mantenimiento, etc. De forma de lograr una mayor precisión en la estimación de costos de la red.
- Agregar al método propuesto en este TEG aproximaciones para el cálculo de la LMTD como las propuestas por Chen, Paterson y Chen extendido.
- Considerar el uso de la simulación de Monte Carlo para el estudio de confiabilidad de la red.
- Realizar estudios de confiabilidad y costo para todo el ciclo de vida de los intercambiadores de calor.

ANEXOS

Anexo 1. Componentes de Intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos



Anexo 2. Descripción de Intercambiadores de Carcasa y Haz de Tubos, según las normas TEMA

FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES	
A	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	E	 ONE PASS SHELL	L	 FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
B	 BONNET (INTEGRAL COVER)	F	 TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	M	 FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
C	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY CHANNEL INTEGRAL WITH TUBESHEET AND REMOVABLE COVER	G	 SPLIT FLOW	N	 FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
N	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBESHEET AND REMOVABLE COVER	H	 DOUBLE SPLIT FLOW	P	 OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
D	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	J	 DIVIDED FLOW	S	 FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		K	 KETTLE TYPE REBOILER	T	 PULL THROUGH FLOATING HEAD
		X	 CROSS FLOW	U	 U-TUBE BUNDLE
				W	 EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

Anexo 3. Datos OREDA para Intercambiadores de Carcasa y Haz de Tubos 1

Taxonomy no 3.1.5		Item Mechanical Equipment Heat Exchangers Shell and tube								
Population 42	Installations 7	Aggregated time in service (10 ⁶ hours)					No of demands 97740			
		Calendar time * 0.9771		Operational time † 0.9686						
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 ⁶ hours)					Active rep. hrs	Repair (manhours)		
		Lower	Mean	Upper	SD	μ/σ		Min	Mean	Max
Critical	12*	0.09	8.58	36.72	14.20	12.28	39.5	12.0	73.0	311.0
	12†	0.02	8.70	39.25	14.78	13.82				
Abnormal instrument reading	1*	0.00	1.03	5.36	2.40	1.02	-	12.0	12.0	12.0
	1†	0.00	1.14	5.83	2.52	1.15				
External leakage - Process medium	1*	0.00	1.03	5.36	2.40	1.02	-	-	-	-
	1†	0.01	1.29	4.90	1.81	1.15				
Parameter deviation	1*	0.00	0.88	3.68	1.40	1.02	30.0	60.0	60.0	60.0
	1†	0.00	1.00	3.93	1.46	1.15				
Structural deficiency	9*	0.00	5.72	30.70	14.19	9.21	40.5	28.0	81.2	311.0
	9†	0.00	6.17	32.68	14.92	10.36				
Degraded	6*	0.00	6.27	27.81	10.83	6.14	10.0	1.0	7.3	16.0
	6†	0.00	8.82	40.50	16.22	6.91				
External leakage - Process medium	1*	0.00	1.15	4.58	1.71	1.02	10.0	10.0	10.0	10.0
	1†	0.01	1.25	4.22	1.55	1.15				
External leakage - Utility medium	3*	0.00	3.03	14.64	6.05	3.07	-	1.0	3.3	6.0
	3†	0.00	4.41	22.00	9.38	3.45				
Parameter deviation	2*	0.00	2.06	8.70	3.34	2.05	-	8.0	12.0	16.0
	2†	0.00	2.88	13.85	5.71	2.30				
Incipient	54*	5.54	55.58	150.24	48.19	55.28	46.1	1.5	32.1	279.0
	54†	3.42	70.04	209.89	70.20	62.17				
Abnormal instrument reading	14*	0.31	17.39	54.31	19.33	14.31	1.5	1.5	5.8	23.0
	14†	0.24	22.99	75.05	27.34	16.12				
External leakage - Process medium	8*	0.00	7.63	41.17	19.02	8.19	-	2.0	2.4	4.0
	8†	0.00	8.19	44.23	20.53	9.21				
External leakage - Utility medium	3*	0.00	3.03	14.64	6.05	3.07	-	2.0	5.3	8.0
	3†	0.00	4.41	22.00	9.38	3.45				
Minor in-service problems	10*	0.16	13.29	42.86	15.55	10.23	12.0	2.0	18.1	76.0
	10†	0.15	17.31	57.93	21.25	11.51				
Other	2*	0.00	1.63	7.16	2.80	2.06	25.0	35.0	50.0	65.0
	2†	0.00	1.82	7.64	2.92	2.30				
Parameter deviation	6*	0.07	4.84	15.62	5.61	6.14	56.0	4.0	94.0	146.0
	6†	0.23	5.70	17.18	5.83	6.91				
Plugged/Choked	1*	0.00	1.03	5.36	2.40	1.02	-	5.0	5.0	5.0
	1†	0.01	1.29	4.90	1.81	1.15				
Structural deficiency	10*	0.08	8.07	26.45	9.65	10.23	58.1	2.0	78.7	279.0
	10†	0.08	9.53	32.10	11.79	11.51				
All modes	72*	6.93	69.62	188.25	60.39	73.69	42.2	1.0	36.5	311.0
	72†	3.92	87.48	262.63	88.37	82.90				

Comments
On demand probability for consequence class: Critical and failure mode: *** = 0.0-10⁰

Anexo 4. Datos OREDA para Intercambiadores de Carcasa y Haz de Tubos 2

Maintainable item versus failure mode, to be continued

Item: Heat Exchangers - Shell and tube

	AIR	ELP	ELU	IHT	INL	OTH
Body/shell	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Instrument, flow	4.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Instrument, level	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Instrument, pressure	4.17	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00
Instrument, temperature	8.33	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00
Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Piping	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Seals (gaskets)	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00
Subunit	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00
Support	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tubes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Unknown	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00	1.39
Valves	2.78	11.11	4.17	0.00	0.00	0.00
Total	20.83	13.89	8.33	0.00	0.00	2.78

Maintainable item versus failure mode, continued

Item: Heat Exchangers - Shell and tube

	PDE	PLU	SER	STD	UNK	Sum
Body/shell	2.78	0.00	1.39	8.33	0.00	13.89
Instrument, flow	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	5.56
Instrument, level	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Instrument, pressure	0.00	0.00	1.39	2.78	0.00	9.72
Instrument, temperature	0.89	0.00	1.39	0.00	0.00	11.81
Other	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	1.39
Piping	1.39	0.00	0.00	12.50	0.00	13.89
Seals (gaskets)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Subunit	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Support	0.00	0.00	2.78	0.00	0.00	2.78
Tubes	4.17	0.00	0.00	0.00	0.00	4.17
Unknown	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00	6.94
Valves	3.47	1.39	0.00	2.78	0.00	25.89
Total	12.50	1.39	13.89	26.39	0.00	100.0

The figures are percentages of the total failure rate for the actual maintainable item/failure mode combination.

Anexos 5. Datos OREDA para Intercambiadores de Carcasa y Haz de Tubos 3

Failure descriptor versus failure mode, to be continued

Item: Heat Exchangers - Shell and tube

	AIR	ELP	ELU	IHT	INI	OTH
Blockage/plugged	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Breakage	1.39	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00
Cavitation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Corrosion	2.78	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00
Deformation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
External influence - general	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Faulty signal/indication/warn	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Instrument failure - general	4.17	0.00	2.78	0.00	0.00	0.00
Leakage	0.00	11.11	0.00	0.00	0.00	0.00
Looseness	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00
Material failure - general	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00
Mechanical Failure - general	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
No signal/indicator/warn	2.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Out of adjustment	5.96	0.00	1.39	0.00	0.00	0.00
Sticking	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Unknown	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Vibration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wear	1.39	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	20.83	13.89	8.33	0.00	0.00	2.78

Failure descriptor versus failure mode, continued

Item: Heat Exchangers - Shell and tube

	PDE	PLU	SER	STD	UNK	Sum
Blockage/plugged	2.78	0.00	0.00	2.78	0.00	5.56
Breakage	0.00	0.00	0.00	2.78	0.00	2.78
Cavitation	0.00	0.00	0.00	2.78	0.00	2.78
Corrosion	1.39	0.00	5.96	9.72	0.00	20.83
Deformation	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	1.39
External influence - general	4.17	0.00	0.00	4.17	0.00	8.33
Faulty signal/indication/warn	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	2.78
Instrument failure - general	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	8.33
Leakage	0.00	0.00	2.78	0.00	0.00	13.89
Looseness	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Material failure - general	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Mechanical Failure - general	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00	4.17
No signal/indicator/warn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.78
Other	0.00	0.00	0.00	1.39	0.00	2.78
Out of adjustment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.96
Sticking	1.39	1.39	0.00	0.00	0.00	4.17
Unknown	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Vibration	0.00	0.00	0.00	2.78	0.00	2.78
Wear	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.78
Total	12.50	1.39	13.89	25.39	0.00	100.0

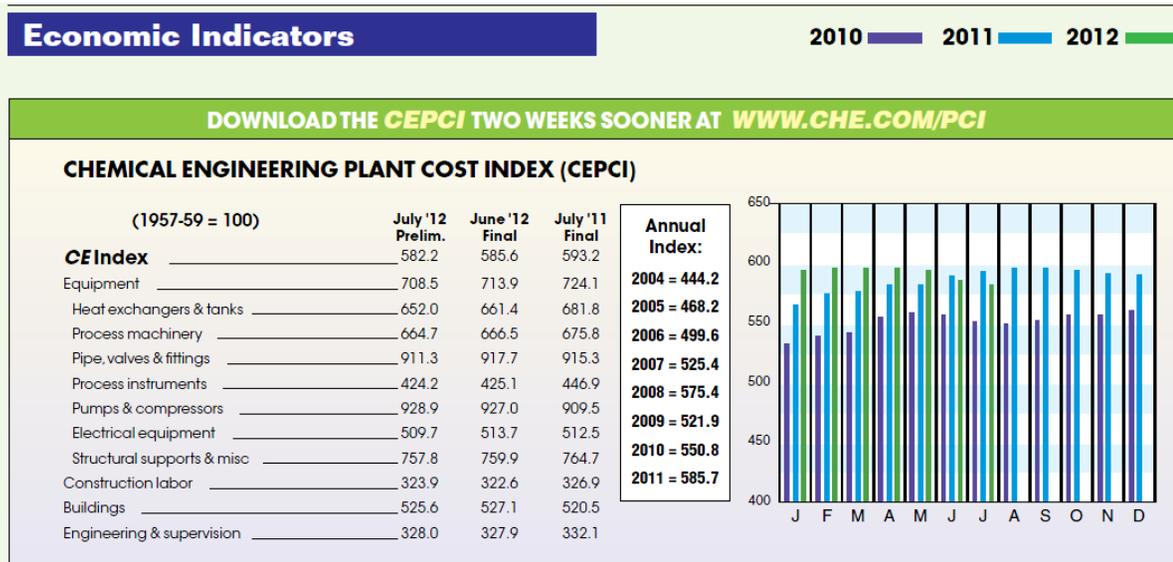
The figures are percentages of the total failure rate for the actual failure descriptor/failure mode combination.

Anexo 6. Indicadores Económicos 1956-2003

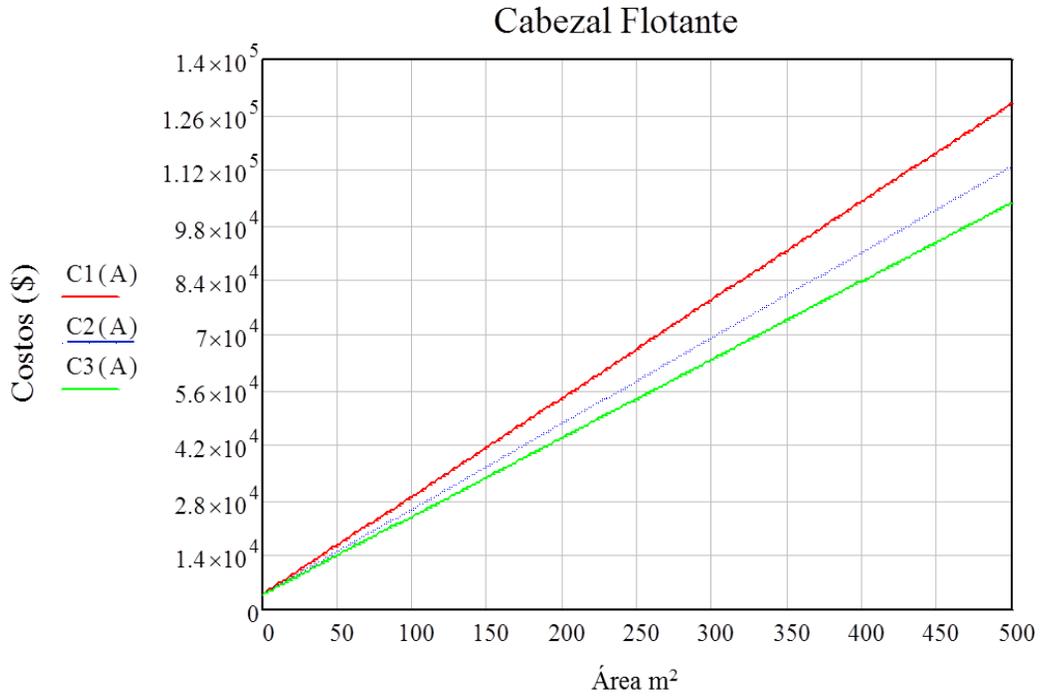
Table 1. CEPI, annual averages (1957-59 = 100)

Year	CEPI	Year	CEPI	Year	CEPI
1956	93.9	1972	137.2	1988	342.5
1957	98.5	1973	144.1	1989	355.4
1958	99.7	1974	165.4	1990	357.6
1959	101.8	1975	182.4	1991	361.3
1960	102.0	1976	192.1	1992	358.2
1961	101.5	1977	204.1	1993	359.2
1962	102.0	1978	218.8	1994	368.1
1963	102.4	1979	238.7	1995	381.1
1964	103.3	1980	261.2	1996	381.7
1965	104.2	1981	297.0	1997	386.5
1966	107.2	1982	314.0	1998	389.5
1967	109.7	1983	316.9	1999	390.6
1968	113.6	1984	322.7	2000	394.3 est'd
1969	119.0	1985	325.3	2001	398.0 est'd
1970	125.7	1986	318.4	2002	401.8 est'd
1971	132.2	1987	323.8	2003	405.6 est'd

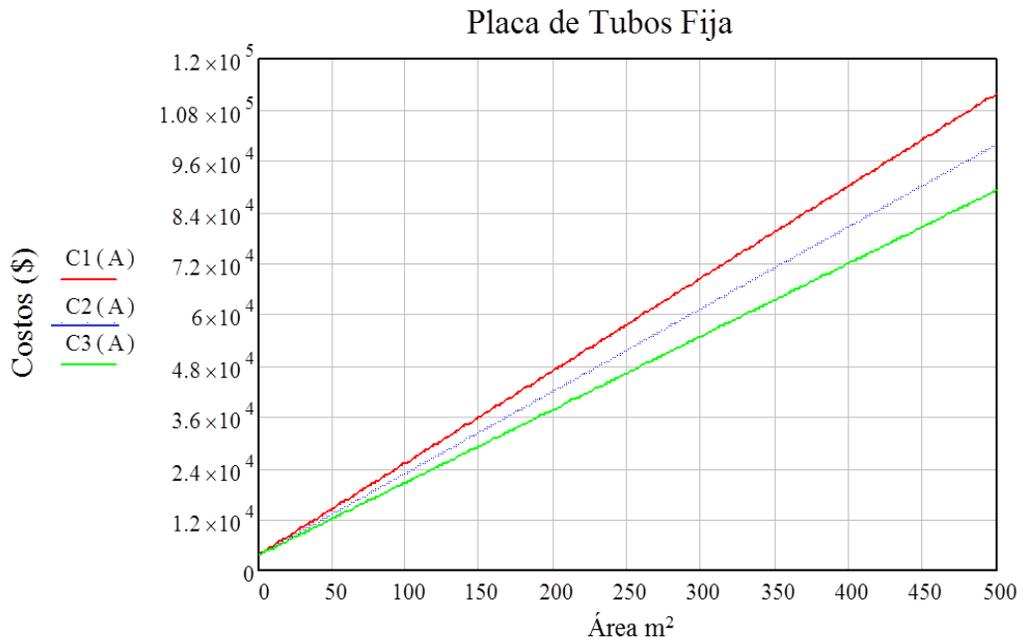
Anexo 7. Indicadores Económicos 2012 CEPCI



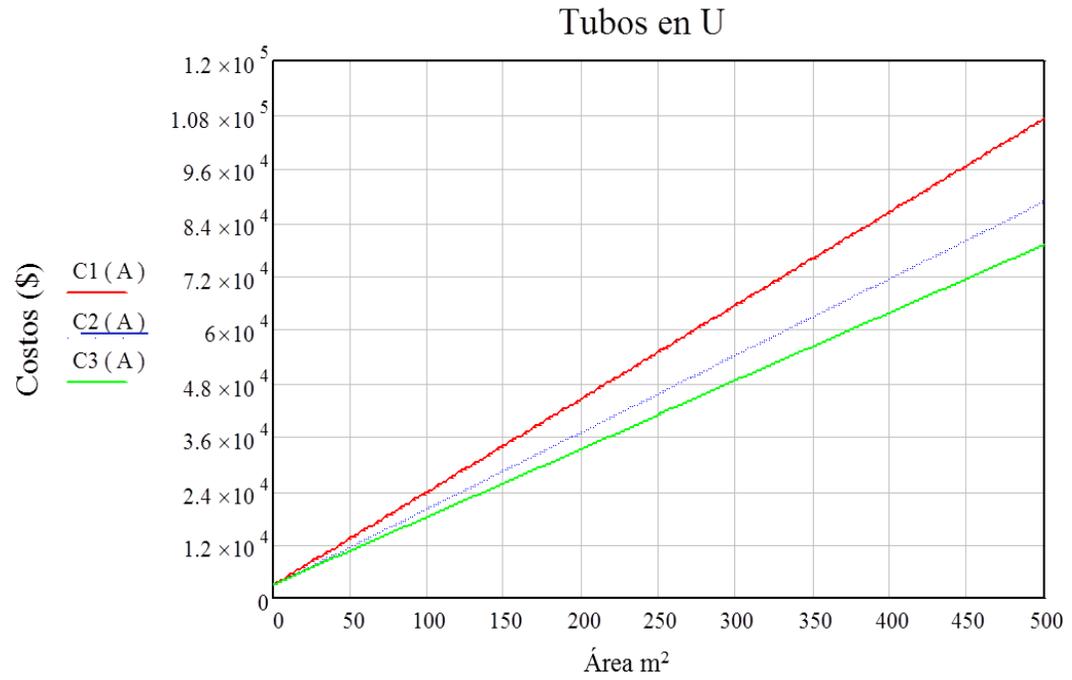
Anexo 8. Aproximación de Costos Actualizados
Cabezal Flotante



Anexo 9. Aproximación de Costos Actualizados
Placa de Tubos Fija

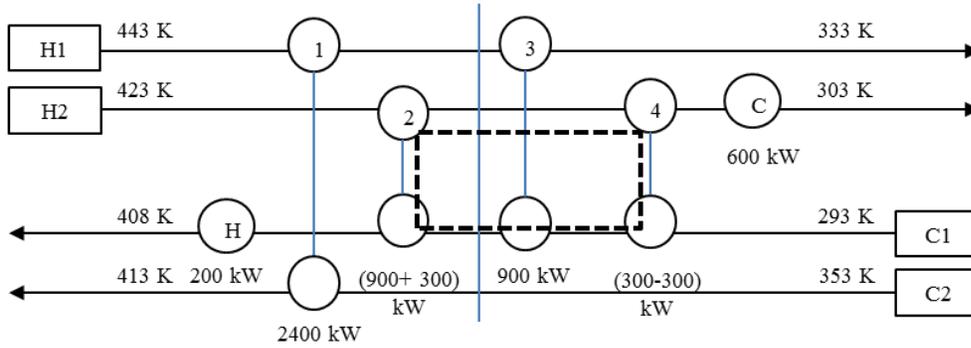


Anexo 10. Aproximación de Costos Actualizados
Tubos en U

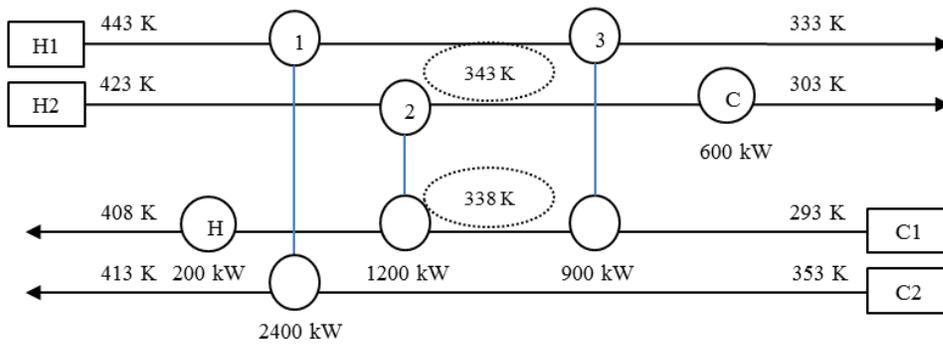


Anexo 11. Proceso de Eliminación de Lazo de Calor

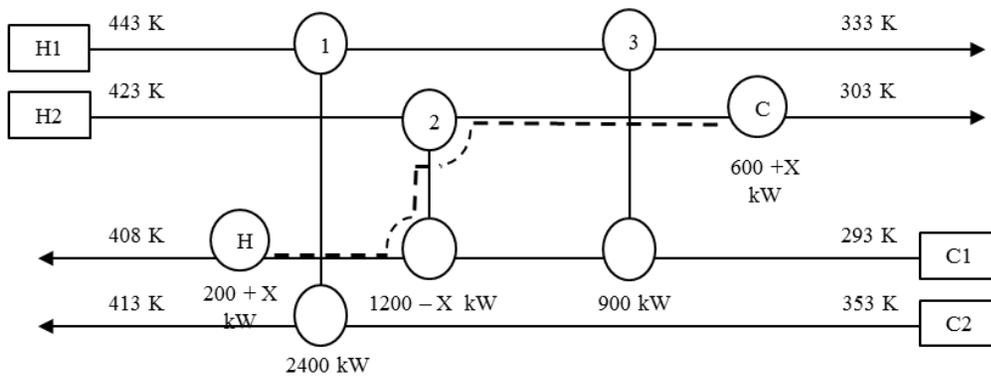
Red Básica con de un Identificación de Lazo



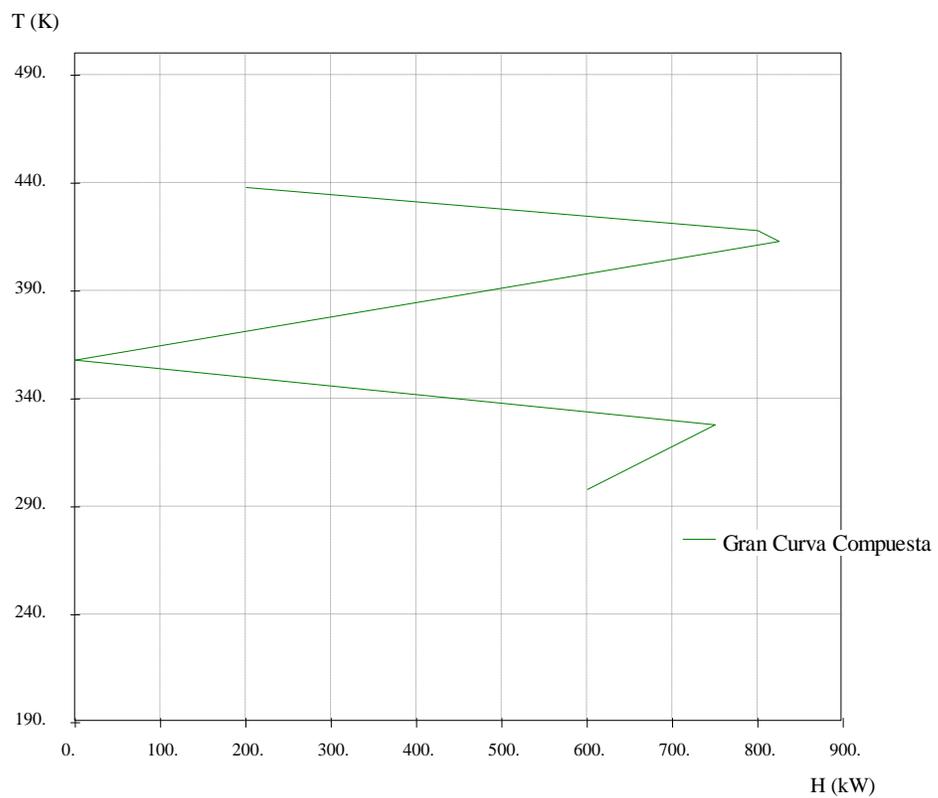
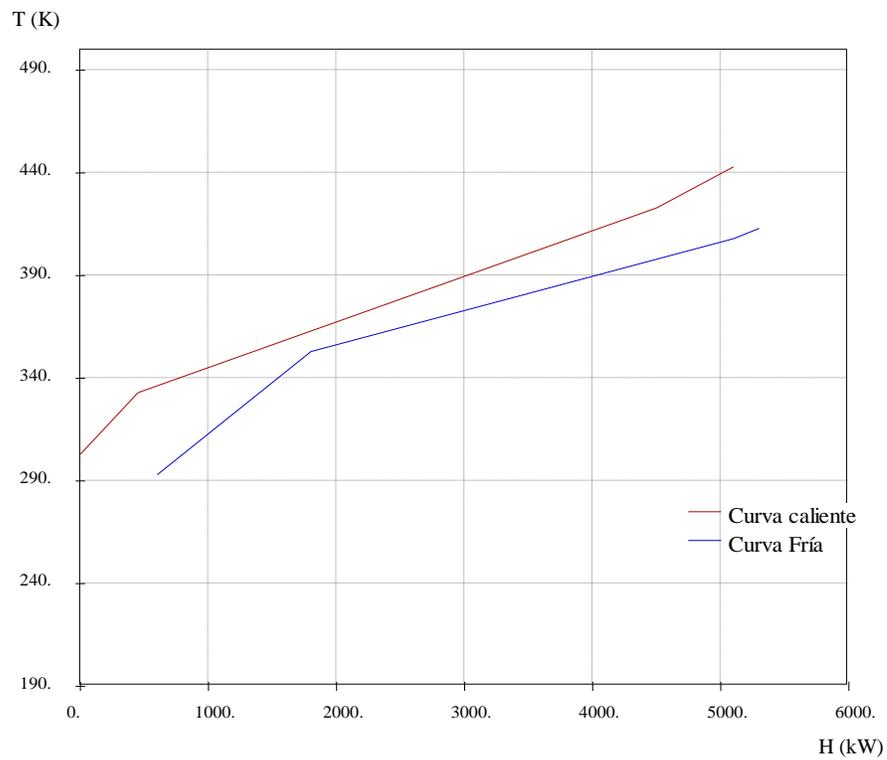
Red Básica con Violación del ΔT_{\min}



Red Principal con Reestablecimiento del ΔT_{\min}



Anexo 12. Curvas Compuestas y Gran Curva Compuesta



Anexo 13. Factores de Corrección para el costo de Intercambiadores de Calor de Carcasa y Haz de Tubos

Material Carcasa/Materia Tubo (f_m)										
Área (m ²)	C.S	C.S/Cu	C.S/Mo	C.S/304	304/304	C.S/316	C.S/Monel	Monel/Monel	C.S/Ti	Ti/Ti
< 10	1	1,05	1,4	1,55	2,3	1,95	2,8	4,5	4,7	11
10-50	1	1,1	1,55	1,75	2,55	2,15	3,05	4,8	5,8	12,2
50-100	1	1,15	1,75	2,15	2,9	2,55	3,55	5,3	7,3	13,9
100-500	1	1,3	2,05	2,6	3,4	3	4,35	6,1	9,4	16,3

Número de Pasos	f_{n-t}
2	1,00
4	1,02
6	1,04
8	1,06
12	1,06

Temperatura (K)	f_T
T < 623	1
623 < T < 823	1,08

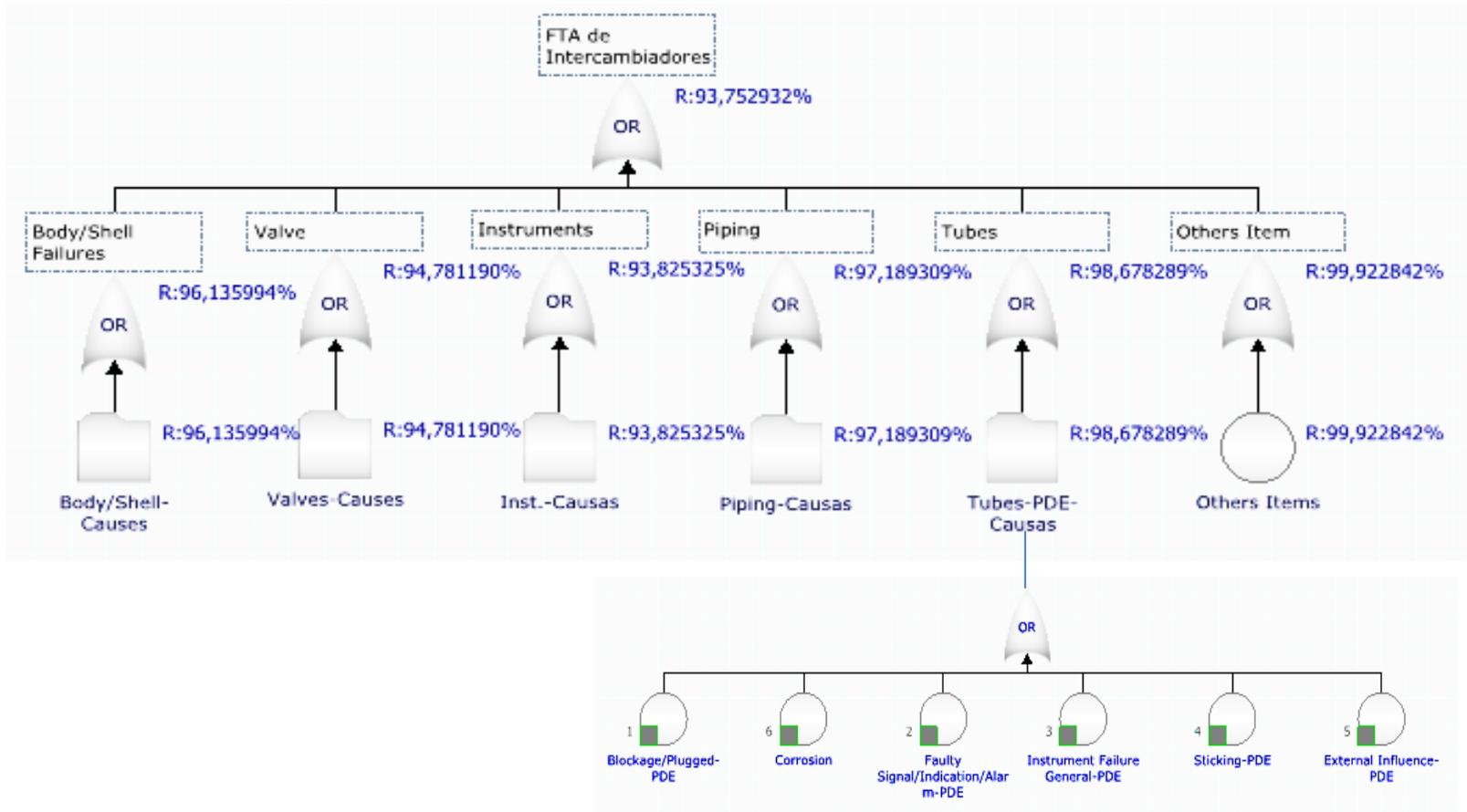
Longitud (m)	f_L
6,1	0,92
7,3	0,90

Diámetro (mm)	Paso (in)	F_{d-t}
19,2	Cuadrado 1	1
19,2	Triangular 1 + 5/16	0,95
19,2	Triangular 1	0,97
25,4	Cuadrado 1 + ¼	1,07
25,4	Triangular 1 + 1/4	0,97

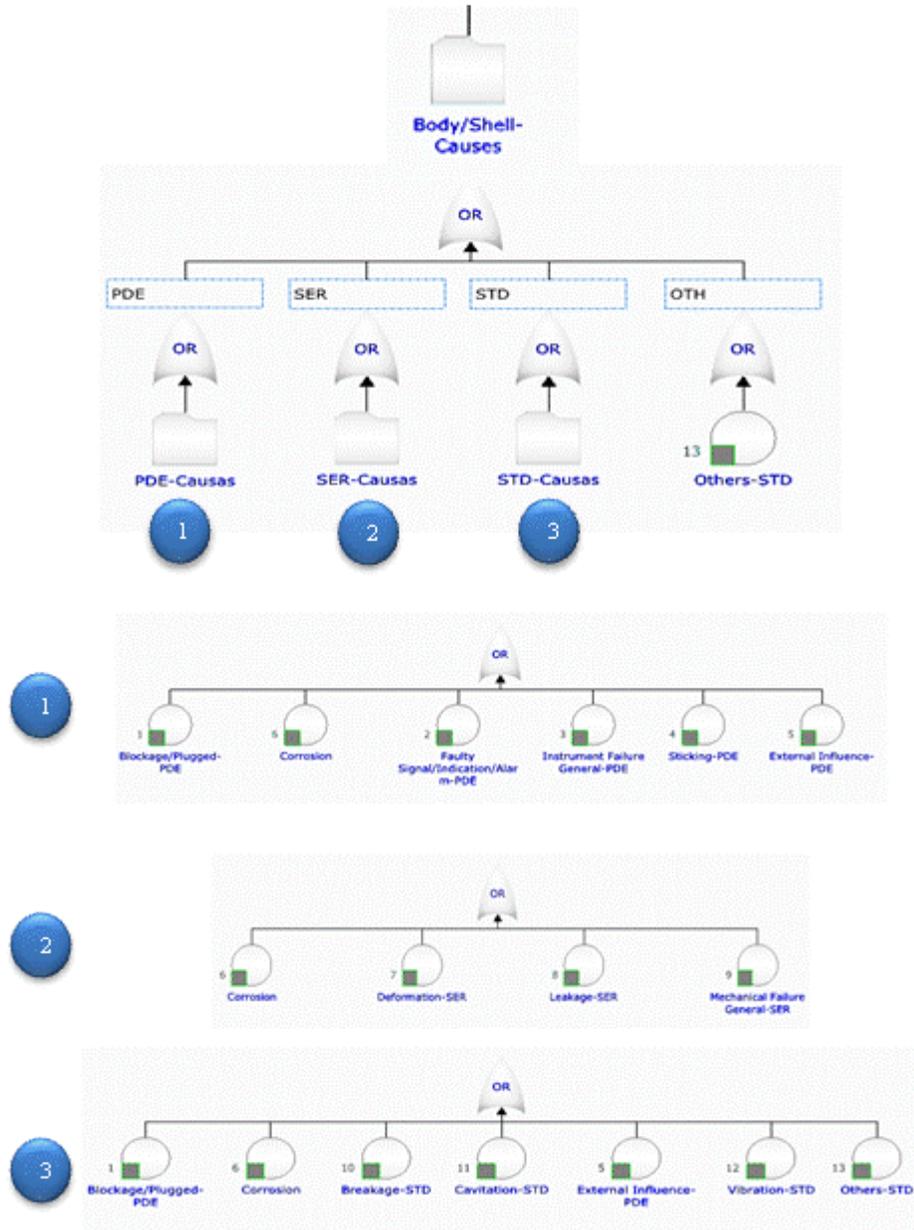
Presión (kPa)	f_p		
	50 (m)	100 (m)	500 (m)
< 1000	1,00	1,00	1,00
1000-2000	1,03	1,08	1,18
2000-3000	1,15	1,20	1,32
3000-4000	1,28	1,35	1,50
4000-6500	1,67	1,75	1,93
6500-8500	1,80	1,90	2,10
8500-13000	2,35	2,45	2,70
13000-18000	3,00	3,15	3,45

Tipo	f_d
AES	1
AEM	0,87
AEU	0,85
AKT	1,20
BES	0,92
BEM	0,80
BEU	0,75
BKT	1,10

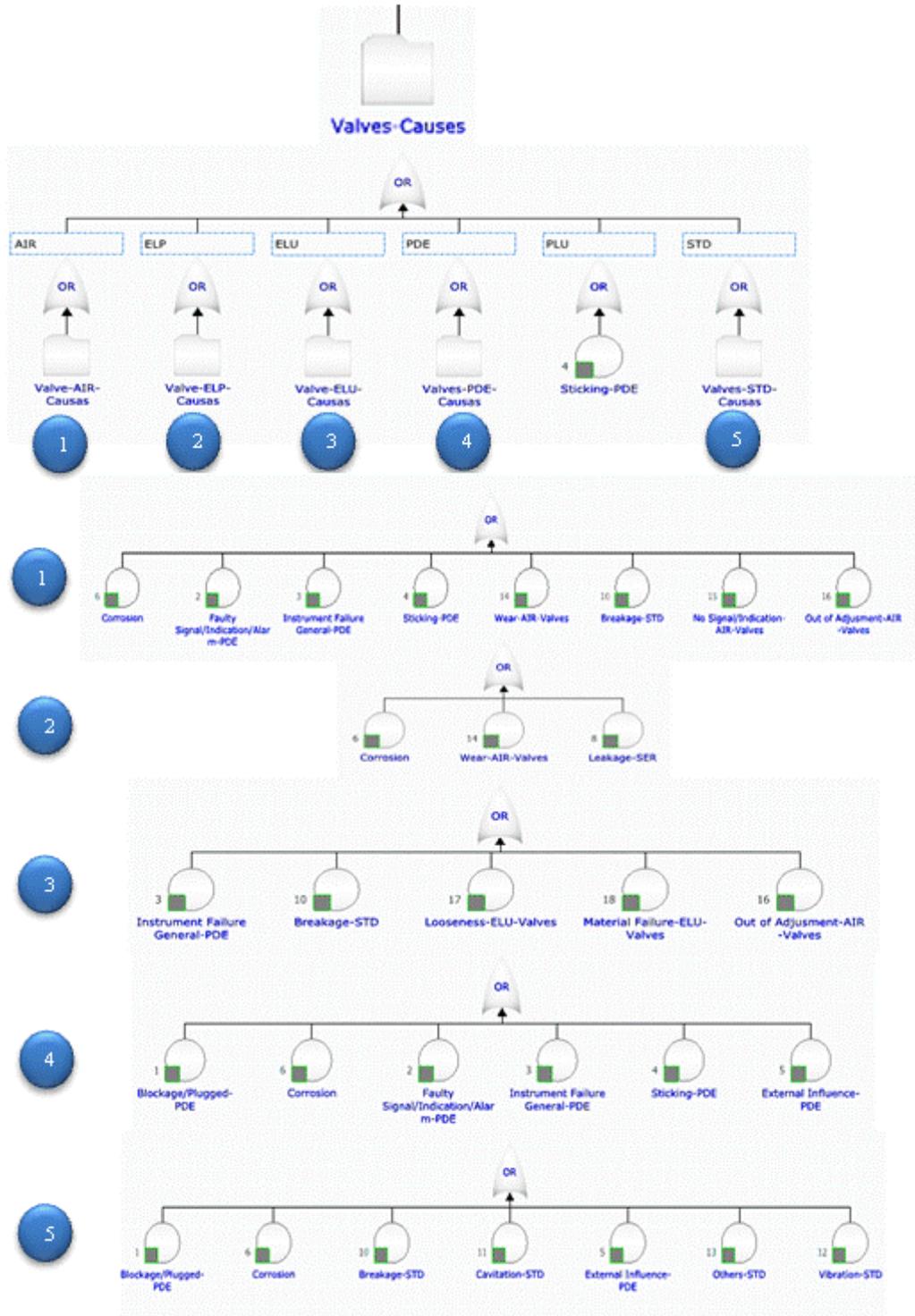
Anexo 14. Árbol de Falla



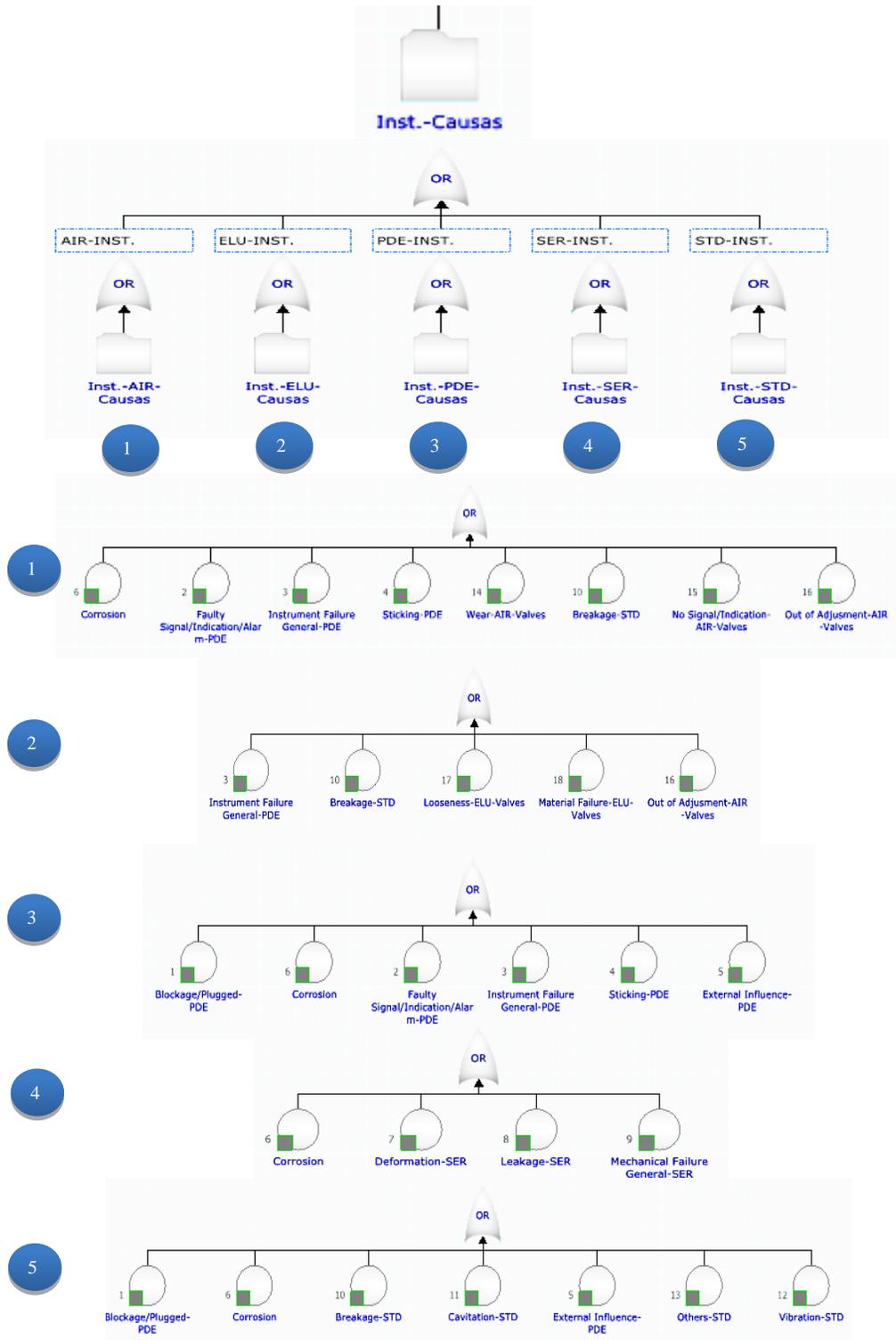
Anexo 14. Árbol de Falla Continuación



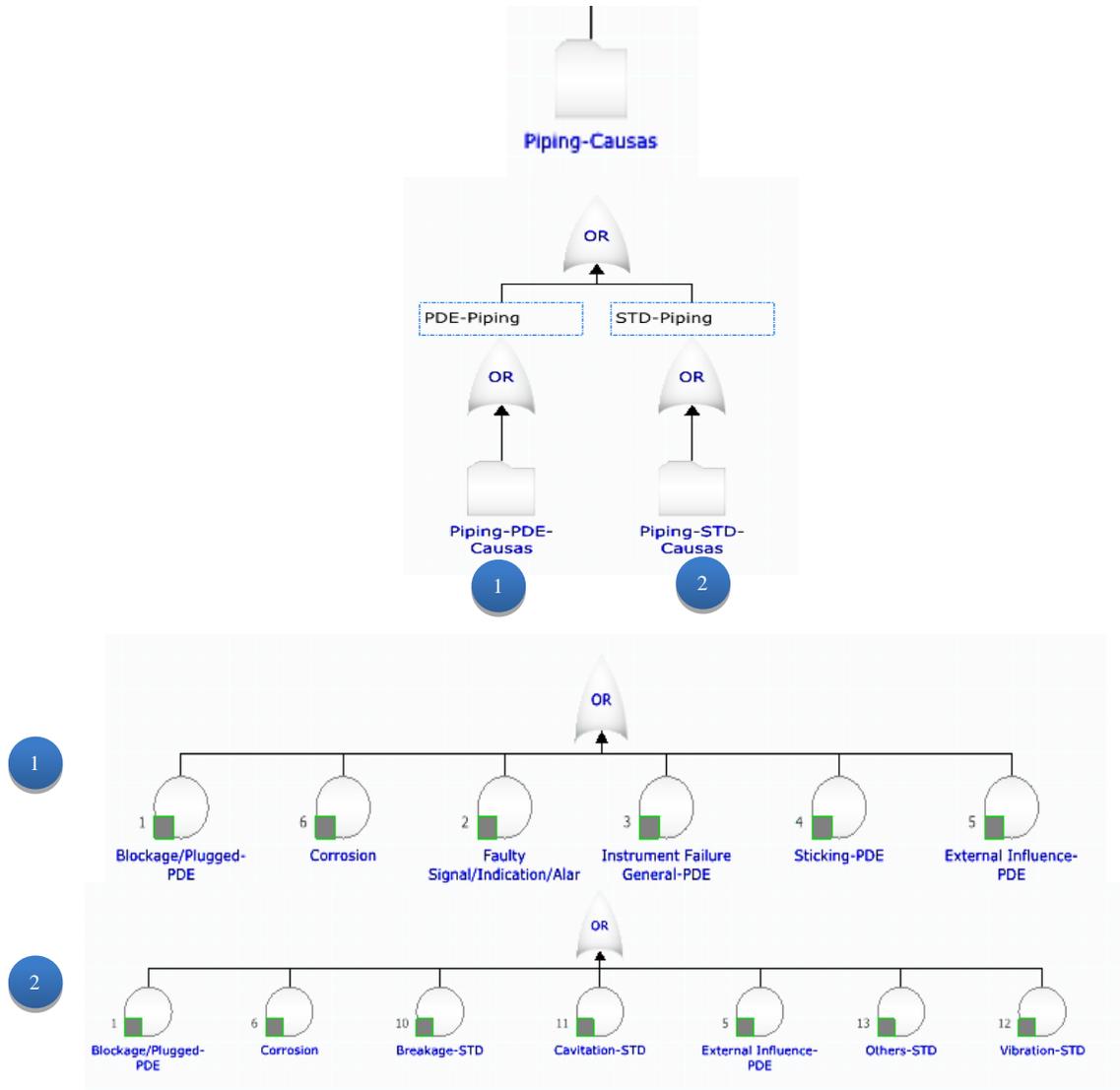
Anexo 14. Árbol de Falla Continuación



Anexo 14. Árbol de Falla Continuación



Anexo 14. Árbol de Falla Continuación



BIBLIOGRAFÍA

- Chernysher, V., Kurokhtin, T., Bashlykov, A., & Rysina, P. (1967). Method for estimating the operating reliability of heat-exchange equipment . *Quality, Reliability, and Lifetime*, I (3), 35-37.
- Deseda, L. (1988). *Métodos estadísticos aplicados*. Caracas, Venezuela: Nueva expresión. 341 p.
- Hall, R., Matley, J., & MCnaughton. (1982). *Current cost of process equipment*. 60 p.
- International Organization For Standarization. (1999). Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance dato of equipment.
- Jacek, M., K.Hiren, & Castillo, F. (2003). Area target for heat exchanger networks using linear programming. *Industrial Engineering Chemical Resorce*, XLII (8), 1723-1730.
- Jardine, A., & Buzacott, J. (1985). Equipment reliability and maintenance. *European journal of operational research*, XIX (8), 285-296.
- Kemp, I. (2007). *Pinch analysis and process integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy*, 2da ed. Burlington: Elsevier. 391 p.
- Melinguen, D. (2010). Life Cicle Cost Model for Condition Monitoring of Heat Exchanger. Trabajo de grado de maestría. Norwegian University of Science and Technology. Nueva York.
- Mora, A. (2009). *Mantenimiento planeación, ejecución y control*. Bogotá: Alfaomega. 528 p.
- Nishida, N. L. (1997). Studies in chemical process design and synthesis . *AICHE Journal* , XXIII (1), 77-93.
- OREDA. (2002). *Handbook of Offshore Reliability Data*. 4ta ed. Trondheim: OREDA. 835 p.
- Quesada, I., & Grossman, I. (1993). Global optimization Algorithm for heat exchanger networks. *Industrial Engineering Chemical Resource*, XXXII (3), 487-499.

- Sikos, L., & Klemeš, J. (2009). Reliability, availability y maintenance optimisation of heat exchanger networks. *Applied Thermal Engineering*, XXX (4), 63-69.
- Standard of tubular exchangers manufactures association. (2009). *Handbook TEMA*. 8va ed. Nueva York: TEMA. 302 p.
- Vergara, E. (2007). *Analisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del sistema de crudo diluido de Petrozuata*. Tesis de grado. Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Yee, T. F., & Grossmann, I. (1990). Simultaneous optimization models for heat integration-II. Heat exchnager network sinthesis. *Computers Chemical Engineering*, XIV (10), 1165-1184.
- Yee, T., & Grossmann, I. E. (1990). Simultaneous optimization models for heat integration-I. Area and energy targeting and modeling of multi-stream exchangers. *Computers Chemical Engineering*, XIV (10), 1151-1164.