

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
QUÍMICO

**ACTUALIZACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO DE  
INTERCAMBIADORES DE CALOR**

**Karina Andrea Vilches Orrego**

**Profesor guía:**

**José Torres Titus.**

**2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al término de esta etapa quiero agradecer en especial a mis padres, Rosa y Ramón, por su apoyo incondicional, por la comprensión y por entregarme los valores que hicieron que me convirtiera en la persona que soy ahora.*

*A mi hermano, César, por estar siempre en los buenos y malos momentos, dándome palabras de aliento para lograr este último gran paso.*

*A mi amiga Katherine, por su apoyo y amistad durante todos los años que nos conocemos. Agradezco a su familia por quererme y abrirme las puertas de su casa.*

*Agradezco también al Profesor José Torres Titus, por su paciencia, apoyo y disposición en este largo proceso que culmina.*

*Gracias a todas las personas que me apoyaron durante todo el proceso.*

## RESUMEN

La realización de la presente memoria de título tiene como objetivo general actualizar la validez de los parámetros de diseño los intercambiadores de calor.

Se definió que los equipos a analizar serían los intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa y los intercambiadores de Placas. La principal razón de su elección fue la gran importancia que tienen estos equipos en el ahorro del consumo energético y la simpleza en su diseño.

Posteriormente se realizó una descripción del procedimiento de diseño de los intercambiadores de calor bajo parámetros recomendados.

El trabajo consistió en realizar en primera instancia el diseño de los intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa en base a parámetros recomendados de velocidad de transporte de los fluidos. (3 -9 Pie/s). Se obtuvo el Costo de Inversión de los intercambiadores diseñados, conjuntamente se calculó el Costo de Operación para países de la OCDE, EEUU y para Chile. Con estos resultados se obtuvo la relación Costos de Inversión versus Costos de Operación donde se identificó la velocidad óptima de diseño con sus respectivos Costos de Inversión y Costos de Operación mínimos.

A continuación se procedió el diseño de los intercambiadores de calor, en base a parámetros fuera de los rangos recomendados de velocidad, se calculó el Costo de inversión y el Costo de Operación para cada uno de los intercambiadores de calor diseñados. Se obtuvo una nueva relación de costos, en la cual se determinó la velocidad óptima de diseño, con sus respectivos Costo de Inversión y Costo de operación mínimo.

Se realizó una comparación entre las velocidades obtenidas en ambos casos, para el caso de los cálculos en base a parámetros recomendados se obtuvo una velocidad que se encuentra dentro del rango establecido, 3 -9 Pie/s, mientras que para los parámetros fuera de rango recomendado el valor obtenido fue de 2 Pie/s, con estos datos se concluyó que los parámetros deben actualizarse, disminuir la velocidad con respecto a la recomendada para así obtener menores costos de operación.

Para el caso de los intercambiadores de calor de placas, el análisis de los parámetros se realizó de la misma manera que para los intercambiadores de Tubos y Carcasa, obteniéndose una velocidad óptima de diseño, en base a parámetros fuera de rango recomendado, de 0,35 m/s la cual está por debajo del rango permitido, 1 -3 m/s. con esto se concluyó que se debe disminuir la velocidad recomendada para así obtener menores costos de operación.

De manera general, se determinó que los parámetros establecidos deben actualizarse para obtener un menor costo de operación, lo que se traduce en una disminución del consumo energético.

## **INDICE**

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes generales .....</b>	<b>2</b>
2.1 Antecedentes energéticos históricos:.....	2
2.1.1 El hombre y la energía .....	2
2.1.2 La energía en el siglo XX .....	3
2.1.3 Situación energética en el siglo XX en Chile .....	5
2.1.4 Situación energética actual .....	5
2.1.5 Situación energética actual en Chile .....	8
2.2 Descripción del problema .....	11
2.3 Objetivos .....	12
2.3.1 Objetivo general .....	12
2.3.2 Objetivos específicos .....	12
2.4 Metodología .....	13
<b>3. Marco teórico.....</b>	<b>14</b>
3.1 Intercambiadores de calor .....	14
3.1.1 Clasificación de intercambiadores de calor .....	14
3.1.1.1 Grado de contacto entre fluidos.....	15
3.1.1.2 Operación.....	15
3.1.1.3 Función.....	18
3.1.1.4 Construcción .....	18
3.1.1.4.1 Intercambiadores de calor de Doble tubo o tubos concéntricos .....	18
3.1.1.4.2 Intercambiadores de calor de tubos y carcasa .....	20
3.1.1.4.3 Intercambiador de calor de Placas .....	27
3.2 Consideraciones de Diseño .....	34
3.2.1 Intercambiador de tubos y carcasa .....	34
3.2.2 Intercambiador de placas .....	44
<b>4. Desarrollo de la problemática .....</b>	<b>52</b>
4.1 Criterio de selección de equipos a diseñar.....	52
4.2 Determinación de costos.....	53
4.2.1 Costos de Inversión de Intercambiadores de Tubos y Carcasa .....	53
4.2.2 Costos de inversión, Intercambiadores de placas .....	54
4.2.3 Costos de operación de Intercambiadores de Tubos y Carcasa .....	54
<b>5. Diseño de equipos .....</b>	<b>56</b>
5.1 Diseño de Intercambiadores de Tubos y Carcasa.....	56
5.1.1 Diseño en base a parámetros recomendados.....	56
5.1.2 Diseño en base a parámetros fuera de rango recomendado .....	74
5.2 Intercambiadores de placas .....	87
5.2.1 Diseño de equipos en base a parámetros fuera de rango recomendado.....	87

**6. Análisis de resultados .....98**  
    6.1 Intercambiador de Tubos y Carcasa .....98  
    6.2 Intercambiador de Placas..... 100

**Conclusión.....101**

**Bibliografía .....104**

**ANEXO I .....105**

**ANEXO II .....111**

**ANEXO III .....130**

**ANEXO IV .....135**

## INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Matriz energética pre y post Revolución Industrial	2
Figura N° 2: Consumo Energético mundial a fines de siglo XX	4
Figura N° 3: Consumo energético mundial sectorial	5
Figura N° 4: Consumo Energético Unión Europea	6
Figura N° 5: Evolución mundial de precios de Gas Natural	7
Figura N° 6: Evolución mundial de precios de Petróleo	7
Figura N° 7: Evolución mundial de precios de Carbón.	8
Figura N° 8: Consumo Nacional de Energía	9
Figura N° 9: Evolución consumo energético sector industrial y minero.	10
Figura N° 10: Diagrama de flujo paralelo	16
Figura N° 11: Diagrama de flujo en contracorriente	16
Figura N° 12: Diagrama de flujo cruzado de un solo paso	17
Figura N° 13: Diagrama de flujo cruzado de paso múltiple	17
Figura N° 14: Esquema de un Intercambiador calor de Tubos Concéntricos	19
Figura N° 15: Diagrama de un Intercambiador de Tubo y Carcasa	21
Figura N° 16: Disposición del haz de tubos arreglo Cuadrado	22
Figura N° 17: Disposición del haz de tubos arreglo Triangular	22
Figura N° 18: Tipos de carcasas	23
Figura N° 19: Tipos de cabezales fijos	24
Figura N° 20: Tipos de cabezales móviles	25
Figura N° 21: Tipos de deflectores	26
Figura N° 22: Esquema de un Intercambiador de calor de placas	29
Figura N° 23: Diagrama de flujo en Serie	30
Figura N° 24: Diagrama de flujo en paralelo	30
Figura N° 25: Tipos de placas	32
Figura N° 26: Esquema de una placa	32
Figura N° 27: Procedimiento de diseño, Intercambiador de Tubos y Carcasa	57
Figura N° 28: Relación A Costos de Inversión vs Costos de Operación.	64
Figura N° 29: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE	65
Figura N° 30: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU	66
Figura N° 31: Relación B Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile	68
Figura N° 32: Relación B, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE	69
Figura N° 33: Relación B Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU	70
Figura N° 34: Relación C, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile	72
Figura N° 35: Relación C, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE	73
Figura N° 36: Relación C, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU	74

Figura N° 37: Relación A fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile.	76
Figura N° 38: Relación A fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE.	77
Figura N° 39: Relación A fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU	78
Figura N° 40: Relación B fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile.	80
Figura N° 41: Relación B fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de operación, OCDE	81
Figura N° 42: Relación B fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU	82
Figura N° 43: Relación C fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile	84
Figura N° 44: Relación C fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE.	85
Figura N° 45: Relación C fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU	86
Figura N° 46: Procedimiento de diseño, Intercambiadores de Placas	88
Figura N° 47: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile	95
Figura N° 48: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE	96
Figura N° 49: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU	97
Figura N° 50: Comparación de curva de costos	99

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Consumo de energía sector industrial y minero	9
Tabla 2: Tamaños estándar de cañerías	20
Tabla 3: Tipos de materiales para tubos concéntricos.	20
Tabla 4: Tipos de materiales de construcción Tubos-Carcasa	27
Tabla 5: Tipos de empaquetaduras	29
Tabla 6: Tipos de materiales de placas	33
Tabla 7: Costos de Energía Eléctrica año 2012	55
Tabla 8: Condiciones de proceso A, Planta de Oxígeno.	56
Tabla 9: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa	59
Tabla 10: Resumen A de cálculos obtenidos, Intercambiadores de Tubos y Carcasa	63
Tabla 11: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, Chile	63
Tabla 12: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, OCDE	64
Tabla 13: Resumen de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, EEUU	65
Tabla 14: Condiciones de proceso B, Planta de Oxígeno	66
Tabla 15: Resumen B de cálculos, Intercambiadores de Tubos y Carcasa	67
Tabla 16: Resumen B de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, Chile	67
Tabla 17: Resumen B Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, OCDE	68
Tabla 18: Resumen B Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, EEUU	69
Tabla 19: Condiciones de proceso C, Planta de Amoniaco	70
Tabla 20: Resumen C de cálculos, Intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa	71
Tabla 21: Resumen C Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, Chile	71
Tabla 22: Resumen C Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, OCDE	72
Tabla 23: Resumen C Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, EEUU	73
Tabla 24: Condiciones de proceso A, Planta de Oxígeno	74
Tabla 25: Resumen A cálculos fuera de rango, Intercambiadores de Tubos y Carcasa	75
Tabla 26: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, Chile	75
Tabla 27: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, OCDE	76
Tabla 28: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, EEUU	77
Tabla 29: Condiciones de proceso B, Planta de Oxígeno	78
Tabla 30: Resumen B cálculos fuera de rango, Intercambiadores de Tubos y Carcasa	79
Tabla 31: Resumen B de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, Chile	79

Tabla 32: Resumen B de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, OCDE	80
Tabla 33: Resumen B de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, Chile	81
Tabla 34: Condiciones de proceso, Planta de Amoniaco	82
Tabla 35: Resumen C cálculos fuera de rango, Intercambiadoresde Tubos y Carcasa	83
Tabla 36: Resumen C de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, Chile	83
Tabla 37: Resumen C de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, OCDE	84
Tabla 38: Resumen C de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, EEUU	85
Tabla 39: Condiciones de proceso, Planta de Ácido	87
Tabla 40: Resumen de cálculos, Intercambiadores de Placas	94
Tabla 41: Resumen de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, Chile	94
Tabla 42: Resumen de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, OCDE	95
Tabla 43: Resumen de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidas, EEUU	96
Tabla 44: Resumen de velocidades óptimas obtenidas, condiciones de proceso A	98
Tabla 45: Resumen de velocidades óptimas obtenidas, condiciones de proceso C	98
Tabla 46: Resumen de velocidades óptimas obtenidas, condiciones de proceso C	98
Tabla 47: Resumen de velocidad obtenida, condiciones de proceso, planta de Ácido	100

## **1. Introducción**

La situación energética actual tanto en Chile como en el resto del mundo es un tema discutido en todos los sectores, ésta situación ha provocado un fuerte incremento en los costos de los combustibles fósiles, costos que vienen asociados a las de fuentes de energía que presentan el mayor consumo y que en la actualidad están presentando un agotamiento en las reservas mundiales.

Como resultado de ésta situación es necesario buscar nuevas fuentes de energía o promover la optimización de la utilización de la misma, tanto en los procesos productivos como en el sector residencial y comercial. Gracias a que la energía esté estrechamente ligada a la industria, dependencia que radica principalmente en la necesidad de provisión para los diversos procesos de producción, se convierte en una necesidad imperante la búsqueda de la optimización de los procesos productivos, que redunde en menores costos de producto y posibles ahorros de energía.

Éste trabajo abordará la posible actualización de los parámetros de diseño de Intercambiadores de calor, buscando principalmente una posible disminución en los consumos energéticos.

Para esto es de suma importancia conocer los consumos de energía por país y sector para poder desarrollar una mejora en la utilización óptima como también conocer los costos operacionales asociados.

En síntesis lo que se buscará es idear propuestas de diseño de Intercambiadores de calor que refuercen, mejoren o incluso propongan una eventual optimización del recurso energético, lo que indudablemente se traducirá en ahorros del consumo energético.

Para el cumplimiento de lo anterior se darán a conocer los parámetros de diseño de equipos de proceso recomendados, los cuales serán analizados para comprobar su actual validez. También se verificará si estos parámetros, los cuales fueron determinados a partir de la propia experiencia de ingenieros hace décadas atrás, han sufrido alguna variación con el tiempo.

## 2. Antecedentes generales

### 2.1 Antecedentes energéticos históricos:

#### 2.1.1 El hombre y la energía

A partir de la Revolución Industrial<sup>1</sup> el consumo energético comienza a tomar un lugar importante en la industria europea dando inicio en Inglaterra a fines del siglo XVIII.

Como resultado de ésta Revolución se logró un significativo cambio en la matriz energética de la época, aumentando el consumo de energía mecánica en la industria, todo gracias a la invención de la máquina de vapor. En la Figura N°1 se puede apreciar la variación mencionada:

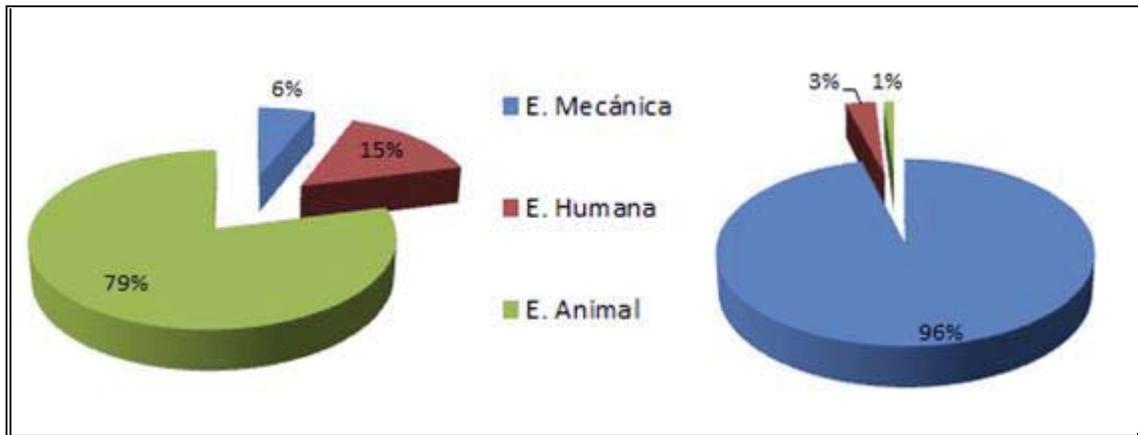


Figura N° 1: Matriz energética pre y post Revolución Industrial

Fuente: Elaboración propia con base de datos International Energy Agency

<sup>1</sup>Revolución industrial: Período comprendido entre finales del siglo XVIII y comienzos del Siglo XIX, en la cual Europa sufrió una serie de transformaciones, siendo la de mayor importancia, el reemplazo del trabajo manual por la industria manufacturera.

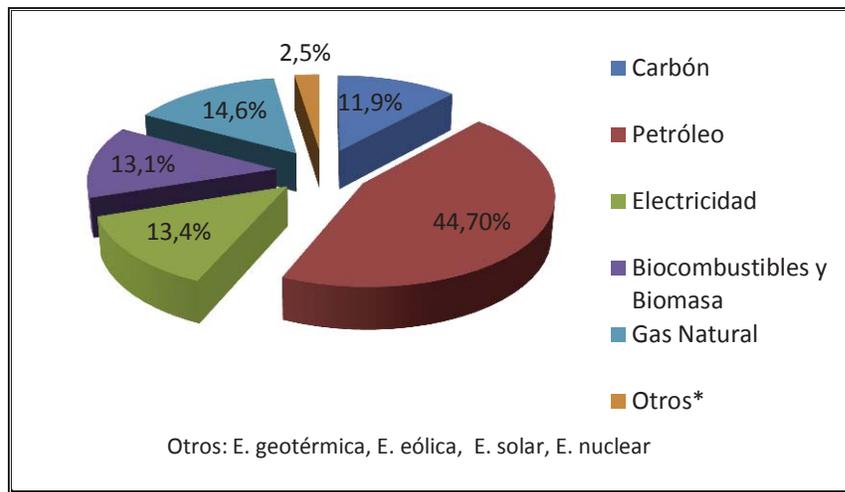
Se puede deducir que la Revolución Industrial impuso un espectacular desarrollo de las fuerzas productivas y de los medios de transporte, asociados a la existencia de energía abundante y económica como también a los avances de la ciencia, que permitió comprender el funcionamiento de las máquinas térmicas, hacerlas más eficientes y construir nuevos dispositivos como los motores y generadores eléctricos que ayudaron en gran medida a aumentar la productividad de las industrias.

### **2.1.2 La energía en el siglo XX**

La historia de la energía durante el siglo XX estuvo marcada por el consumo en continuo aumento de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural.

El petróleo se consumía de manera indiscriminada y no fue hasta la crisis de 1973 que disminuyó de manera considerable, esto provocó un fuerte estruendo en el mercado petrolero, aumentando los precios del crudo, por lo que fue necesario que los países industrializados encontraran formas de uso más eficiente del combustible, gracias a esto se estabiliza el consumo en el sector industrial, dando lugar a desarrollo de nuevas tecnologías, avances en la explotación de fuentes alternativas de energía, de esta manera surge la energía geotérmica, energía solar y energía eólica.

El surgimiento de nuevas fuentes de energía amplía de cierto modo la matriz energética del mundo, lográndose casi a finales de siglo el panorama que se expone en la Figura N°2:



**Figura N° 2: Consumo Energético mundial a fines de siglo XX**

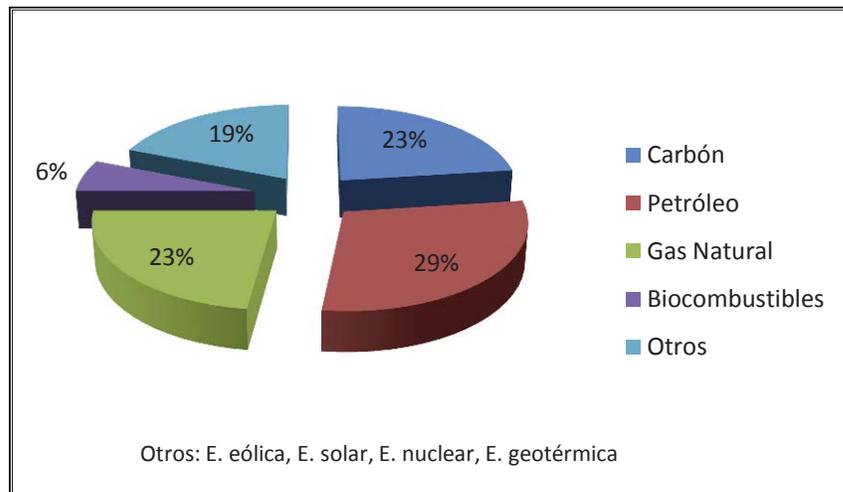
**Fuente: Elaboración propia con base de datos International Energy Agency**

Incluso así después de la crisis mencionada, el petróleo sigue siendo por excelencia el producto mayormente consumido en el mundo.

Por su parte el sector industrial constituía el 33% del consumo mundial de energía, un tercio aproximadamente del consumo mundial de energía, superando al sector transporte el cual poseía un 23,1% de consumo, pero bajo el consumo del sector residencial y comercial, 37,8% de consumo, y el sector para usos no energéticos con un consumo de 6,1 %.

El consumo energético en el sector industrial a finales del año 1973 se distribuía de manera regular entre los consumibles de mayor importancia de la época, esto se debió a la crisis del petróleo mencionada anteriormente, debido a esto se pudo amplificar de alguna manera la matriz energética mundial. Sin embargo los combustibles fósiles siguieron teniendo gran importancia en la matriz energética.

En la Figura N°3 se muestra la distribución del consumo energético mundial:



**Figura N° 3: Consumo energético mundial sectorial**

**Fuente: Elaboración propia con base de datos International Energy Agency**

### **2.1.3 Situación energética en el siglo XX en Chile**

El país tuvo un período de expansión industrial a partir del siglo XIX con el desarrollo de la minería del cobre, las explotaciones de las minas de carbón y el despegue de las salitreras, todo esto permitió que se produjera una estrecha relación entre minería e industria, debido a las exigentes necesidades de las salitreras por insumos para la elaboración de los productos, por esta razón se produjo el surgimiento de numerosas maestranzas y fundiciones orientadas a satisfacer la demanda.

En 1950 el grado de industrialización era alrededor de un 23%, nivel que representa casi la totalidad de la industrialización de la América Latina

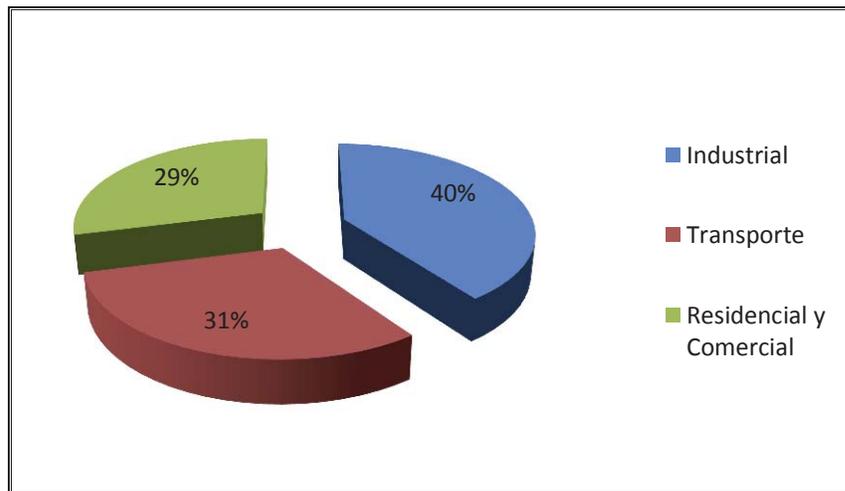
### **2.1.4 Situación energética actual**

La situación energética actual está marcada por una demanda creciente por parte de los principales consumidores, transporte y actividad industrial, y una oferta que no alcanza a cubrir las necesidades.

Lamentablemente el panorama que se muestra no da muchas esperanzas con respecto al consumo energético, debido a que este sigue en aumento y las reservas de recursos naturales cada vez van disminuyendo más y más.

El consumo energético en el mundo, particularmente en los países desarrollados es protagonizado por el transporte, el sector residencial y comercial, la principal causa se debe a que los países industrializados han experimentado un descenso en el consumo energético del sector industrial, esto se atribuye a la tendencia de las industrias de mayor producción a apostar por nuevas tecnologías las cuales aportan la optimización del proceso de elaboración, logrando así una disminución en el consumo de energía, pero no obstante no han logrado obtener un menor valor económico en el producto final.

La Unión Europea en la actualidad presenta un consumo energético que se presenta en la Figura N°4:

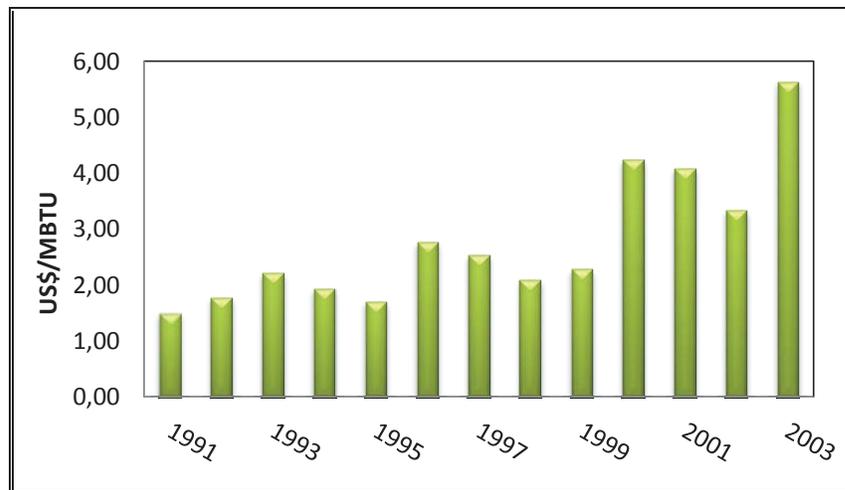


**Figura N° 4: Consumo Energético Unión Europea**

**Fuente: Elaboración propia con base de datos International Energy Agency**

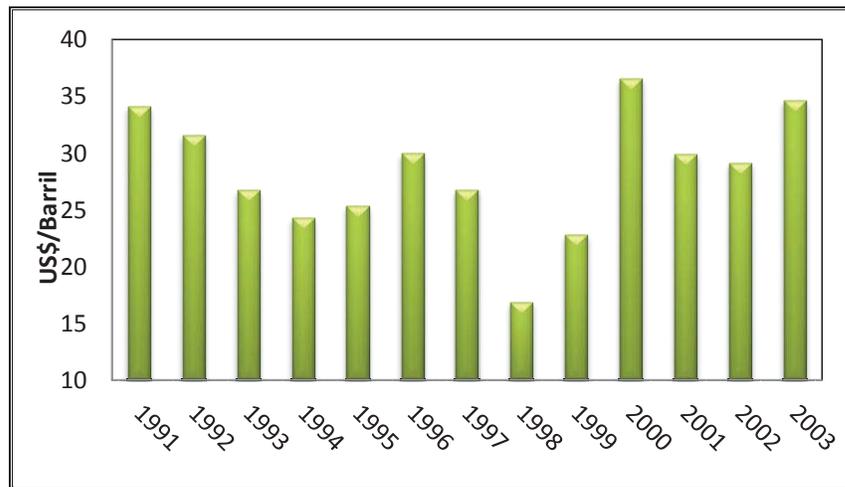
El consumo industrial se distribuye entre diversos sectores, siendo los de mayor importancia: industrias químicas de gran envergadura, siderúrgicas, maquinaria y equipamiento, alimentario y minería.

Las Figuras N°5, N°6, N°7 muestra las grandes fluctuaciones que han sufrido los precios de los combustibles fósiles en los últimos años.



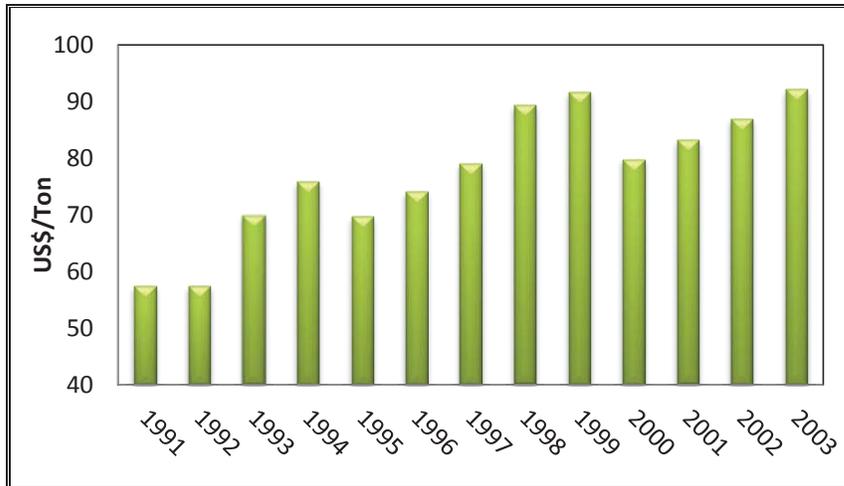
**Figura N° 5: Evolución mundial de precios de Gas Natural**

**Fuente: Elaboración propia con base de datos International Energy Agency**



**Figura N° 6: Evolución mundial de precios de Petróleo**

**Fuente: Elaboración propia con base de datos International Energy Agency**



**Figura N° 7: Evolución mundial de precios de Carbón.**

**Fuente: Elaboración propia con base de datos International Energy Agency**

Como se puede apreciar, los precios de los combustibles fósiles han sufrido variaciones significativas, aunque sigue siendo el petróleo el que presenta la mayor fluctuación de precios.

#### **2.1.5 Situación energética actual en Chile**

Para un país en desarrollo como el nuestro, el tema energético es vital debido al crecimiento económico que está sufriendo el sector industrial. La base principal para obtener un crecimiento sólido es tener una fuente de energía segura y con costos adecuados.

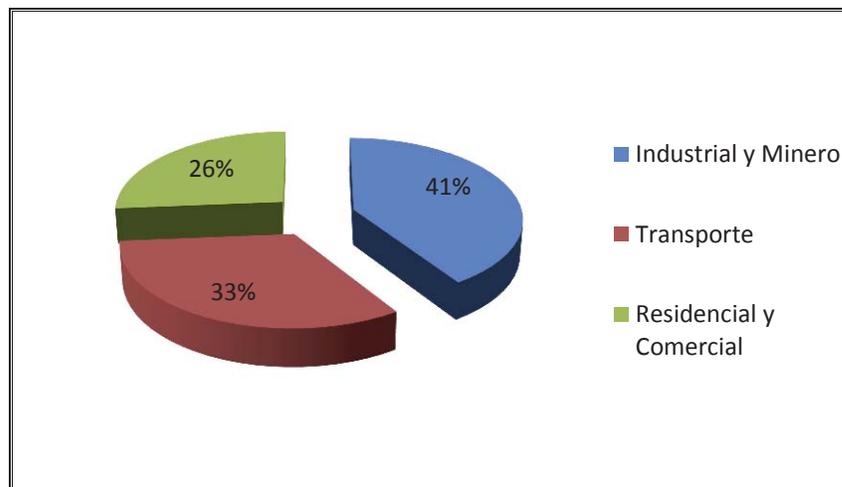
La Tabla 1 muestra la cantidad de cada fuente energética consumida:

<b>Fuente energética</b>	<b>Cantidad consumida (Tcal)</b>	<b>% de consumo</b>
Petróleo(*)	34.640	35.6 %
Electricidad	30.928	31.8 %
Carbón/Coke	5.209	5.4 %
Gas(**) <sup>1</sup>	12.578	12.9 %
Leña	14.002	14,3 %

**Tabla 1: Consumo de energía sector industrial y minero**

**Fuente: Elaboración propia con base de datos Ministerio de Energía**

El consumo a nivel país, se distribuye según la Figura N°8:



**Figura N°8: Consumo Nacional de Energía**

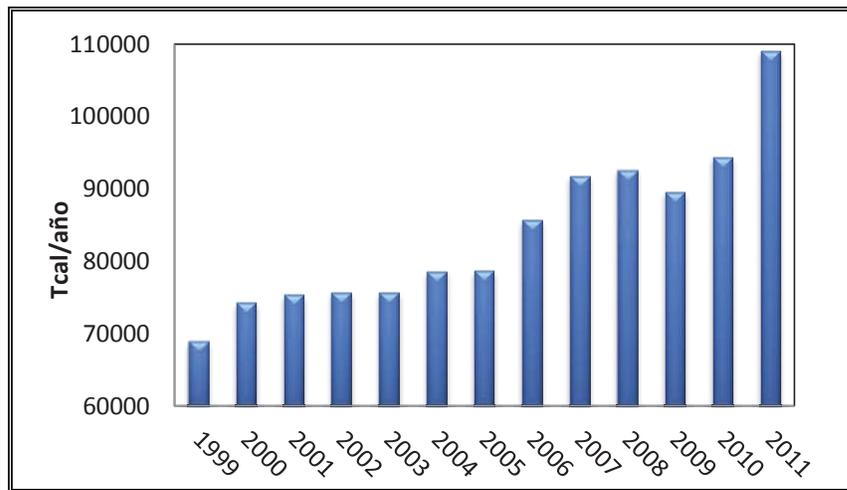
**Fuente: Elaboración propia con base de datos Ministerio de Energía**

<sup>1</sup>(\*)Comprende combustible petróleo, Diesel, Gasolina (93, 95, 97 octanos), Kerosene, Gas licuado, Gas de refinería

(\*\*) Se incluye gas corriente, Gas de Alto Horno, Gas Natural.

Actualmente el sector Industrial y Minero es el que concentra el mayor consumo energético del país, éste sector está conformado por: Minería del Cobre, Hierro, Salitreras, Industrias de papel y celulosa, Siderúrgicas, Petroquímicas, Industria del cemento, Azúcar, Pesca, industrias varias, mineras varias y por último el sector energético.

En la Figura N°9 se muestra la evolución de consumo de energía en el sector industrial y minero en los últimos 13 años en nuestro país.



**Figura N°9: Evolución consumo energético sector industrial y minero.**  
**Fuente: Elaboración propia con base de datos Ministerio de Energía**

La satisfacción de la gran demanda energética que existe en la actualidad depende en gran medida de las importaciones, las cuales corresponden a porcentajes entre el 65% y 75% de las necesidades energéticas, siendo un 97% de las necesidades del petróleo, 84% de carbón y cerca de un 78% de Gas Natural.

## ***2.2 Descripción del problema***

En la actualidad, la energía juega un papel importante en la industria, específicamente en los procesos productivos, debido a los constantes aumentos en los costos energéticos, costos que a la fecha no se han logrado estabilizar, lo que ha provocado la necesidad de la optimización de los procedimientos industriales. Éstos a su vez han sufrido avances en tecnología, aumento en el tamaño de los equipos, mayor variedad en tipos de materiales de construcción.

Por esta razón se hace imperativo reformular los parámetros de diseño de equipos, específicamente los Intercambiadores de calor, los cuales fueron determinados a partir de la propia experiencia de los ingenieros de la época, parámetros más conocidos como Rules of Thumb o Heurísticos. Los valores fueron obtenidos gracias a la optimización realizada al costo anual de los equipos en la década del 40, escenario en el cual el costo energético no se consideraba de gran importancia, no era tema relevante la función de la energía en el funcionamiento de una industria, no se enfocaba la atención en el uso eficiente de energía, ya que en el análisis del costo anual de la planta predominaba el costo de los equipos.

El problema a desarrollar consiste principalmente en la implementación de una mejora en los procesos productivos, para esto se debe realizar un exhaustivo análisis de los consumos energéticos asociados a la producción que lleve a obtener menores costos de producto, revisar y comparar los parámetros de diseño acuñados en los años de 40, verificar si gracias a los datos recopilados éstos parámetros de diseño han sufrido algún cambio en su formulación.

Para lograr una respuesta a las interrogantes realizadas, se han propuesto los siguientes objetivos:

## **2.3 Objetivos**

### **2.3.1 Objetivo general**

Actualizar los parámetros de diseño de Intercambiadores de Calor.

### **2.3.2 Objetivos específicos**

- Revisar información bibliográfica de consumos energéticos históricos en Chile como el resto de mundo.
- Realizar diseño de equipos.
- Revisar información relativa a costos operacionales y de equipo de procesos tanto a nivel nacional e internacional.
- Realizar la comparación entre los valores preestablecidos y los resultados obtenidos.

## **2.4 Metodología**

Se propone la siguiente metodología para el cumplimiento de los objetivos planteados:

- Realizar estudio bibliográfico de los consumos energéticos históricos en Chile como en el mundo. Obteniendo información relevante al tema de los diseños de equipos, información necesaria para analizar los consumos de energía y entregar posibles mejoras en los parámetros de diseño.
- Identificar los equipos a diseñar, entregando sus características principales como también los procedimientos de diseño de cada uno de ellos.
- Seleccionar los equipos a diseñar.
- Identificar las variables de diseño, las cuales determinarán el comportamiento del costo de inversión y el costo de operación de cada equipo.
- Diseñar equipos seleccionados, con condiciones de proceso recomendadas por bibliografía.
- Diseñar equipos variando los parámetros determinados.
- Obtener datos comparativos entre condiciones de proceso recomendadas y las establecidas para el proyecto.
- Obtener datos comparativos entre consumos energéticos en Chile como en el mundo.
- Analizar los datos obtenidos.
- Determinar si los parámetros de diseño determinados continúan teniendo la vigencia obtenida en la década del 40.

### **3. Marco teórico**

Procesos de transferencia de calor: se define como el estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre una fuente de calor y un receptor.

Para concretar el intercambio de calor entre las corrientes de fluido, se define el equipo de transferencia de calor el cual se determina por las funciones que desempeña en el proceso. Surgen de esta manera los intercambiadores de calor.

#### ***3.1 Intercambiadores de calor***

Se definen como equipos de proceso donde se produce la transferencia de calor, en estos equipos no existe el contacto entre los fluidos, y el intercambio de calor se produce sólo en una dirección de un fluido de mayor temperatura a una de menor.

Son de gran importancia en las instalaciones de proceso, ya que cumplen el rol más importante, el de satisfacer las crecientes necesidades energéticas.

Para cubrir las necesidades y obtener un equipo óptimo para cada proceso se definen tres criterios referentes a su diseño.

- Análisis térmico
- Rendimiento económico
- Aprovechamiento energético.

##### **3.1.1 Clasificación de intercambiadores de calor**

Los intercambiadores de calor se clasifican de acuerdo a:

- Grado de contacto entre fluidos
- Operación
- Función
- Construcción

### **3.1.1.1 Grado de contacto entre fluidos**

La clasificación de los intercambiadores de este tipo se subdividen en:

*Recuperadores o de tipo cerrado:* en este tipo de intercambiador, las dos corrientes de fluidos no se mezclan entre sí. Dichas corrientes están separadas por tubos o alguna otra superficie.

*Regeneradores:* en este caso el fluido caliente fluye a través de un mismo espacio seguido de manera alternada de un fluido frío. A modo de consideración principal, las corrientes de fluido no deben tener contacto físico.

*Abiertos:* Las corrientes de fluido de entrada se dirigen a una cámara abierta donde ocurre una mezcla física de ellas, obteniendo como resultado solo una corriente de salida.

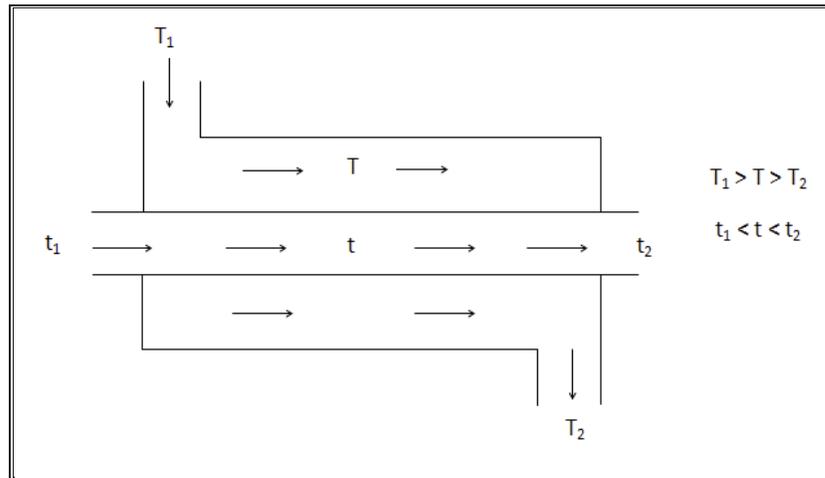
### **3.1.1.2 Operación**

Los intercambiadores de calor se clasifican de acuerdo a la distribución de las corrientes de fluidos.

Se tienen cuatro tipos de configuración de trayectoria de las corrientes de fluidos:

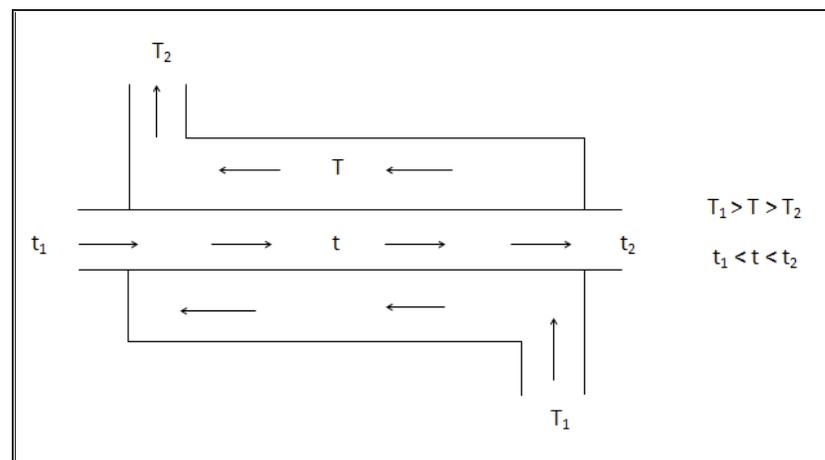
*Flujo paralelo:* las dos corrientes de fluidos ingresan al intercambiador por el mismo extremo, fluyen en la misma dirección y las temperaturas de las corrientes se aproximan entre sí, tratando de alcanzar el equilibrio térmico, la temperatura del fluido de menor nunca alcanza la temperatura del fluido caliente.

Las corrientes salen por el otro extremo del intercambiador. Figura N°10



**Figura N° 10: Diagrama de flujo paralelo**

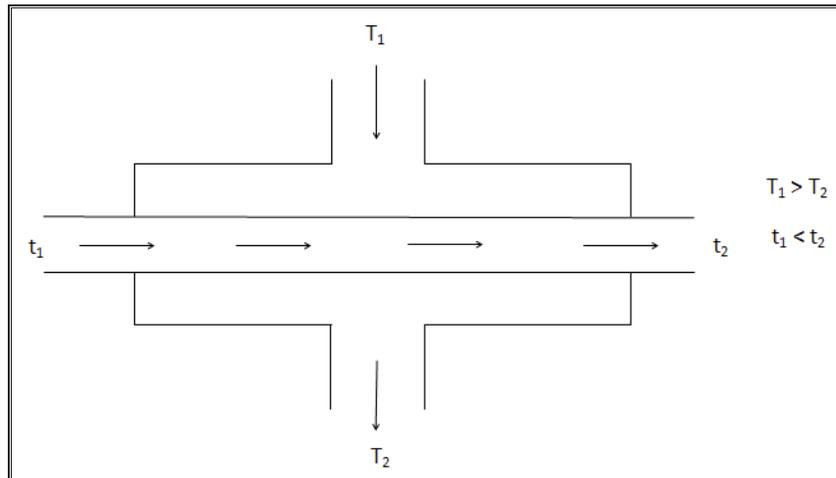
*Flujo contracorriente:* las corrientes de fluidos ingresan al intercambiador por extremos opuestos y fluyen en dirección contraria, debido al sentido contraflujo el fluido frío sale del intercambiador con una temperatura superior a la del fluido caliente de entrada. Figura N°11



**Figura N° 11: Diagrama de flujo en contracorriente**

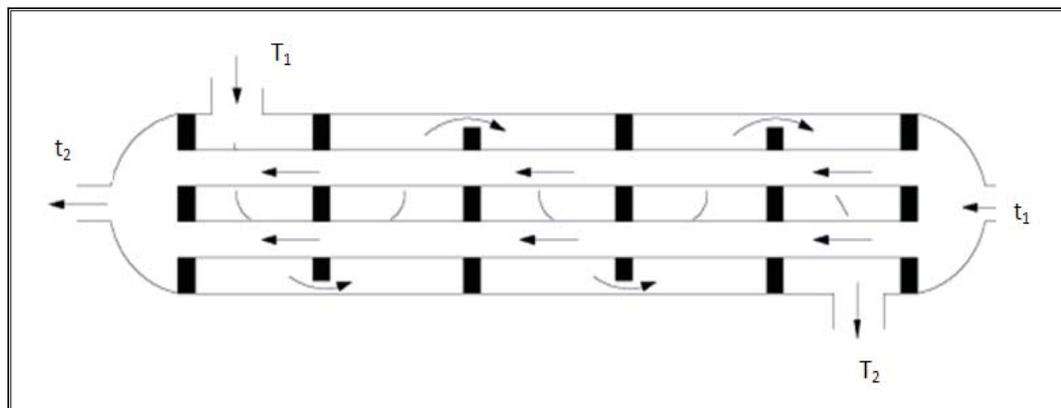
*Flujo cruzado de un solo paso:* una corriente de fluido se desplaza dentro del intercambiador de forma perpendicular a la trayectoria de la otra corriente de fluido. Por lo general se utilizan cuando en una de las corrientes de fluido presenta cambio de fases.

En la Figura N°12 se muestra el esquema representativo del flujo cruzado con un solo paso:



**Figura N° 12: Diagrama de flujo cruzado de un solo paso**

*Flujo cruzado de paso múltiple:* la transferencia de calor se realiza en más de un paso, permitiendo un mejor desempeño del intercambiador. Combina las características de dos o más intercambiadores de calor, las corrientes de fluidos intercambian calor más de una vez. Este tipo de intercambiador invierte el sentido de las corrientes utilizando pliegues en los bordes en forma de “U” lo que permite el retorno del fluido e incrementa el área de transferencia de calor. También se utilizan baffles o platos dentro del intercambiador para lograr el mismo propósito.



**Figura N° 13: Diagrama de flujo cruzado de paso múltiple**

### **3.1.1.3 Función**

Los intercambiadores según la función que cumplen se subdividen en:

- Regenerativos
  
- No Regenerativos

Regenerativos: en este tipo de intercambiador se utiliza la misma corriente de fluido. El fluido caliente abandona el sistema de intercambio de calor cediendo su energía interna a un regenerador, y regresa posteriormente al sistema como corriente de fluido fría. La energía interna liberada es utilizada para regenerar el fluido de regreso.

No regenerativos: a diferencia de los intercambiadores de tipo regenerativo, estos utilizan corrientes de fluido distintas para enfriar y calentar.

### **3.1.1.4 Construcción**

Los intercambiadores de calor, se clasifican según su construcción de la siguiente manera, siendo los de mayor utilización:

#### ***3.1.1.4.1 Intercambiadores de calor de Doble tubo o tubos concéntricos***

Es el tipo de intercambiador de construcción más simple, consta de dos tubos, uno pequeño que se encuentra dentro de otro de mayor diámetro, dos tees, curva de retorno y cabezal de retorno. La curva de retorno no entrega el área efectiva de intercambio, por esta razón son arreglados de la manera que muestra la Figura N° 16 recibiendo el nombre de Horquillas. Las corrientes de fluido circulan una dentro del tubo pequeño y la otra entre los dos tubos (espacio anular). Los flujos están dispuestos de manera que la corriente caliente fluya por dentro del tubo pequeño y la corriente fría fluya por el ánulo. Logrando obtener una mejor transferencia de calor.

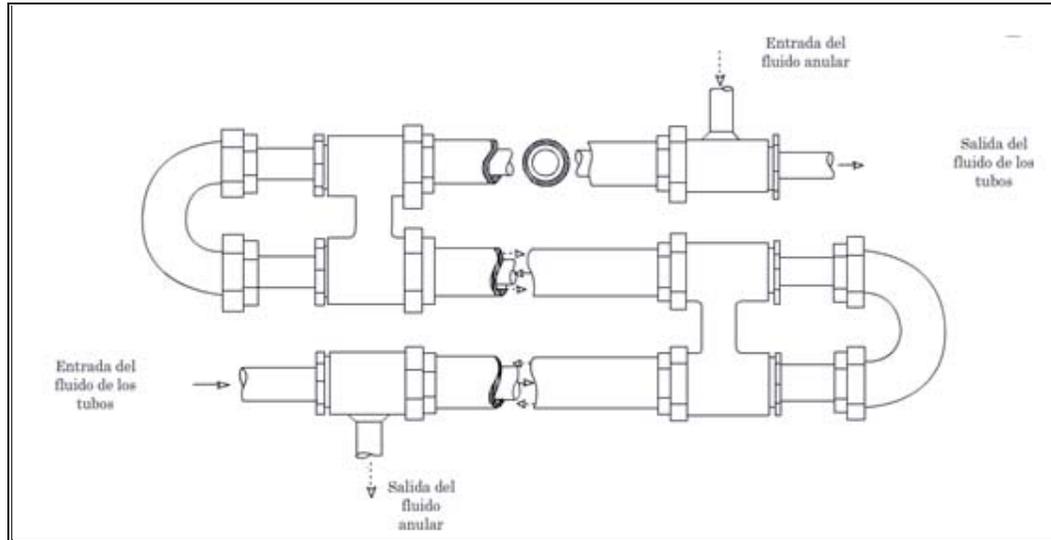
Se utilizan principalmente cuando los requerimientos de transferencia de calor son bajos y adecuados para el uso de corrientes de alto nivel de ensuciamiento, gracias a la facilidad para limpiar los tubos.

Existen dos tipos posibles configuraciones de distribución de flujo; a contracorriente y en paralelo.

Estos intercambiadores pueden ser lisos o aletados. Se utilizan aleteados cuando el coeficiente de transferencia de calor de uno de los fluidos es mucho menor que el otro. Para el caso de las aletas existen dos tipos:

Aletas transversales: se utilizan principalmente cuando la dirección de fluido es perpendicular al tubo.

Aletas longitudinales: Se utilizan cuando la dirección del flujo es paralelo al eje de los tubos.



**Figura N° 14: Esquema de un Intercambiador calor de Tubos Concéntricos**

Los tamaños estándar de cañerías utilizadas para este tipo de intercambiador se muestran en la Tabla 2:

Cañería Exterior (Pulgadas)	Cañería Interior (Pulgadas)
2	1 1/4
2 1/2	1 1/4
3	2
4	3

**Tabla 2: Tamaños estándar de cañerías**

En la Tabla 3 se muestra los materiales mayormente utilizados para la construcción de los tubos:

Materiales de construcción	Resistencia a la corrosión	Usos
Acero al carbono	Baja	Estructural
Acero inoxidable	Excelente	Altas Temperaturas.
Cobre	Buena	Agua, vapor a baja presión
Cobre-Níquel	Buena	Agua, vapor a baja presión
Cobre-Zinc	Buena	Variados

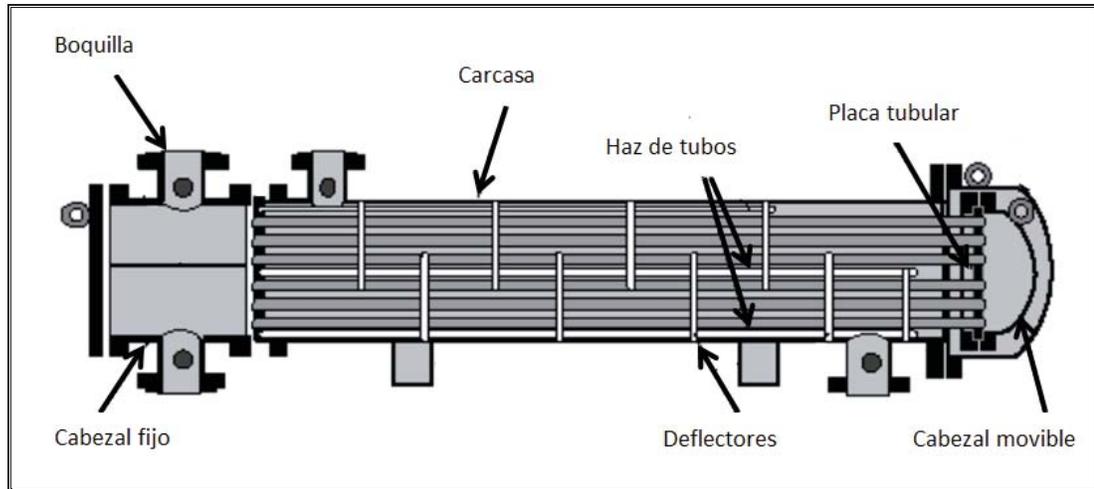
**Tabla 3: Tipos de materiales para tubos concéntricos.**

#### **3.1.1.4.2 Intercambiadores de calor de tubos y carcasa**

Estos intercambiadores son los más requeridos en la industria química, se utilizan cuando los caudales de las corrientes son elevados.

De acuerdo al desempeño requerido de transferencia de calor, caída de presión, resistencia a altas temperaturas, mantención, efectos de la corrosión y las posibles fugas existentes, se selecciona el intercambiador que cumpla con estos requerimientos.

En la Figura N°15 se muestra un diagrama básico de este tipo de Intercambiador de calor.



**Figura N° 15: Diagrama de un Intercambiador de Tubos y Carcasa**

La construcción de los intercambiadores de calor está determinada y normalizada por T.E.M.A. (Tubular Exchangers Manufacturers Association), y su forma básica consiste en:

#### Haz de tubos

De manera de optimizar la transferencia de calor los tubos se distribuyen formando un haz de tubos por donde fluye la corriente de fluidos,

Los tubos usados pueden ser simples o aletados, siendo el segundo tipo el que permite una mayor área de transferencia de calor.

#### Disposiciones del haz de tubos

Arreglo cuadrado: son más accesibles para la limpieza externa y poseen una baja caída de presión en la carcasa, se usa para fluidos con tendencia a formar incrustaciones de acuerdo a la dirección de flujo.

En la Figura N°16 se muestra la disposición en arreglo cuadrado:



**Figura N° 16: Disposición del haz de tubos arreglo Cuadrado**

Arreglo triangular: este arreglo permite un mayor número de tubos en la carcasa, se utiliza principalmente con fluidos limpios debido al poco espaciamiento entre tubos, sólo se realiza limpieza con medios químicos. Ver Figura N°17



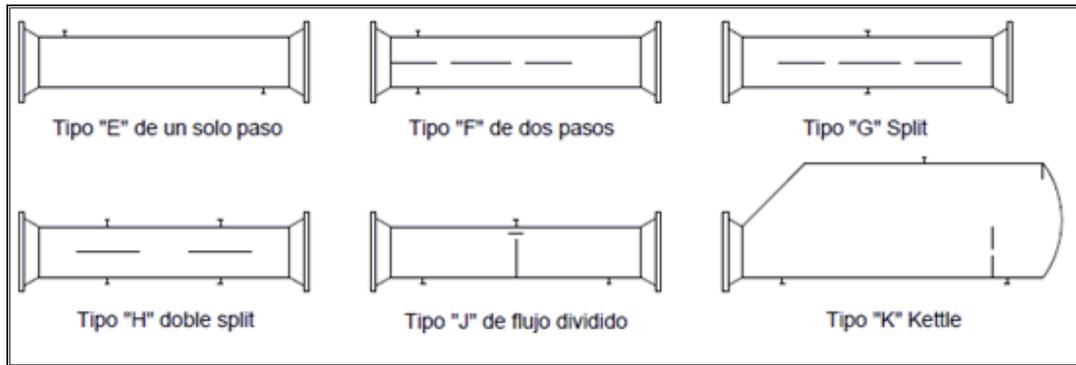
**Figura N° 17: Disposición del haz de tubos arreglo Triangular**

#### *Carcasa y boquillas (Nozzles)*

La carcasa es la sección del intercambiador por donde fluye la segunda corriente de fluido, corresponde a un tubo de mayor diámetro que cubre el haz de tubos.

Las boquillas corresponden a las entradas y salidas correspondientes del intercambiador.

En la Figura N°18 se aprecia los distintos tipos existentes de carcasas.



**Figura N°18: Tipos de carcasas**

La carcasa tipo E es la más utilizada, posee el diseño más simple de sólo un paso, junto con la carcasa tipo F se usan cuando existe cruce de temperaturas y se pretende lograr un flujo en contracorriente puro entre tubos y carcasa. La configuración F, requiere el uso de deflectores que permiten a la corriente de fluidos circular en dos pasos, las boquillas se sitúan en el extremo fijo del cabezal (delantero).

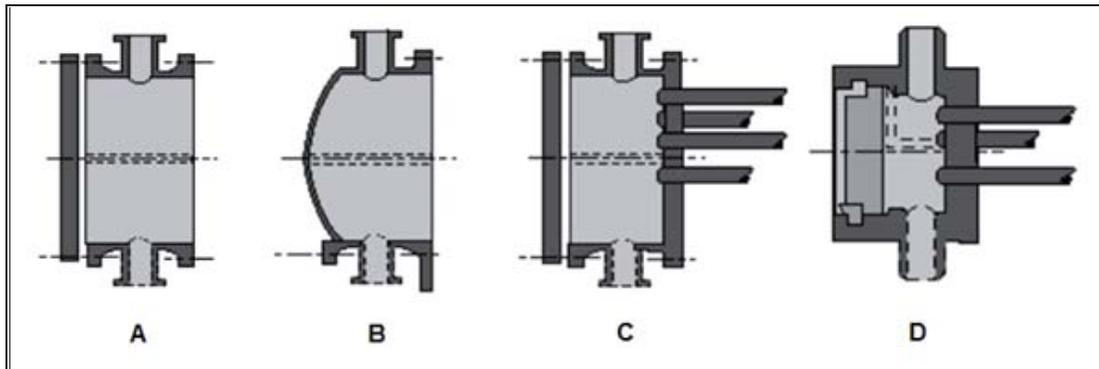
Carcasa tipo G, su uso principal está dado para la condensación de vapores, el vapor condensa en la primera sección del intercambiador (parte superior), este arreglo permite que el condensado permanezca mayor tiempo en contacto con el fluido que circula por los tubos.

Carcasa tipo H por lo general se utiliza para reducir la caída de presión, la alimentación del vapor se divide en dos corrientes como lo muestra la figura, la carcasa se divide en dos secciones por las cuales circula el vapor.

Carcasa tipo J también se utiliza para reducir la caída de presión.

Carcasa tipo K utiliza para cuando se requiere generar vapor y por lo tanto, hay que mantener una parte líquida del fluido de alimentación y dejar un espacio encima del nivel del líquido para que el vapor producido pueda viajar a una velocidad suficientemente baja a fin de que las gotas de líquido que arrastra tenga la oportunidad de caer.

Cabezal fijo o estacionario (delantero), Figura N°19



**Figura N°19: Tipos de cabezales fijos**

Cabezal tipo A: Canal y cubierta desmontable

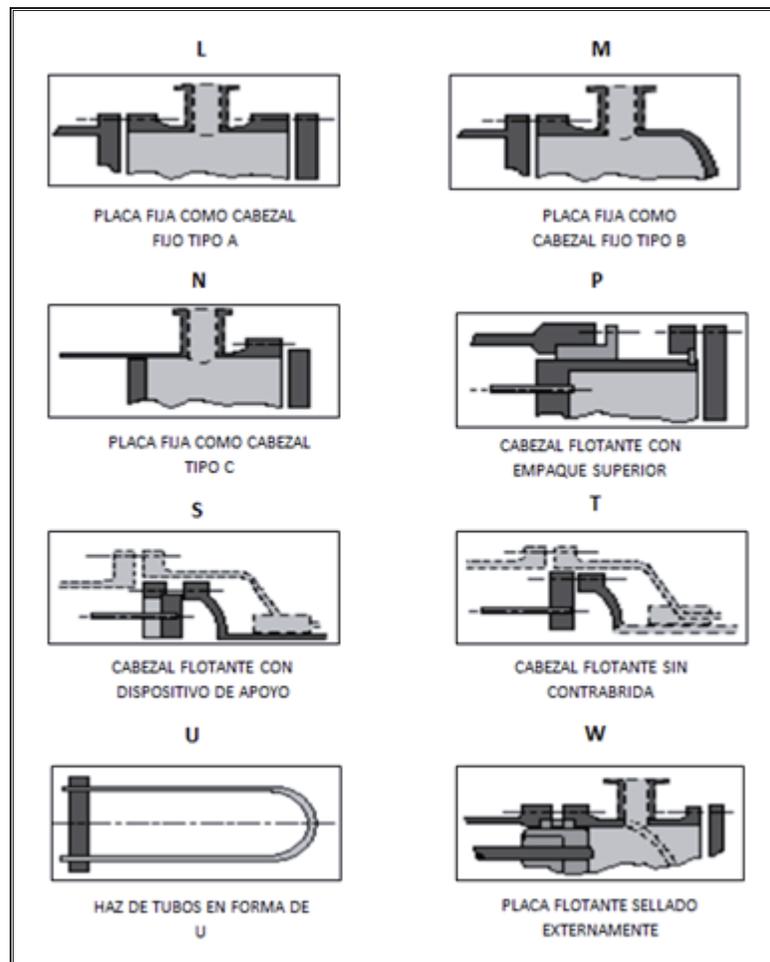
Cabezal tipo B: Casquete (cubierta integrada)

Cabezal tipo C: Canal integrado con placa y cubierta desmontable

Cabezal tipo D: Cierre especial a alta presión.

Los cabezales A y B son los más comunes, ambos se usan con placa de tubo fija, tubos en forma de U y haz de tubos removibles.

Cabezal móvil (trasero) Comprende el extremo trasero del intercambiador donde van unidos los tubos. La clasificación según T.E.M.A, se muestra en la Figura N°20



**Figura N° 2: Tipos de cabezales móviles**

Los cabezales de retorno más utilizados los tipos S, T y U.

Tubos en U: el haz de tubos están doblados de tal manera que forman una U en uno de sus extremos, esta disposición se efectúa con el fin de evitar las soldaduras en la placa, la que provoca posibles fugas. El haz de tubos es removible para la limpieza y mantención mecánica, por dentro de los tubos se realiza la limpieza química, por esta razón el fluido que circula por los tubos debe ser limpio.

Cabezal fijo: consta de dos placas de tubo soldadas a la carcasa, gracias a esto el haz de tubos no se puede remover para la limpieza y mantención, utilizando la limpieza química para remover la suciedad e impurezas. Usa principalmente fluidos limpios por el lado de la carcasa. No presenta uniones internas lo que elimina las posibles fugas, es el más utilizado para resistir altas presiones y fluidos tóxicos.

Cabezal flotante: consta de un extremo del haz de tubos fija y el otro extremo queda libre, gracias a la movilidad del haz de tubos se puede extraer completamente para limpieza y mantención, esto lo convierte en el tipo de cabezal más sofisticado y por ende, el de mayor costo de los tres.

#### Deflectores o baffles

Son ampliamente utilizados para producir turbulencia en el espacio de separación de los tubos, esta turbulencia produce mayor transferencia de calor dentro del intercambiador. Existen dos tipos de deflectores los longitudinales y los transversales. Los deflectores transversales evitan la vibración en exceso y son los encargados de guiar el flujo de la carcasa para lograr el flujo cruzado puro. Mientras que los deflectores longitudinales controlan la dirección del flujo.

Deflectores segmentados son los más comunes en la industria, existen tres tipos: segmentado simple, segmentado doble y triple. Mostrados en la Figura N°21

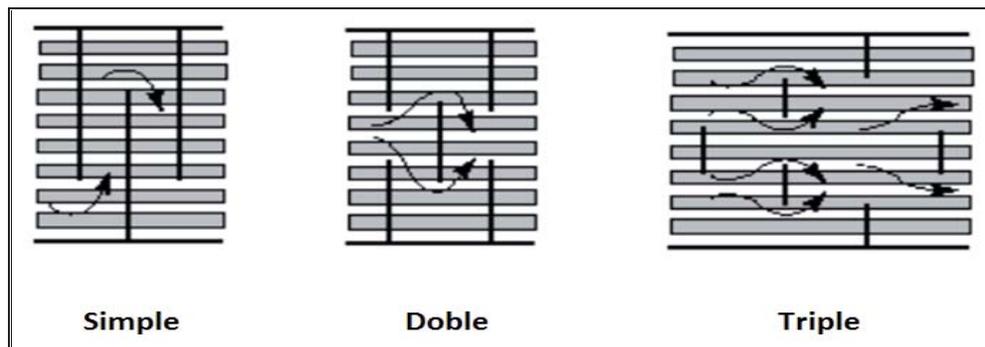


Figura N° 21: Tipos de deflectores

Placa tubular: Hoja de tubos consiste en una placa circular ranurada para la colocación de los tubos. Debe soportar el ataque corrosivo de ambos fluidos.

De acuerdo a T.E.M.A. la construcción de los intercambiadores de calor se identifica con tres letras, seguida del diámetro de la carcasa y la longitud nominal de los tubos los dos últimos expresados en pulgadas.

La primera letra indica el tipo de cabezal fijo o estacionario, la segunda letra indica el tipo de carcasa y por último la tercera letra indica el tipo de cabezal del extremo trasero.

La Tabla 4 muestra los materiales más usados para intercambiadores de calor, con sus respectivas características:

<b>Materiales de construcción</b>	<b>Resistencia a la corrosión</b>	<b>Usos</b>
Acero al Carbono	Baja	Estructurales.
Acero inoxidable serie 300	Excelente	Altas temperaturas, industria alimenticia.
Acero inoxidable serie 400	Excelente	Altas temperaturas, industria alimenticia.
Niquel	Excelente	Vapor, altas temperaturas.
Monel	Excelente	Vapor, altas temperaturas.
Aleaciones de cobre	Buena	Agua, vapor a bajas presiones.
Aluminio	Buena	Industria alimenticia.

**Tabla 4: Tipos de materiales de construcción Tubos-Carcasa**

#### **3.1.1.4.3 Intercambiador de calor de Placas**

Estos intercambiadores son reconocidos como uno de los equipos más eficientes. Consiste en una sucesión de láminas de metal armadas en un marco y unidas de tal manera que el fluido circule entre la primera y segunda placa, luego entre la segunda y tercera placa y así sucesivamente. Las corrientes se distribuyen a lo largo del intercambiador de la siguiente manera, el fluido caliente se desplaza hacia abajo entre placas alternadas mientras el fluido frío lo hace hacia arriba también entre placas alternadas.

Ventajas y desventajas de los intercambiadores de placas en comparación con los intercambiadores de calor de tubo y carcasa:

Ventajas:

- Preferibles cuando los costos de materiales son altos.
- Realización de mantención de manera más simple.
- Utilizan bajas aproximaciones de Temperatura (Approach), hasta 1°C.
- Más flexibles y poseen mayor facilidad para agregar nuevas placas.
- Más adecuados para fluidos viscosos.
- Factor de corrección de Temperatura es más alto, gracias a la distribución de los fluidos (contracorriente).
- Menor factor de suciedad o incrustamiento.

Desventajas:

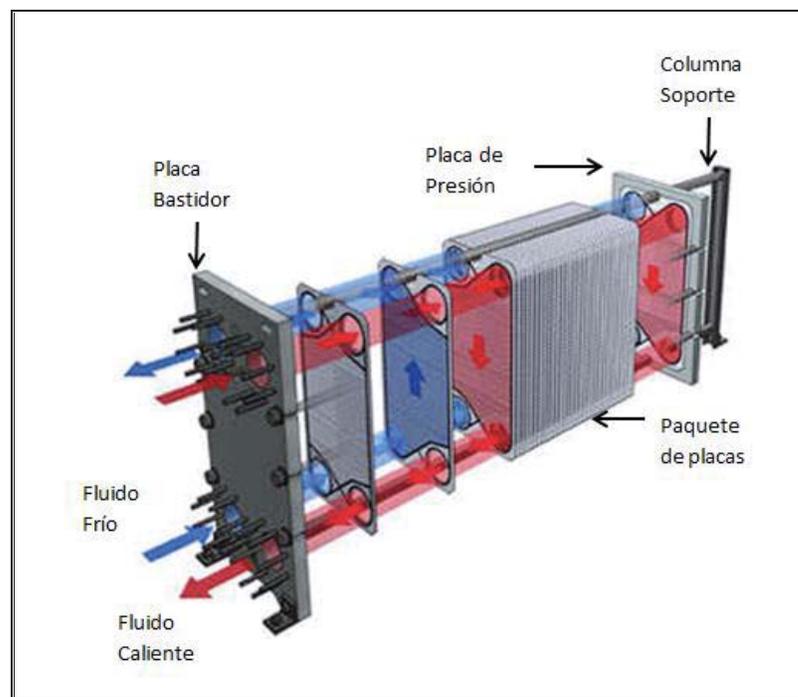
- Las placas no tienen buena resistencia a la caída de presión. (Caída de presión < 30 Bar).
- La temperatura de operación es limitada, no superior a 250°C, debido al desempeño de los materiales de las empaquetaduras o juntas.
- La selección de empaquetaduras o juntas es crítica.

La Tabla 5 muestra los distintos tipos de empaquetaduras.

Material	Temperatura de operación máxima	Usos
SBR ( Caucho Estireno-Butano)	85°C (185°F)	Sistemas acuosos a bajas Temperaturas.
Silicona	140°C (284°F)	Hipoclorito de Sodio y algunas aplicaciones a bajas temperaturas.
Caucho Nitrilo (Acrilonitrilo-Butano)	140°C (284°F)	Buena resistencia a grasas e hidrocarburos alifáticos.
Caucho Etileno propileno	150°C (302°F)	Amplio rango de compuestos químicos.
Caucho Fluorcarbono	175°C (347°F)	Aceites minerales, combustibles, animales y vegetales
Asbesto Comprimido	250°C (482°F)	Resistencia general a compuestos químicos orgánicos.

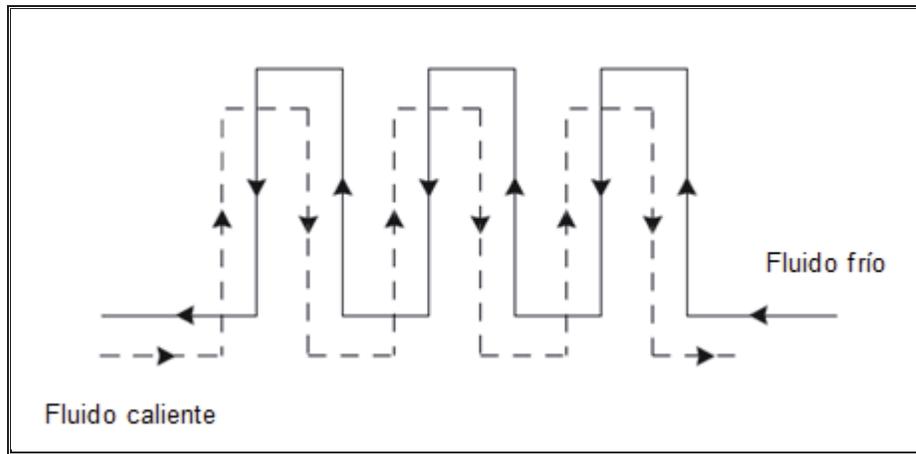
**Tabla 5: Tipos de empaquetaduras**

La Figura N°22 muestra las principales partes de un intercambiador de placas

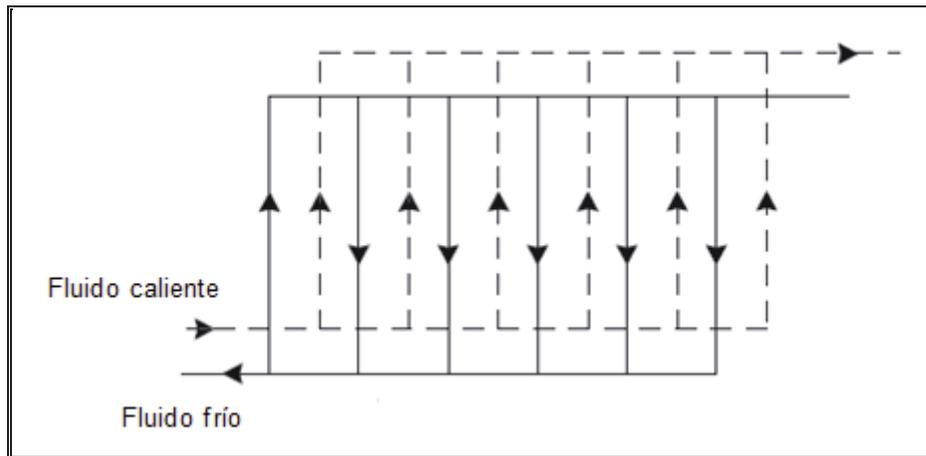


**Figura N° 22: Esquema de un Intercambiador de calor de placas**

La disposición de los fluidos en este tipo de intercambiador puede ser en serie, paralelo o una combinación de ambos como se muestra en las Figuras N°23, N°24



**Figura N° 23: Diagrama de flujo en Serie**



**Figura N° 24: Diagrama de flujo en paralelo**

Diseño de las placas:

Las placas poseen un diseño corrugado el cual crea conductos por los cuales circulan los fluidos en capas de muy bajo espesor y gran turbulencia, la cual a su vez promueve una mayor velocidad de transferencia de calor. La turbulencia producida provoca adicionalmente, la remoción de incrustaciones de suciedad, esto permite disminuir el factor de incrustamiento.

Gracias a los diseños corrugados se puede alcanzar la turbulencia con valores de Reynolds relativamente bajos (10-500).

Geometría de las placas:

La geometría depende de la transferencia de calor requerida y la caída de presión para lograrla. Se puede encontrar dos tipos principales de geometría; placas soft y placas hard: las placas soft poseen un bajo coeficiente de transferencia de calor y pequeñas pérdidas de carga. Las placas hard además poseen coeficiente de transferencia de calores más altos, pero tiene mayores pérdidas por fricción, tienen corrugaciones más profundas con ángulo obtuso (Ángulo de Chevron) mientras que las placas soft presentan un ángulo agudo en sus corrugaciones, la que ofrece una menor resistencia al flujo de fluidos. Las placas tipo hard poseen también un tipo de corrugaciones transversales o diagonales a la dirección de flujo la que origina mayor turbulencia y mayor transferencia térmica Al combinar ambos tipos de placas se puede lograr una variada gama de servicios.

Las configuraciones geométricas de las placas, se clasifican según su NTU (número de unidades de transferencia de calor) el cual está dado por la siguiente ecuación:

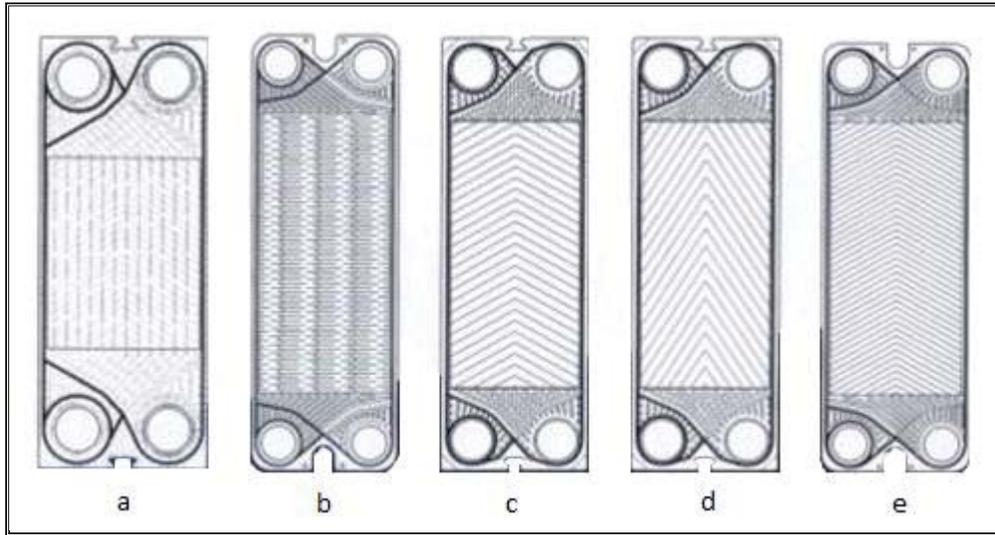
$$NTU = \frac{(t_o - t_i)}{LMTD}$$

$t_o$ : Temperatura de salida (fluido frio o caliente)

$t_i$ : Temperatura de entrada (fluido frio o caliente)

Dependiendo del valor obtenido de NTU, se clasifican las placas de acuerdo a bajo o alto NTU.

En la Figura N°25 se muestran distintos tipos de placas:



**Figura N° 25: Tipos de placas**

Figura a: TW- Serie brecha amplia.

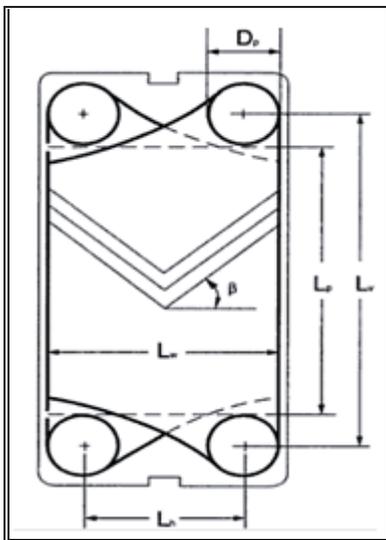
Figura b: S- serie tabla de lavar.

Figura c: GC- Serie NTU alto.

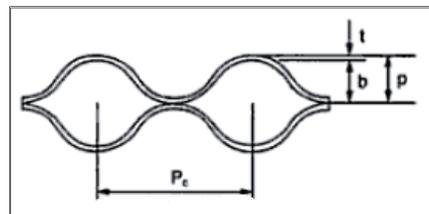
Figura d: GC- Serie NTU bajo.

Figura e: UX-Serie espina de pescado- NTU alto.

En la Figura N°26 se entrega el diagrama de una placa



**Figura N° 26: Esquema de una placa**



$L_p; L_v; L_w; L_h$ : Valores tabulados

$D_p$ : Diámetro de canal

$P_c$ : Pitch de corrugación

$b$ : Espaciamiento entre placas

$p$ : Paso entre placas

$t$ : Espesor de placa

En Tabla 6 se muestra los diferentes tipos de materiales utilizados para la fabricación de las placas:

<b>Materiales de construcción</b>	<b>Resistencia a la corrosión</b>	<b>Usos</b>
Aceros inoxidable	Excelente	Altas Temperaturas
Titanio; Titanio-Paladio	Excelente	Altas presiones y corrosivos.
Níquel	Excelente	Vapor a alta temperatura.
Hastelloy	Excelente	Altas temperaturas.
Grafito	Excelente	Servicios muy corrosivos.

**Tabla 6: Tipos de materiales de placas**

### **3.2 Consideraciones de Diseño**

El diseño completo de un intercambiador de calor puede dividirse en tres fases principales:

1. Diseño térmico: se preocupa principalmente en determinar el área de la superficie para transferir calor a una velocidad específica a determinados niveles dados de flujos y temperatura de los fluidos.
2. Diseño mecánico preliminar: considera las temperaturas y presiones de operación, las características de corrosión de uno o de ambos fluidos, las expansiones térmicas relativas y los esfuerzos térmicos que la acompañan.
3. Diseño final: se considera las características y dimensiones físicas para construir una unidad de proceso de bajo costo. Es preciso hacer la selección de materiales, acabados y cubiertos, elegir el dispositivo mecánico óptimo y especificar los procedimientos de fabricación.

A continuación se detalla los procedimientos estándar para cada una de las unidades consideradas en este trabajo

#### **3.2.1 Intercambiador de Tubos y Carcasa**

*Diseño térmico:*

1. Condiciones de proceso requeridas: temperaturas de fluidos (caliente y frío), flujos mássicos ( $m_1$ ,  $m_2$ ),  $R_{Do}$ ,  $R_{Di}$  valores tabulados de factor de ensuciamiento, diferencia de presiones permitidas, propiedades fisicoquímicas de los fluidos; (Calor específico ( $C_p$ ), viscosidad ( $\mu$ ), gravedad específica ( $S$ ) y conductividad térmica ( $K$ )).
2. Determinación de propiedades físico químicas de acuerdo a las respectivas temperaturas medias o calóricas:

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Ecc. 3.1

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

Ecc. 3.2

### 3. Balance de energía

$$Q = A \cdot U_D \cdot LMTD$$

Ecc. 3.3

Dónde:

$Q$ : Calor a Transferir [BTU/h]

$A$ : Área requerida de transferencia de calor [pie<sup>2</sup>]

$U_D$ : Coeficiente global de transferencia de calor [BTU/h · pie<sup>2</sup> · °F]

$LMTD$ : Diferencia de temperatura media logaritmica [°F]

$T_1$  y  $T_2$ : Temperaturas fluido caliente [°F]

$t_1$  y  $t_2$ : Temperaturas fluido frío [°F]

### 4. Chequear balance térmico:

$$Q = \dot{m}_1 \cdot Cp_1 \cdot \Delta T_1 = \dot{m}_2 \cdot Cp_2 \cdot \Delta T_2$$

Ecc. 3.4

$\dot{m}_1, \dot{m}_2$ : Flujos máxicos [Lb/h]

$Cp_1, Cp_2$ : Calores específicos de los fluidos [BTU/Lb · °F]

$\Delta T_1, \Delta T_2$ : Diferencia de temperaturas [°F]

5. Suponer valor de  $U_D$ , valores en Tabla 2 [Anexo II].
6. Calcular LMTD

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}}$$

Ecc. 3.5

$T_1$  y  $T_2$  : Temperaturas fluido caliente [°F]

$t_1$  y  $t_2$  : Temperaturas fluido frío [°F]

7. Obtener factor de corrección de temperatura para Intercambiador de calor 1-2, de Figura N°2, [Anexo II].

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_1 - t_2}$$

Ecc. 3.6

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

Ecc. 3.7

$R, S$ : Factores adimensionales

Restricción de diseño:  $F_T > 0,75$  // Si  $F_T < 0,75$  cambiar configuración de intercambiador.

8. Calcular LMTD corregido:

$$\Delta T_{real} = F_T \cdot LMTD$$

Ecc. 3.8

$\Delta T_{real}$ : [°F]

9. Calcular Área estimada

$$A_e = \frac{Q}{U_D \cdot LMTD}$$

Ecc. 3.9

$A_e$ : Área estimada [ $pie^2$ ]

10. Determinar disposición de los fluidos

Reglas generales para la disposición de flujos por los tubos:

- a. Fluido corrosivo, evita dañar todo el intercambiador.
- b. Fluido sucio.
- c. Fluido menos viscoso.
- d. Mayor presión por los tubos.
- e. Fluido más caliente (radiación, convección)
- f. Flujo más pequeño.

11. Seleccionar geometría de tubo de Tabla 3 [Anexo II]

$L$ : Largo del tubo [ $pie$ ]

$D_i$ : Diámetro interno tubos [ $pulg$ ]

$d_o$ : Diámetro externo del tubo [ $Pulg$ ]

$a_F$ : Área de flujo [ $pie^2/pie$  lineal]

12. Calcular Número de tubos y aproximar el resultado al entero superior

$$N = \frac{A_s}{L \cdot a_F}$$

Ecc. 3.10

Dónde:

*N*: Número de tubos

*L*: Largo de tubo, Tabla 6 Anexo II [pie]

Con el número de tubos obtenido, seleccionar de Tabla 4 o Tabla 5 [Anexo II], el tipo de intercambiador que cumpla con los requerimientos.

De las Tablas 4, 5 [Anexo II] se obtiene el número real de tubos, el diámetro de la carcasa y el tipo de intercambiador.

13. Recalcular Área, obteniendo el Área real de transferencia de calor

$$A_{real} = L \cdot a_F \cdot N$$

Ecc. 3.11

*A<sub>real</sub>*: Obtenida con datos tabulados [pie<sup>2</sup>]

*a<sub>F</sub>*: Área obtenida de Tabla 3 Anexo II [pie<sup>2</sup>/pie lineal]

*N*: Número real de tubos, Tabla 4; 5 [Anexo II]

*L*: Largo de tubo, Tabla 3 Anexo II [pie]

14. Calcular *U<sub>D</sub>* real

$$U_D = \frac{Q}{A_{real} \cdot \Delta T_{real}}$$

Ecc. 3.12

15. Calcular Flujo másico específico,  $G_T$ :

$$G_T = \frac{\dot{m}_1}{a_T}$$

Ecc. 3.13

Dónde:

$G_T$ : Flujo másico específico por tubos [Lb/pie<sup>2</sup> · h]

$\dot{m}_1$ : Flujo másico por tubos [Lb/h]

16. Calcular Área de flujo por tubos:

$$a_T = \frac{N}{n} \cdot a_t$$

Ecc. 3.14

Dónde:

$n$ : Número de pasos Tabla 4;5 [Anexo II]

$a_t$ : Área de flujo, obtenida de Tabla 3 Anexo II [pulg<sup>2</sup>]

$N$ : Número de tubos

17. Calcular velocidad por tubos y verificar si se encuentra dentro del rango recomendado, en caso contrario cambiar tipo de configuración de intercambiador de calor.

$$v_T = \frac{G_T}{\rho}$$

Ecc. 3.15

Dónde:

$\rho$ : Densidad de fluido por tubos [Lb/pie<sup>3</sup>]

$v_T$ : Velocidad por tubos [pie/s]

Restricción de diseño:  $3 < v_T < 9$  [pie/s]

18. Definiciones para la carcasa:

Definir espaciamento entre Baffles (B)

Para obtener una mayor eficacia el espaciado óptimo entre baffles debe estar entre

30 – 60%.

Área de flujo por la carcasa:

$$a_s = \frac{(P_T - D_o) \cdot B \cdot D_s}{144 \cdot P_T}$$

Ecc. 3.16

Dónde:

$a_s$ : Área de flujo por carcasa [ $pie^2$ ]

$D_s$ : Diámetro de carcasa [ $pulg$ ]

$B$ : Espaciamento entre Baffles [ $pulg$ ]

$D_o$ : Diámetro externo [ $pulg$ ]

$P_T$ : Pitch Tabla 4; 5 [Anexo II]

19. Calcular flujo másico específico por lado carcasa:

$$G_s = \frac{\dot{m}_2}{a_s}$$

Ecc. 3.17

$\dot{m}_2$ : Flujo másico por carcasa [ $Lb/h$ ]

20. Calcular coeficientes de películas por carcasa y tubos:

Tubos:

$$\frac{h_i \cdot D_i}{k} = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \varphi_w$$

Ecc. 3.18

Carcasa con Baffles:

$$\frac{h_o \cdot D_{eq}}{k} = 0,36 \cdot Re^{0,55} \cdot Pr^{1/3} \cdot \varphi_w$$

Ecc. 3.19

$$Re = \frac{D_{eq} \cdot G_S}{\mu}$$

Ecc. 3.20

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k}$$

Ecc. 3.21

$$\varphi_w = \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Ecc. 3.22

$D_e$ : Diametro equivalente [pulg] Figura N°7 Anexo II

$v$ : velocidad de fluido [pie/s]

$\rho$ : densidad de fluido [Lb/pie<sup>3</sup>]

$\mu$ : viscosidad de fluido [cp]

$k$ : conductividad térmica [BTU/h · pie · °F]

$Re$ ;  $Pr$  adimensionales

21. Calcular coeficiente global de transferencia de calor ( $U_c$ ):

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_{io}} + \frac{1}{h_o}$$

Ecc. 3.23

$$h_{io} = h_i \cdot \left( \frac{D_i}{D_o} \right)$$

Ecc. 3.24

$U_c$ : Coeficiente global de transferencia de calor limpio [BTU / h · pie<sup>2</sup> · °F]

$h_{io}, h_o$ : Coeficientes de película [BTU/h · pie<sup>2</sup> · °F]

22. Chequear valor de  $Rd$  obtenido

$$Rd = \left( \frac{U_c - U_D}{U_c \cdot U_D} \right)$$

Ecc. 3.25

$U_D$ : Obtenido en Item 14

Diseño mecánico:

1. Determinación de  $\Delta P$ , para carcasa y tubos:

Tubos:

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_r$$

Ecc. 3.26

$$\Delta P_T = \frac{f \cdot G_T^2 \cdot L \cdot n}{D_i \cdot S \cdot \varphi_w}$$

Ecc. 3.27

$f$ : Factor de fricción de Fanning. Figura N°5 [Anexo II]

$G_T$ : Flujo másico específico [Lb/pie<sup>2</sup> · h]

$L$ : Largo tubos [pie]

$n$ : Número de pasos

$D$ : Diámetro interno de tubos [pulg]

$S$ : Gravedad específica fluido por tubos

$\varphi_w$ : Corrección de viscosidad

$$\Delta P_r = \frac{4 \cdot n}{S} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g'}$$

Ecc. 3.28

$$\frac{v^2}{2 \cdot g'}$$

Obtener de Figura N°6 [Anexo II]

Dónde:

$\Delta P_r$ : Caída de presión por retorno [Psi]

$n$ : Número de pasos

$S$ : Gravedad específica fluido por tubos

$v$ : Velocidad por tubos [pie/s]

$g'$ : Aceleración de gravedad [pie/s<sup>2</sup>]

Carcasa:

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N + 1)}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D_e \cdot S \cdot \varphi_s}$$

Ecc. 3.29

$$(N + 1) = 12 \cdot \frac{L}{B}$$

Ecc. 3.30

$$\varphi_s = \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Ecc. 3.31

$(N + 1)$ : Número de cruces

$S$ : Gravedad específica fluido por tubos

$D_s$ : Diámetro carcasa [pulg]

$G_s$ : Flujo másico específico [Lb/pie<sup>2</sup> · h]

$D_e$ : Diámetro equivalente [pulg]

$f$ : factor de fricción de Fanning. Figura N°8 Anexo II

$\Delta P_s$ : Caída de presión carcasa [Psi]

Restricción de diseño:  $\Delta P$  (líquidos)  $\leq 10$  psi

### 3.2.2 Intercambiador de placas

*Diseño térmico*

1. Condiciones de proceso requeridas: temperaturas de fluidos (caliente y frío), flujos másicos ( $m_1$ ,  $m_2$ ),  $R_d$ , valores tabulados de factor de ensuciamiento, diferencia de presiones permitidas, propiedades fisicoquímicas de los fluidos; (Calor específico ( $C_p$ ), viscosidad ( $\mu$ ), gravedad específica ( $S$ ) y conductividad térmica ( $K$ )).
2. Determinación de propiedades físico químicas de acuerdo respectivas las temperaturas medias o calóricas:

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Ecc. 3.32

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

Ecc. 3.33

3. Balance de energía

$$Q = A \cdot U_D \cdot LMTD$$

Ecc. 3.34

*Dónde:*

*Q: Calor a Transferir [BTU/h]*

*A: Área requerida de transferencia de calor [pie<sup>2</sup>]*

*U<sub>D</sub>: Coeficiente global de transferencia de calor [BTU/h · pie<sup>2</sup> · °F], Tabla 9 [Anexo II]*

*LMTD: Diferencia de temperatura media logaritmica [°F]*

*T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> : Temperaturas fluido caliente [°F]*

*t<sub>1</sub> y t<sub>2</sub> : Temperaturas fluido frío [°F]*

4. Chequear balance térmico

$$Q = \dot{m}_1 \cdot Cp_1 \cdot \Delta T_1 = \dot{m}_2 \cdot Cp_2 \cdot \Delta T_2$$

Ecc. 3.35

*m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>: Flujos máxicos [Lb/h]*

*Cp<sub>1</sub>, Cp<sub>2</sub>: Calores específicos de los fluidos [BTU/Lb · °F]*

*ΔT<sub>1</sub>, ΔT<sub>2</sub>: Diferencia de temperaturas [°F]*

5. Fijar resistencias a la incrustación de los fluidos, Tabla 10 [Anexo II]

6. Calcular LMTD:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}}$$

Ecc. 3.36

$T_1$  y  $T_2$  :Temperaturas fluido caliente [°F]

$t_1$  y  $t_2$  :Temperaturas fluido frío [°F]

7. Determinar unidades de transferencia de calor [NTU]:

Fluido Caliente:

$$NTU = \frac{T_1 - T_2}{LMTD}$$

Ecc. 3.37

Fluido Frío:

$$NTU = \frac{t_2 - t_1}{LMTD}$$

Ecc. 3.38

$T_2$ ;  $t_2$ :Temperatura de salida (fluido frío)[°F]

$T_1$ ;  $t_1$ :Temperatura de entrada (fluido frío)[°F]

$$NTU_{total} = NTU_{caliente} + NTU_{frío}$$

Ecc. 3.39

8. Suponer valor de  $U_D$ , valores tabulados en Tabla 9 [Anexo II]:

$U_D$ : Coeficiente global de transferencia de calor [BTU/h · pie<sup>2</sup> · °F]

9. Calcular Área requerida:

$$A_r = \frac{Q}{U_D \cdot LMTD}$$

Ecc. 3.40

$A_r$ :Área requerida [pie<sup>2</sup>]

10. Fijar tipo y características de las placas. Tabla 12 [Anexo II]

11. Determinar número de placas requeridas:

$$N_p = \frac{A_r}{A_p}$$

Ecc. 3.41

Área por placa: *Tabla 12 Anexo II*

$N_p$ : Número de placas

12. Calcular número de canales:

$$N_c = N_p + 1$$

*Ecc. 3.42*

$N_c$ : Número de canales

13. Determinar  $N^\circ$  de canales paralelos por paso (Número de canales en que debe dividirse el flujo)

$$n_p = \frac{F_v}{v}$$

*Ecc. 3.43*

$n_p$ : Número de canales paralelos

$F_v$ : Flujo volumétrico [ $\text{pie}^3/\text{h}$ ]

$v$ : Flujo por canal, [ $\text{pie}^3/\text{h}$ ] *Tabla 12 Anexo II*

14. Determinar arreglo del intercambiador y número de pasos

$$n = \frac{N_c}{2 \cdot n_p}$$

*Ecc. 3.44*

$n$ : Número de pasos

15. Determinar número de placas real

$$N_p = (n \cdot n_p + n \cdot n_p) - 1$$

*Ecc. 3.45*

16. Obtener factor de corrección de temperatura ( $F_T$ ), de Figura N°9 [Anexo II]

17. Determinar coeficientes de películas para cada fluido:

Flujo laminar:

$$h = 0,742 \cdot C_p \cdot G \cdot Re^{-0,62} \cdot Pr^{-0,667} \cdot (\mu/\mu_w)^{0,14}$$

Ecc. 3.46

Flujo turbulento:

$$h = 0,2536 \cdot \left(\frac{k}{De}\right) \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,4}$$

Ecc. 3.47

Dónde:

Número de Reynolds flujo en serie:

$$Re = \frac{De \cdot G}{\mu}$$

Ecc. 3.48

Número de Reynolds flujo en paralelo:

$$Re = \frac{De \cdot (G/n_p)}{\mu}$$

Ecc. 3.49

$$De = \frac{4 \cdot W \cdot b}{(2 \cdot W + 2 \cdot b)}$$

Ecc. 3.50

Nota: Si b es muy pequeño comparado con W, la ecuación se reduce a:

$$De = 2 \cdot b$$

Ecc. 3.51

$$G = \frac{\dot{m}}{a}$$

Ecc. 3.52

$$a = a' \cdot n_p$$

Ecc. 3.53

$$a' = W \cdot b$$

Ecc. 3.54

$\mu$ : Viscosidad de cada fluido [cp]

$C_p$ : Calor específico de cada fluido [BTU/Lb · °F]

$k$ : Conductividad térmica de cada fluido [BTU/h · pie · °F]

$W$ : Ancho de placa. Tabla 12 Anexo II [pulg]

$b$ : Espaciamiento entre placas. Tabla 12 Anexo II

$D_e$ : Diámetro equivalente [pulg]

$G$ : Flujo másico específico.

$\dot{m}$ : Flujo másico.

$a$ : Área de sección transversal por cada paso.

$a'$ : Área de sección transversal de un canal

18. Calculo de coeficiente global de transferencia ( $U_D$ ):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + r_1 + \frac{1}{h_2} + r_2 + \frac{x}{k_p}$$

Ecc. 3.55

$h_1$ : coeficiente de película fluido caliente

$h_2$ : coeficiente de película fluido frío

$x$ : Espesor de placa

$k_p$ : Conductividad térmica material placa

Nota: Chequear  $U$  calculado con  $U$  estimado

19. Calcular Área real necesaria para la transferencia de calor:

$$A_o = \frac{Q}{U \cdot LMTD \cdot F_T}$$

Ecc. 3.56

Área disponible:

$$A_d = N_p \cdot A_p$$

Ecc. 3.57

$N_p$ : Número de placas

$A_p$ : Área de placa, Tabla 12 Anexo II

20. Calcular exceso de área

$$\% \text{ Exceso de área} = \left( \frac{A_d - A_o}{A_o} \right) \cdot 100$$

Ecc. 3.58

Restricción de diseño: % exceso de área < 15%

Diseño mecánico

1. Calcular  $\Delta P$  total:

$$\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

Ecc. 3.59

$\Delta P_1$ : Caída de presión fluido caliente

$\Delta P_2$ : Caída de presión fluido frío

2. Calcular Caídas de presión para cada fluido:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot f \cdot G^2 \cdot L}{g \cdot De \cdot \rho}$$

Ecc. 3.60

*f*: Factor de fricción

$$f = \frac{2,5}{Re^{0,3}}$$

Ecc. 3.61

*L*: Longitud vertical efectiva de flujo

$$L = l \cdot n_p$$

Ecc. 3.62

$$l = \frac{A_p}{W}$$

Ecc. 3.63

## **4. Desarrollo de la problemática**

### ***4.1 Criterio de selección de equipos a diseñar***

Los intercambiadores de calor han adquirido una gran importancia ante la necesidad de ahorrar energía y de disponer equipos óptimos, por esta razón es necesario que el diseño del equipo se desarrolle de la manera más precisa posible, entregar una exactitud en el diseño, ya sea térmico o mecánico, de modo que pueda satisfacer los requerimientos específicos de los procesos de una planta de producción.

Al momento de realizar el diseño preliminar de un intercambiador de calor, para obtener una efectividad dada se debe considerar ciertas restricciones:

- Costo de inversión del equipo: Consiste en el costo inicial que se requiere para la adquisición de dicho equipo, esto incluye todos los gastos necesarios para dejarlos operativos en la planta. Este costo depende de factores como: el tamaño y el peso del equipo. Por ésta razón es importante que al realizar diseño final del equipo se obtenga un bajo costo de inversión.
- Costo de operación: Consiste en todos los gastos asociados para el funcionamiento del equipo, ya sea materias primas y servicios (electricidad, combustibles, etc.). en este trabajo se tomará el costo de operación solamente como el gasto de servicios asociado al costo por bombeo de los fluidos.

## 4.2 Determinación de costos

### 4.2.1 Costos de Inversión de Intercambiadores de Tubos y Carcasa

Para estimar el costo de un intercambiador de calor de tubos y carcasa existen diversos métodos, algunos entregan mayor precisión que otros. Mientras más datos de la construcción del intercambiador se tengan, mayor será la precisión de la estimación del costo.

El método de estimación a utilizar determina el costo de inversión en base al año 2003 por lo cual se debe realizar una corrección por año de ejecución del diseño, todo esto por motivos de inflación durante los períodos. Para obtener la corrección mencionada se utilizan los índices de costo de equipos Marshall y Swift.

El costo de equipo<sup>2</sup> está dado por la siguiente relación:

$$C_p = C_o \cdot \frac{I_p}{I_o}$$

Ecc. 4.1

Dónde:

$C_p$ : Costo valor presente

$C_o$ : Costo base

$I_p$ : Índice de costo año de ejecución, Figura N°2 [Anexo III]

$I_o$ : Índice de costo año base, Figura N°2 [Anexo III]

El costo base<sup>3</sup> está dado por:

$$\text{Costo} = C_o \cdot f_d \cdot f_\varphi \cdot f_l \cdot f_m \cdot f_t \cdot f_{np} \cdot f_p$$

Ecc. 4.2

---

<sup>2</sup> Vega, Luis: Apuntes de Ingeniería Económica

<sup>3</sup> Sinnott R; Towler G: Chemical Engineering Design Principles. Practice and Economics of Plant and Process Design.

Dónde:

$C_o$ : Costo base , Figura N°1 Anexo III

$f_a$ : Factor tipo de intercambiador, Tabla N°1 Anexo III

$f_m$ : Factor de tipo de material, Tabla N°7 Anexo III

$f_l$ : Factor de longitud, Tabla N°3 Anexo III

$f_\phi$ : Factor de corrección de diámetro y tipo de arreglo de tubos, Tabla N°5 Anexo III

$f_t$ : Factor de Temperatura de operación, Tabla N° 4 Anexo III

$f_{np}$ : Factor de número de pasos en tubos, Tabla N°2 Anexo III

$f_p$ : Factor de Presión de operación, Tabla N°6 Anexo III

#### 4.2.2 Costos de inversión<sup>4</sup>, Intercambiadores de placas

Para Áreas < 18,6 m<sup>2</sup>

$$C_o = 1281 \cdot A^{0,4887}$$

Ecc. 4.3

Para Áreas > 18,6 m<sup>2</sup>

$$C_o = 702 \cdot A^{0,6907}$$

Ecc. 4.4

#### 4.2.3 Costos de operación de Intercambiadores de Tubos y Carcasa

El costo de operación se determina de acuerdo a los costos asociados al bombeo de los fluidos.

La potencia requerida<sup>5</sup> para las bombas a utilizar está determinada por la ecuación 3.90

$$Pot = \frac{1}{\eta} \cdot \left( \left( \frac{\Delta P_t \cdot \dot{m}_t}{\rho_t} \right) + \left( \frac{\Delta P_c \cdot \dot{m}_c}{\rho_c} \right) \right)$$

Ecc. 4.5

<sup>4</sup> Haslego C; Polley G: Designing Plate and Frame Heat Exchangers. Part I

<sup>5</sup> García Hernández J.M; Ponce Ortega J.M; Serna González M: Síntesis rigurosa de redes de Intercambiadores de calor usando método híbrido, 2007

$$Pot [HP] = \frac{Pot}{550}$$

Ecc. 4.6

*Dónde:*

*Pot: Potencia de la bomba*

*$\eta$ : Eficiencia de la bomba*

*$\Delta P_t$ : Caída de presión Absoluta por tubos [ $Lb_f/Pie^2$ ]*

*$\dot{m}_t$ : Flujo másico por tubos [ $Lb/s$ ]*

*$\rho_t$ : Densidad de fluido por tubos [ $Lb/Pie^3$ ]*

*$\Delta P_c$ : Caída de presión Absoluta por carcasa [ $Lb_f/Pie^2$ ]*

*$\dot{m}_c$ : Flujo másico por carcasa [ $Lb/s$ ]*

*$\rho_c$ : Densidad de fluido por carcasa [ $Lb/Pie^3$ ]*

Los costos de Energía Eléctrica para la industria, en base al año 2012 de detallan a continuación en Tabla 7:

Chile	OCDE	EEUU	Unidades
154	111	70	USD/MWh

**Tabla 7: Costos de Energía Eléctrica año 2012**  
**Fuente: Base de Datos Ministerio de Energía 2012**

## 5. Diseño de equipos

### 5.1 Diseño de Intercambiadores de Tubos y Carcasa

#### 5.1.1 Diseño en base a parámetros recomendados.

- Condiciones de proceso para intercambiadores de tubos y carcasa.

Para la obtención de los datos utilizados y posterior desarrollo de los respectivos diseños de intercambiadores de calor de tubos y carcasa, se requirió información de trabajos realizados con anterioridad, en los cuales se desarrolló el estudio de factibilidad técnico - económica para la instalación de una planta de Oxígeno<sup>6</sup>, y el estudio para la instalación de una planta de Amoniaco<sup>7</sup>.

Se utilizarán 3 condiciones de proceso diferentes las cuales serán designadas con las letras A, B, C respectivamente para mantener un orden de cálculo.

La Tabla 8 muestra las condiciones de procesos obtenidas para el diseño de los intercambiadores de calor:

	Aire	Agua de enfriamiento	Unidades
$\mu$	0.019	1	$C_p$
$C_p$	0.25	1	$BTU/Lb \cdot ^\circ F$
$k$	0.024	0.381	$BTU/h \cdot pie \cdot ^\circ F$
$\rho$	0.0765	62.4	$Lb/pie^3$
$\dot{m}$	170279	170279	$Lb/h$
$T_i$	211.7	67.7	$^\circ F$
$T_f$	125.3	89.3	$^\circ F$

Tabla 8: Condiciones de proceso A, Planta de Oxígeno.

Dónde:

$\mu$ : Viscosidad

$C_p$ : Capacidad Calorífica

$k$ : Conductividad Térmica

<sup>6</sup> Factibilidad técnico-económica para la instalación de una planta de Oxígeno. Johanna Riquelme, Alvaro Rogel, 2007.

<sup>7</sup> Estudio de prefactibilidad técnico-económica de una planta de Amoniaco, Mauricio Rebollado, 2008.

$\rho$ : Densidad

$\dot{m}$ : Flujo Másico

$T_i$ : Temperatura de entrada

$T_f$ : Temperatura de salida

Las características de diseño de los intercambiadores de Tubos y Carcasa, se encuentran detallados en Anexo IV.

El procedimiento de diseño se muestra a continuación a modo de ejemplo, el diseño de todos los intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa se realiza de la misma manera.

En Figura N°27 se muestra el procedimiento a seguir, detallado en Capítulo 3.

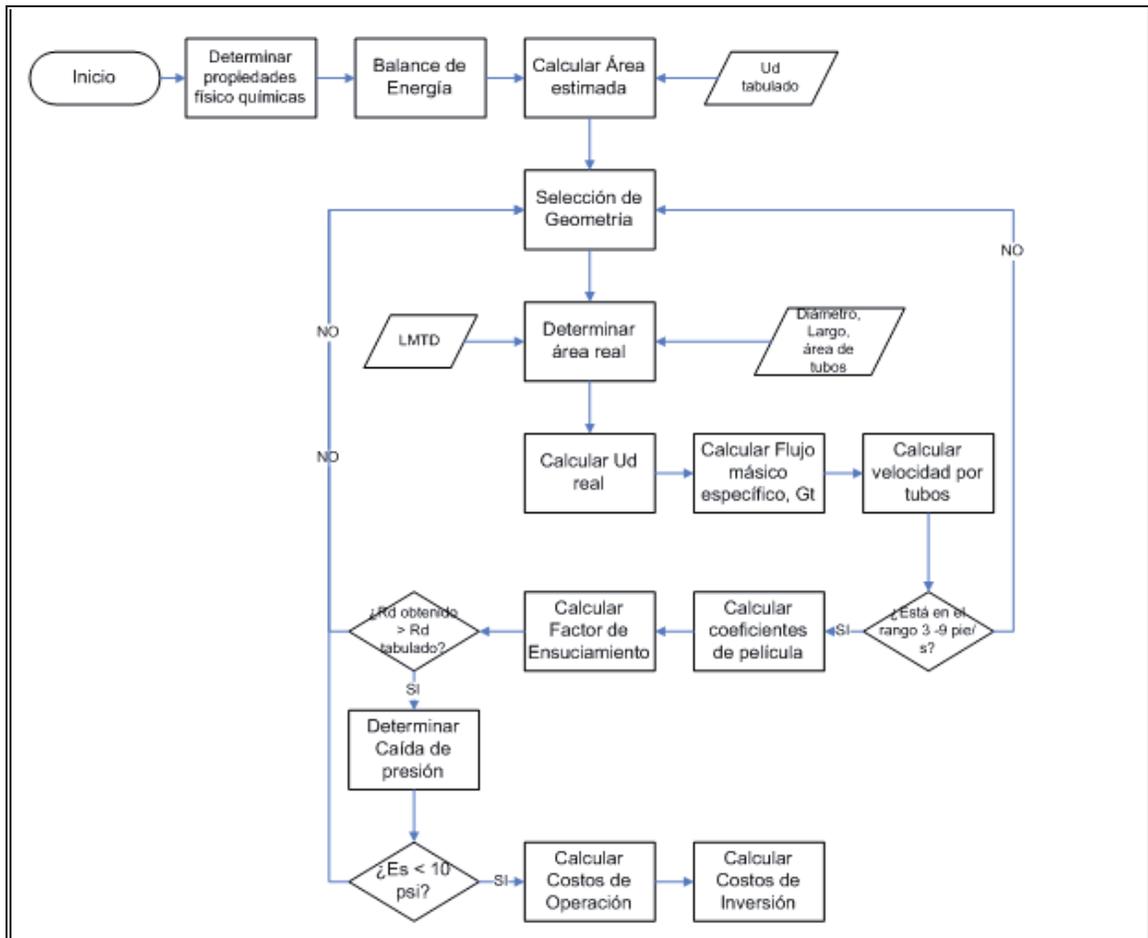


Figura N° 27: Procedimiento de diseño, Intercambiador de Tubos y Carcasa

- Determinación de propiedades físico químicas, detalladas en Tabla 8.
- Balance de Energía

$$Q = \dot{m}_1 \cdot Cp_1 \cdot \Delta T_1 = \dot{m}_2 \cdot Cp_2 \cdot \Delta T_2$$

$$Q = 3695054,3$$

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}}$$

$$LMTD = 86,03 \text{ [}^\circ\text{F]}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_1 - t_2}$$

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

$$R = 4$$

$$S = 0,15$$

$$F_T = 0,96$$

$$LMTD \text{ corregido} = 82,59 \text{ [}^\circ\text{F]}$$

- Calcular Área estimada:

$$A_e = \frac{Q}{U_D \cdot LMTD}$$

$$U_D = 50 \text{ [BTU/ h pie }^\circ\text{F]}$$

$$A_e = 894,78 \text{ [pie}^2\text{]}$$

- Selección de Geometría

	Tubos (Agua de enfriamiento)	Carcasa (Aire)
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 14	
Diámetro interno [Pulg]	1,08	29
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	174	

**Tabla 9: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa**

- Determinar Área real

$$A_{rsal} = L \cdot a_F \cdot N$$

$$a_F = 0,32710 \text{ [pie}^2\text{/pie lineal]}$$

$$\text{Área real} = 910,65 \text{ [pie}^2\text{]}$$

- Calcular Coeficiente global de transferencia de calor  $U_D$

$$U_D = \frac{Q}{A_{rsal} \cdot \Delta T_{rsal}}$$

$$U_D = 49,13 \text{ [BTU/ h pie }^\circ\text{F]}$$

$$U_D \text{ calculado} < U_D \text{ tabulado}$$

- Calcular flujo másico específico:

$$G_T = \frac{\dot{m}_1}{a_T}$$

$$G_T = 916059,92 \text{ [Lb /pie}^2\text{h]}$$

- Calcular velocidad por tubos:

$$v_T = \frac{G_T}{\rho}$$

$$V_T = 4,08 \text{ [pie/s]}$$

Restricción de diseño  $3 < v < 9 \text{ [pie/s]}$

- Calcular coeficientes de película:

$$\frac{h_o \cdot D_e}{k} = 0,36 \cdot Re^{0,55} \cdot Pr^{1/3} \cdot \phi_w$$

$$Re = \frac{D_{eq} \cdot G_S}{\mu}$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k}$$

Para el cálculo del coeficiente de película por los tubos se utiliza Figura N° 3 en Anexo

II.

$$h_i = 894,45 \text{ [BTU/ h pie}^2 \text{ °F]}$$

$$Re_o = 590867,09$$

$$Pr_o = 0,47895833$$

$$h_o = 98,52 \text{ [BTU/ h pie}^2 \text{ °F]}$$

$$h_{io} = 772,81 \text{ [BTU/ h pie}^2 \text{ °F]}$$

- Calcular factor de ensuciamiento

$$Rd = \left( \frac{U_C - U_D}{U_C \cdot U_D} \right)$$

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_{io}} + \frac{1}{h_o}$$

$$U_c = 87,38 \text{ [BTU / h pie } ^\circ\text{F]}$$

$$R_d = 0,00891092$$

- Determinar caídas de Presión

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_r$$

$$\Delta P_T = \frac{f \cdot G_T^2 \cdot L \cdot n}{D_i \cdot S \cdot \varphi_w}$$

Factor de fricción se obtiene de Figura N°5 Anexo II

$$\Delta P_T = 3,43 \text{ [psi]}$$

$$\Delta P_r = \frac{4 \cdot n}{S} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g'}$$

$\Delta P_r$  Se obtiene de Figura N°6 Anexo II

$$\Delta P_r = 2,64 \text{ [psi]}$$

$$\Delta P_T = 6,070 \text{ [psi]}$$

Restricción de diseño  $\Delta P \text{ líquidos} < 10 \text{ psi}$

- Calcular caída de presión para la carcasa

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N + 1)}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D_e \cdot S \cdot \varphi_s}$$

Factor de fricción se obtiene de Figura N°8 Anexo II

$$\Delta P_c = 0,3437758 \text{ [psi]}$$

- Calcular Costos de Operación

Los costos de operación fueron calculados de acuerdo a los costos de suministro eléctrico industrial de acuerdo a la Tabla 7: Costos suministro eléctrico año 2012.

$$Pot = \frac{1}{\eta} \cdot \left( \left( \frac{\Delta P_t \cdot \dot{m}_t}{\rho_t} \right) + \left( \frac{\Delta P_c \cdot \dot{m}_c}{\rho_c} \right) \right)$$

Pot = 0,05655223 [MW-h]

Costo de Operación = 76291,2267 [USD/MW-año]

- Costos de Inversión

$$C_p = C_o \cdot \frac{I_p}{I_o}$$

$$Costo = C_o \cdot f_d \cdot f_\varphi \cdot f_l \cdot f_m \cdot f_t \cdot f_{np} \cdot f_p$$

Los factores de corrección se obtienen de las Tablas 1 a 7 [Anexo III]

Costo Base se obtiene de Figura N°1 [Anexo III]

Índice valor presente e Índice valor pasado se obtiene de Figura N° 2 [Anexo III]

Costo de Inversión = 81774,7127 [USD]

En la Tabla 10 se muestra el resumen de los cálculos de los Intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa:

$v_c$	Re (t)	Re(c)	Pr (t)	Pr (c)	$h_i$	$h_o$	$R_d$
3,68	37242,76	488097,2	6,35	0,479	663	73,71	0,005
4,08	34068,3	590867	6,35	0,479	809,9	98,52	0,008
3,49	28654,71	437145,6	6,35	0,479	736	112,83	0,010
3,56	24830	739894,8	6,35	0,479	770,8	138,53	0,011
5,2	35000,57	538105,3	6,35	0,479	1425	159,87	0,012
4,76	30708	465407,1	6,35	0,479	940	147,61	0,010
4,65	28132	475576	6,35	0,479	1344	108,63	0,010
3,07	17373	345873,4	6,35	0,479	695,8	125,37	0,010
5,19	24438,8	492068,4	6,35	0,479	1050	199,2	0,013

**Tabla 10: Resumen A de cálculos obtenidos, Intercambiadores de Tubos y Carcasa**

En la Tabla 11 se muestran los Costos de Operación y Costos de Inversión obtenidos para los diferentes Intercambiadores de calor calculados:

Velocidad [pie/s]	Costos de inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
3,68	93373,67	27003
4,08	81774,71	76291,3
3,49	83247,01	91259,9
3,56	76686,44	225553
5,2	72989,23	339163,6
4,76	87858	226117,3
4,65	93220,39	78545,3
3,07	88572,11	97894
5,19	73363,58	679016,9

**Tabla 11: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, Chile**

La figura N°28, muestra la relación Costos de Inversión vs Costos de Operación obtenida con los parámetros recomendados, para Chile:

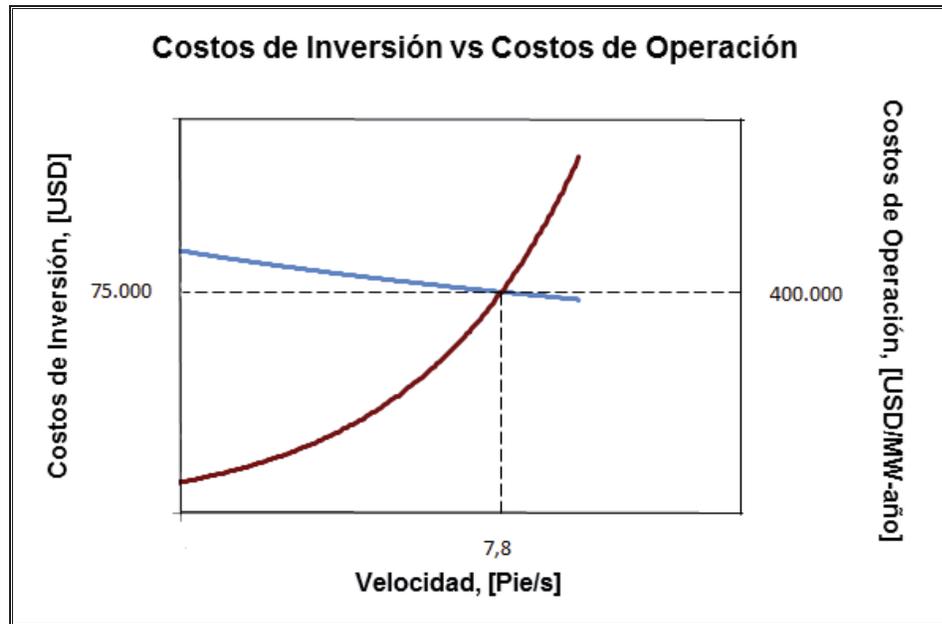


Figura N° 28: Relación A Costos de Inversión vs Costos de Operación.

A continuación en Tabla 12 se muestra el resumen de costos obtenidos para países de la OCDE:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
3,68	93373,67	19463,4
4,08	81774,71	54989,1
3,49	83247,01	66426,9
3,56	76686,44	162574
5,2	72989,23	244462
4,76	87858	162980,6
4,65	93220,39	56613,8
3,07	88572,11	70559,9
5,19	73363,58	489421,3

Tabla 12: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, OCDE

La figura 29 muestra la relación de costos obtenida para los países pertenecientes a la OCDE:

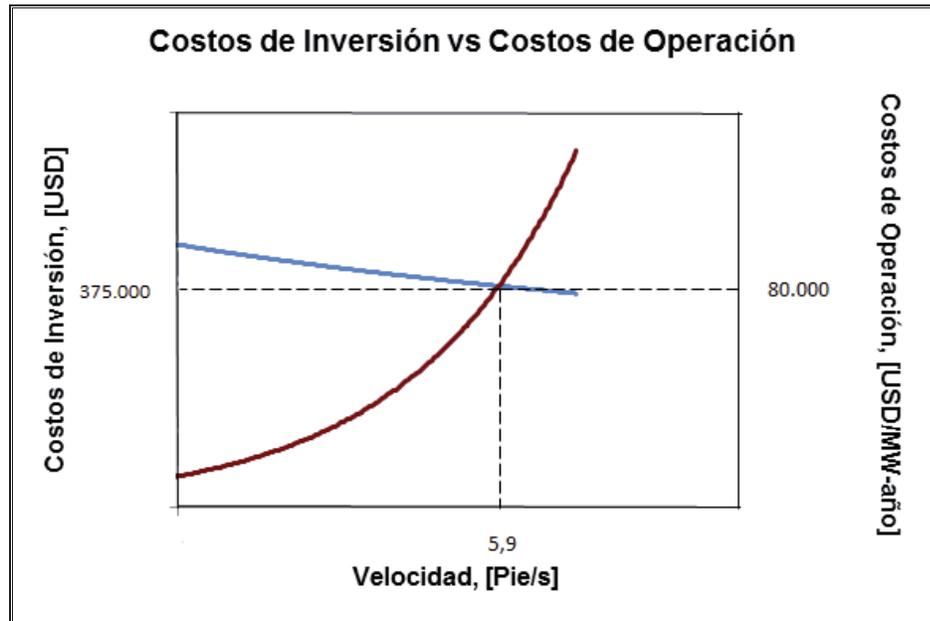


Figura N° 29: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE

La Tabla 13 muestra los costos obtenidos para EEUU:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación[USD/MW-año]
3,68	93373,67	12274,2
4,08	81774,71	34667,8
3,49	83247,01	41890,8
3,56	76686,44	102524,2
5,2	72989,23	154165,3
4,76	87858	102780,6
4,65	93220,39	35702,4
3,07	88572,11	44497,3
5,19	73363,58	308644

Tabla 13: Resumen de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, EEUU

La figura N°30 muestra la Relación de costos obtenida para EEUU:

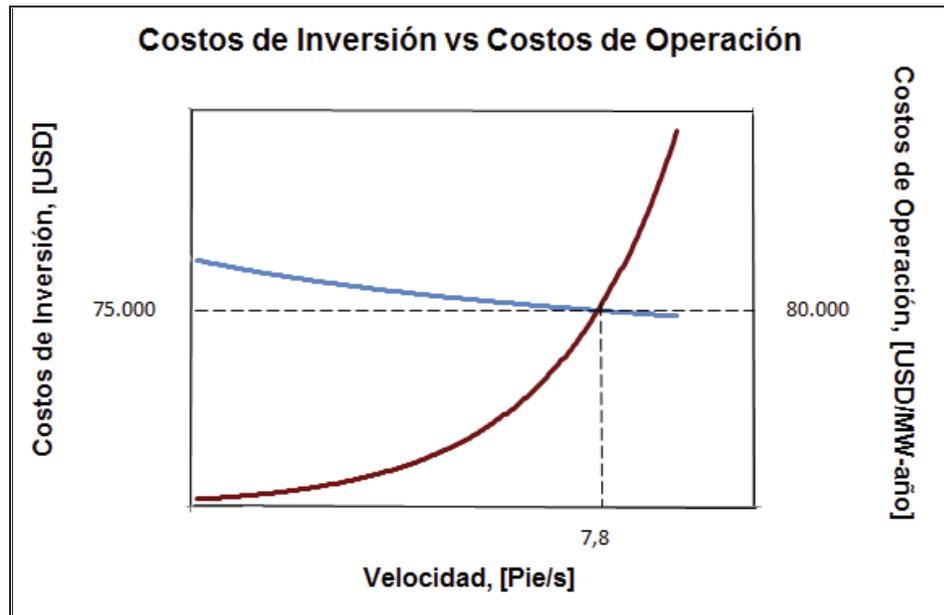


Figura N° 30: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU

La Tabla 14 muestra las condiciones de proceso B para el diseño de Intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa.

	Aire	Agua de enfriamiento	Unidades
$\mu$	0.018	0.64	$C_p$
$C_p$	0.25	1	$BTU/Lb \cdot ^\circ F$
$k$	0.017	0.366	$BTU/h \cdot pie \cdot ^\circ F$
$\rho$	0.62	62.4	$Lb/pie^3$
$\dot{m}$	46647.7	22000	$Lb/h$
$T_i$	189.36	90	$^\circ F$
$T_f$	111.6	127.7	$^\circ F$

Tabla 14: Condiciones de proceso B, Planta de Oxígeno

La Tabla 15 muestra el resumen de los cálculos de intercambiadores de Tubos y Carcasa:

$v_r$	Re (t)	Re(c)	Pr (t)	Pr (c)	$h_i$	$h_o$	$R_d$
3,29	23214,9	276282,8	4,23	0,64	909	113,2	0,012
3,48	20288,7	215931,2	4,23	0,64	1019,2	98,85	0,009
3,05	19597,3	229279,7	4,23	0,64	877,2	76,97	0,007
3,89	24007,8	229279,7	4,23	0,64	1040,4	76,97	0,006
3,01	20163,55	298377,6	4,23	0,64	765	98,85	0,008
3,15	22186,4	312107,8	4,23	0,64	782,1	67,25	0,003

**Tabla 15: Resumen B de cálculos, Intercambiadores de Tubos y Carcasa**

Las características de diseño de los intercambiadores de Tubos y Carcasa, se encuentran detalladas en el Anexo IV.

En Tabla 16 se muestra los costos obtenidos para Chile:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
3,29	52192,66	3794,2
3,48	55592,2	5615,7
3,05	55966,26	2715
3,89	53753	2996,4
3,01	53753	439,13
3,15	59369,42	1888,8

**Tabla 16: Resumen B de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, Chile**

La Figura N° 31 muestra la Relación de costos obtenida para Chile

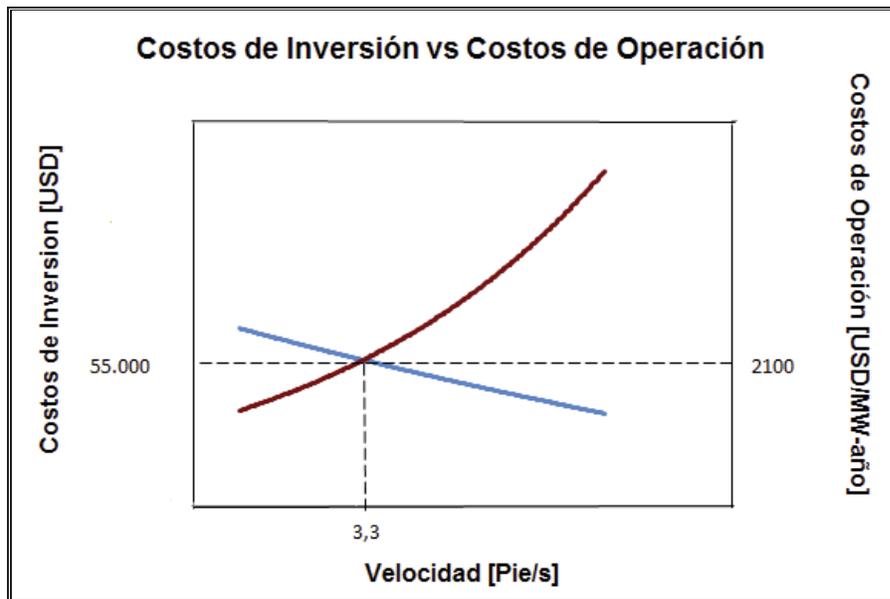


Figura N° 31: Relación B Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile

La Tabla 17 muestra los costos obtenidos para los países pertenecientes a la OCDE

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
3,48	55592,2	4047,6
3,05	55966,26	1956,9
3,89	53753	2159,7
3,29	52192,66	2734,7
3,01	53753	316,6
3,15	59369,42	1361,4

Tabla 17: Resumen B Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, OCDE

La figura N°32 muestra la relación de costos obtenida para países pertenecientes a la OCDE

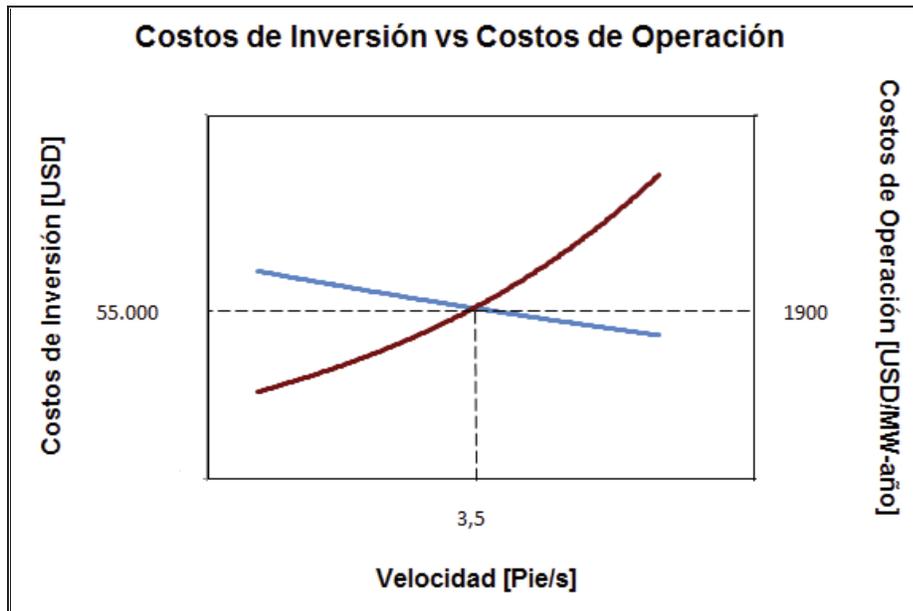


Figura N° 32: Relación B, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE

La Tabla 18 muestra los costos obtenidos para EEUU:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
3,48	55592,2	2552,6
3,05	55966,26	1234,2
3,89	53753	1361,9
3,29	52192,66	1724,6
3,01	53753	199,6
3,15	59369,42	858,6

Tabla 18: Resumen B Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, EEUU

La Figura N°33 muestra la relación de costos obtenida para EEUU

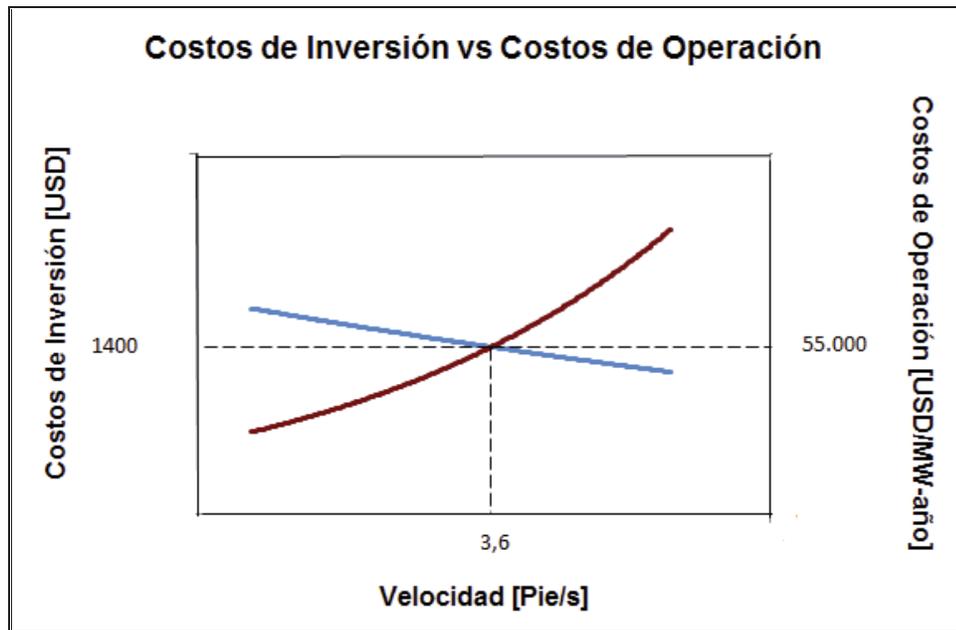


Figura N° 33: Relación B Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU

En la Tabla 19 se muestra las condiciones de procesos C, obtenidas de la producción de Amoniaco.

	Aire	Agua de enfriamiento	Unidades
$\mu$	0.021	0.59	$C_p$
$C_p$	0.255	1	$BTU/Lb \cdot ^\circ F$
$k$	0.019	0.372	$BTU/h \cdot pie \cdot ^\circ F$
$\rho$	0.188	62.4	$Lb/pie^3$
$\dot{m}$	110213	205267	$Lb/h$
$T_i$	385.2	102.6	$^\circ F$
$T_f$	111.6	138.6	$^\circ F$

Tabla 19: Condiciones de proceso C, Planta de Amoniaco

Las características de diseño de intercambiadores de Tubos y Carcasa, se encuentran detallados en Anexo IV.

La Tabla 20 muestra el resumen de los cálculos de diseño de los Intercambiadores de Tubos y Carcasa:

$v_r$	Re (t)	Re(c)	Pr (t)	Pr (c)	$h_i$	$h_o$	$R_d$
3,03	21105,9	146779,6	3,84	0,68	927	52,82	0,004
4,08	31241	135402,8	3,84	0,68	1121,1	87,27	0,013
4,38	37418,9	135402,8	3,84	0,68	1199,8	87,27	0,013
4,09	35911,3	171088	3,84	0,68	1098,4	55,14	0,0065
3,72	35709,4	111993,2	3,84	0,68	1067	60,06	0,0077
3,21	35135,4	153990,6	3,84	0,68	883,6	52,04	0,005
3,10	36619,9	171088,2	3,84	0,68	828	55,14	0,006
3,9	50149,9	157262,9	3,84	0,68	990	57,27	0,006

**Tabla 20: Resumen C de cálculos, Intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa**

La Tabla 21 muestra los costos obtenidos para Chile:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
3,03	267814,6	7393,8
4,08	259136,56	29070,5
4,38	263553,54	30644,9
4,09	292970,4	10643,2
3,72	291553,65	9462,8
3,21	280857,47	6700,3
3,1	293498,26	8751
3,9	256121,04	11011,7

**Tabla 21: Resumen C Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, Chile**

En la Figura N°34 se muestra la relación Costos de Inversión vs Costos de Operación obtenida en Chile.

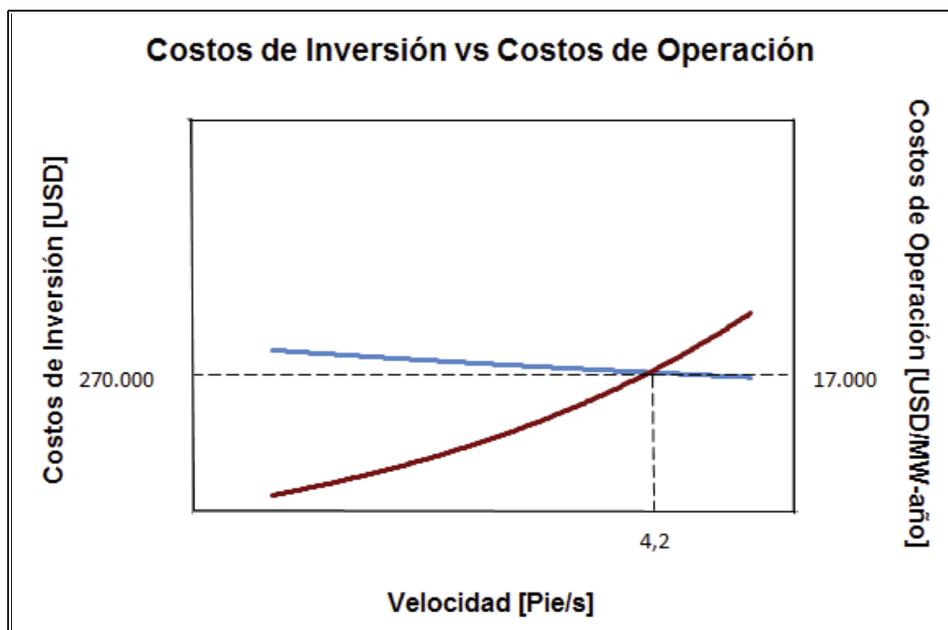


Figura N° 34: Relación C, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile

La Tabla 22 muestra en resumen los costos obtenidos para los países de la OCDE:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
3,03	267814,6	5329,3
4,08	259136,56	20953,4
4,38	263553,54	22088,2
4,09	292970,4	7542
3,72	291553,65	6820,6
3,21	280857,47	4829,4
3,1	293498,26	6307,5
3,9	256121,04	7936,9

Tabla 22: Resumen C Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, OCDE

La Figura N°35 muestra la relación de costos obtenida a partir de los datos detallados en Tabla 22:

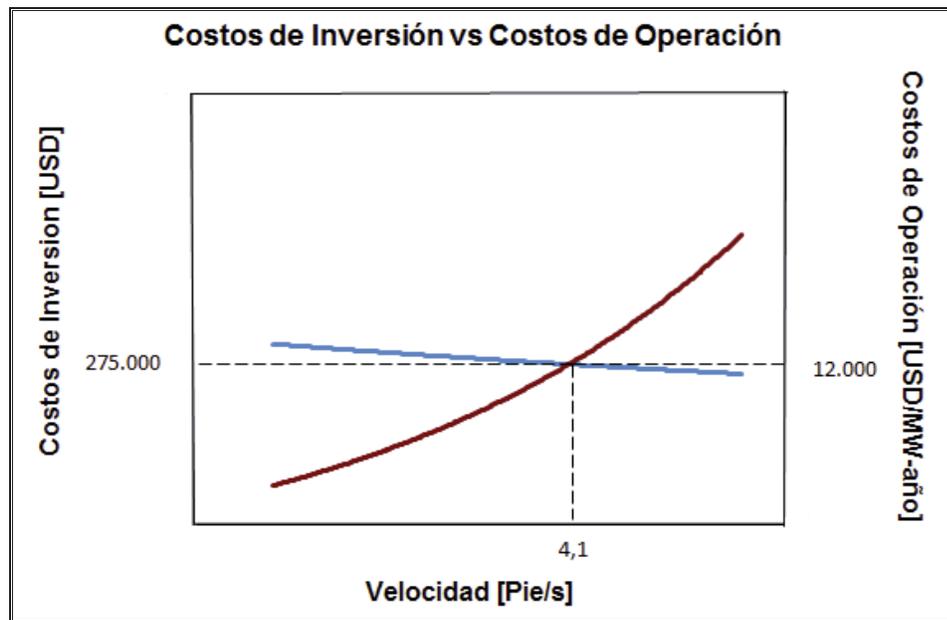


Figura N° 35: Relación C, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE

La Tabla 23 muestra en resumen los costos obtenidos para EEUU:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
3,03	267814,6	3360,8
4,08	259136,56	13213,8
4,38	263553,54	12929,5
4,09	292970,4	4756
3,72	291553,65	4301,3
3,21	280857,47	3045,6
3,1	293498,26	3977,7
3,9	256121,04	5005,3

Tabla 23: Resumen C Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, EEUU

La Figura N°36 muestra la relación de costos obtenida:

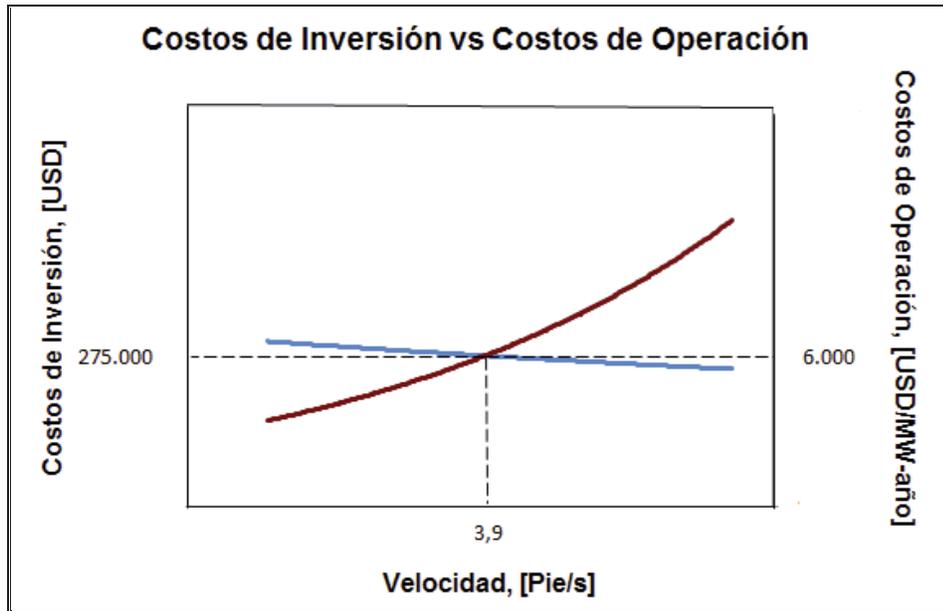


Figura N° 36: Relación C, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU

### 5.1.2 Diseño en base a parámetros fuera de rango recomendado

Condiciones de proceso

Las condiciones de proceso corresponden a las utilizadas en el ítem de diseño en base a parámetros recomendados.

	Aire	Agua de enfriamiento	Unidades
$\mu$	0.019	1	$C_p$
$C_p$	0.25	1	$BTU/Lb \cdot ^\circ F$
$k$	0.024	0.381	$BTU/h \cdot pie \cdot ^\circ F$
$\rho$	0.0765	62.4	$Lb/pie^3$
$\dot{m}$	170279	170279	$Lb/h$
$T_i$	211.7	67.7	$^\circ F$
$T_f$	125.3	89.3	$^\circ F$

Tabla 24: Condiciones de proceso A, Planta de Oxígeno

Las características de diseño obtenidas en base a parámetros fuera de rango recomendado, se encuentran detalladas en Anexo IV.

A continuación en la Tabla 25 se muestra un resumen de los cálculos obtenidos en el diseño de los Intercambiadores de Tubos y Carcasa:

$v_t$	Re (t)	Re(c)	Pr (t)	Pr (c)	$h_i$	$h_o$	$R_d$
1,61	15311,24	356179	6,35	0,479	310,86	84,94	0,004
2,06	21699,32	518810,13	6,35	0,479	527	104,46	0,008
1,12	12099,17	710962	6,35	0,479	249,4	90,65	0,0054
2,71	24094,6	588223	6,35	0,479	569,6	132,84	0,01
2,1	15931,9	405648,3	6,35	0,479	478,4	80,11	0,005
2,86	14824	302684,2	6,35	0,479	663,3	116,5	0,009
2,42	12209,4	679949	6,35	0,479	594	137,81	0,012
2,39	11479,8	522487	6,35	0,479	550	155,5	0,012
2,37	9340,25	377497	6,35	0,479	590	129,75	0,011

**Tabla 25: Resumen A cálculos fuera de rango, Intercambiadores de Tubos y Carcasa**

La Tabla 26 muestra los costos obtenidos para Chile:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
1,61	118175	33523
2,06	73324,63	94738
1,12	74796	69915
2,71	69891,37	219780
2,1	98697,62	24429,7
2,86	97481,62	262131
2,42	72619,61	241786,2
2,39	73111,22	307592
2,37	84108,28	145127,3

**Tabla 26: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, Chile**

En la Figura N°37 se muestra la relación de los costos de inversión vs los costos de operación obtenida con fuera de rango recomendado, en Chile:

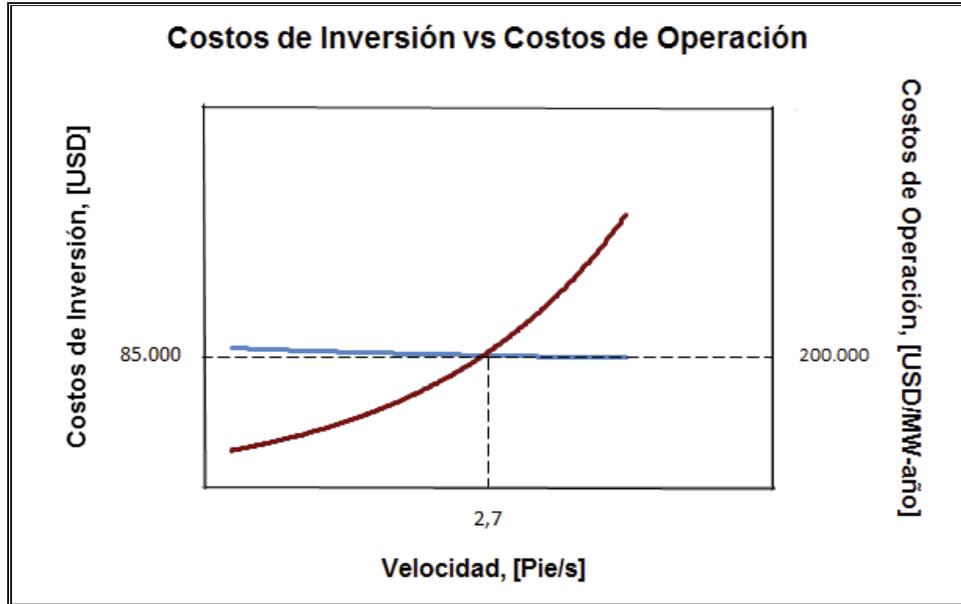


Figura N° 37: Relación A fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile.

La Tabla 27 muestra en resumen los costos obtenidos para los países de la OCDE:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
1,61	118175	24163
2,06	73324,63	68285
1,12	74796	50393,3
2,71	69891,37	158413,3
2,1	98697,62	21212,3
2,86	97481,62	179346,4
2,42	72619,61	174274,6
2,39	73111,22	221706
2,37	84108,28	104604,7

Tabla 27: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, OCDE

La Figura N°38 muestra la relación de costos obtenida:

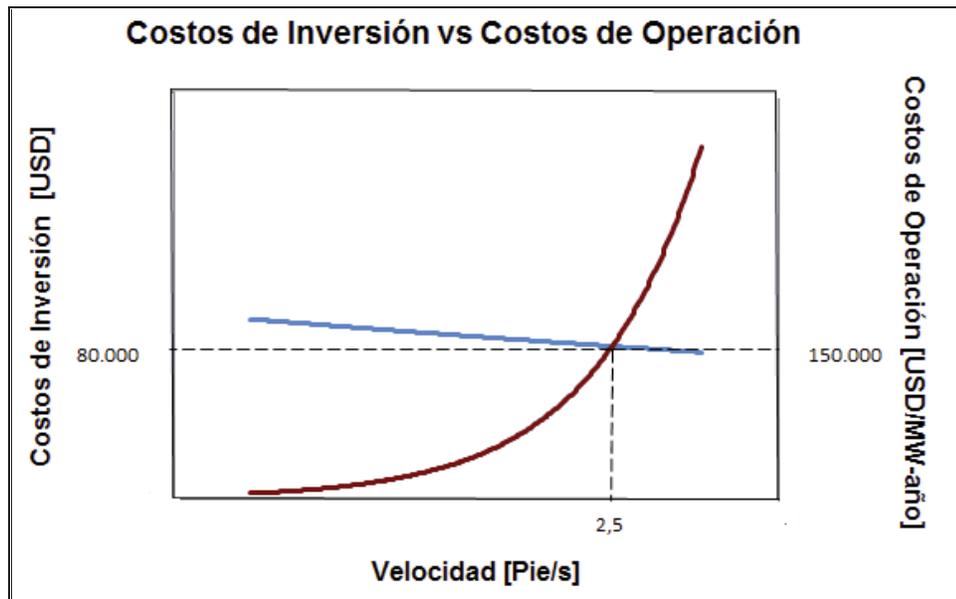


Figura N° 38: Relación A fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE.

La Tabla 28 muestra los costos obtenidos para EEUU:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
1,61	118175	15238,1
2,06	73324,63	43062,9
1,12	74796	31779,5
2,71	69891,37	99900,3
2,1	98697,62	13377,14
2,86	97481,62	130596
2,42	72619,61	109902,9
2,39	73111,22	139814,6
2,37	84108,28	65966,94

Tabla 28: Resumen A de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, EEUU

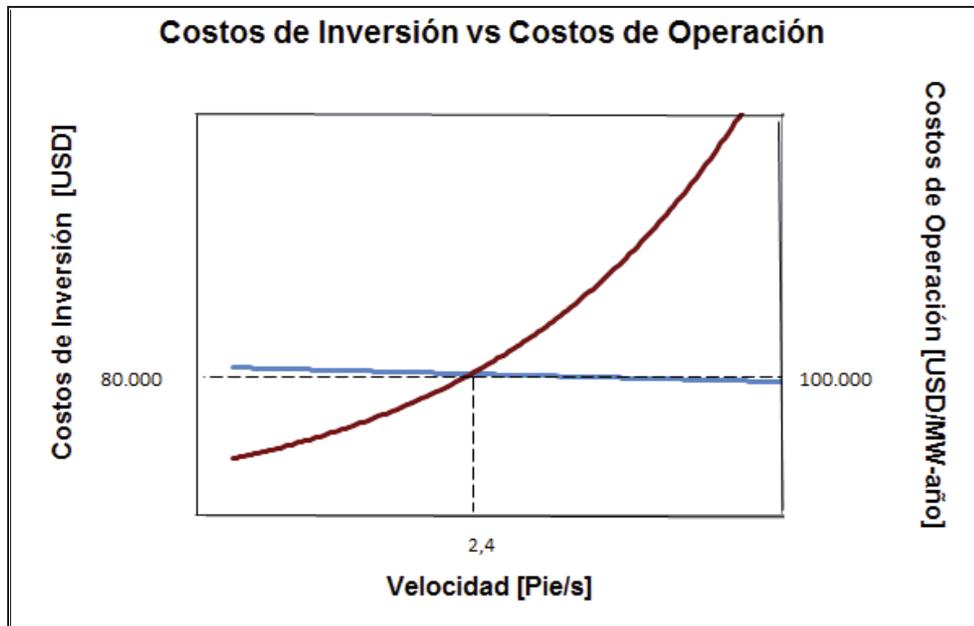


Figura N° 39: Relación A fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU

Condiciones de proceso B a utilizar con parámetros fuera de rango recomendado

	Aire	Agua de enfriamiento	Unidades
$\mu$	0.018	0.64	$C_p$
$C_p$	0.25	1	$BTU/Lb \cdot ^\circ F$
$k$	0.017	0.366	$BTU/h \cdot pie \cdot ^\circ F$
$\rho$	0.62	62.4	$Lb/pie^3$
$\dot{m}$	46647.7	22000	$Lb/h$
$T_i$	189.36	90	$^\circ F$
$T_f$	111.6	127.7	$^\circ F$

Tabla 29: Condiciones de proceso B, Planta de Oxígeno

Las características de diseño obtenidas, se detallan en Anexo IV. A continuación en la Tabla 30 se muestran los cálculos de los diseños de Intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa bajo parámetros fuera del rango recomendado

$v_r$	Re (t)	Re(c)	Pr (t)	Pr (c)	$h_i$	$h_o$	$R_d$
2,57	17368,8	215931,2	4,23	0,64	765	98,85	0,008
2,16	20163,55	229279,7	4,23	0,64	639,9	76,97	0,006
1,21	16586,3	226987	4,23	0,64	389,5	77,61	0,005
2,31	11827,66	312107,8	4,23	0,64	652,8	67,25	0,005
1,52	20439,4	312107,8	4,23	0,64	451,2	67,25	0,003
1,79	22186,4	235426	4,23	0,64	533,6	62,65	0,022
1,47	16593,8	265821	4,23	0,64	427,7	49,95	0,003
1,91	22678,7	318213	4,23	0,64	552	54,71	0,022

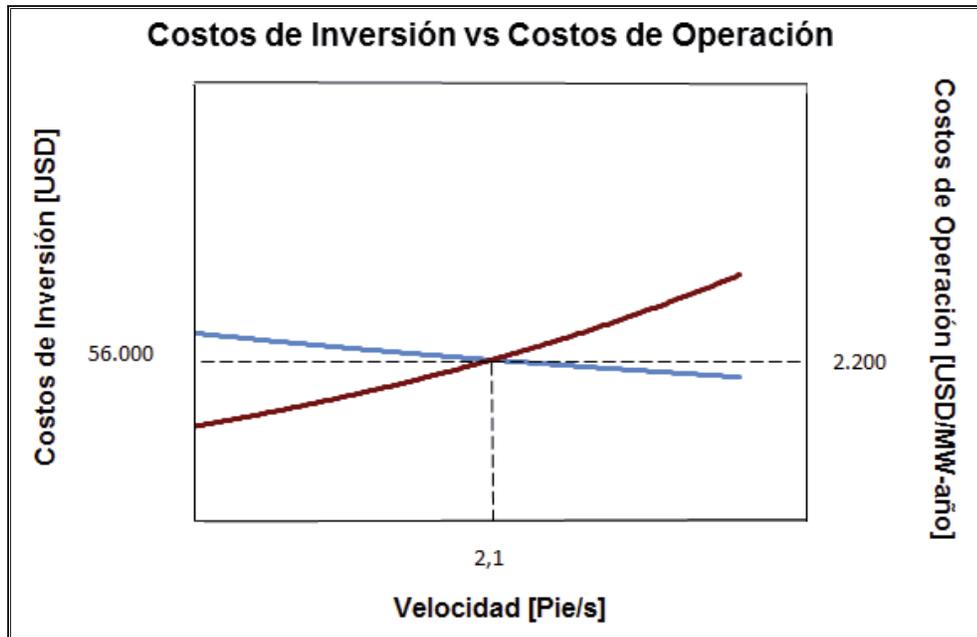
**Tabla 30: Resumen B cálculos fuera de rango, Intercambiadores de Tubos y Carcasa**

La Tabla 31 muestra los costos obtenidos para Chile:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
2,57	52789,3	5405,6
2,16	55966,26	2801
1,21	56275,29	2439,6
2,31	60335,35	2915,6
1,52	59369,42	1875,6
1,79	53945,14	1487,9
1,47	55742,8	816,8
1,91	53199,45	1184,8

**Tabla 31: Resumen B de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, Chile**

En la Figura N°40 se muestra la relación Costos de Inversión vs Costos de Operación obtenida a partir de datos fuera de rango recomendado, se detalla el resultado para Chile.



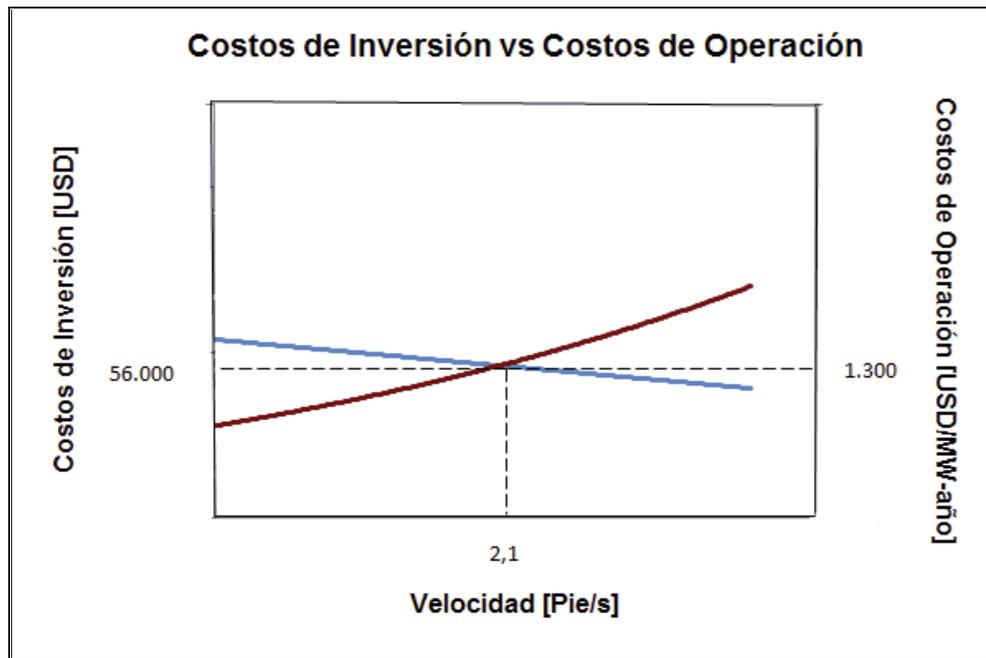
**Figura N° 40: Relación B fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile.**

A continuación en la Tabla 32 se muestra el resumen de los costos obtenidos para países de la OCDE:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
2,57	52789,3	3896,3
2,16	55966,26	2018
1,21	56275,29	1758,4
2,31	60335,35	1755,7
1,52	59369,42	1351,8
1,79	53945,14	1072,5
1,47	55742,8	588,7
1,91	53199,45	854

**Tabla 32: Resumen B de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, OCDE**

La Figura N° 41 muestra la relación de costos obtenida para países de la OCDE



**Figura N° 31: Relación B fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de operación, OCDE**

La Tabla 33 que se muestra a continuación detalla el resumen de costos obtenidos para Chile

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
2,57	52789,2	2457,1
2,16	55966,26	1273,2
1,21	56275,29	1108,9
2,31	60335,35	1267,8
1,52	59369,42	852,5
1,79	53945,14	676,4
1,47	55742,8	371,3
1,91	53199,45	538,6

**Tabla 33: Resumen B de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, Chile**

La Figura N° 42 muestra la relación de costos obtenida para EEUU

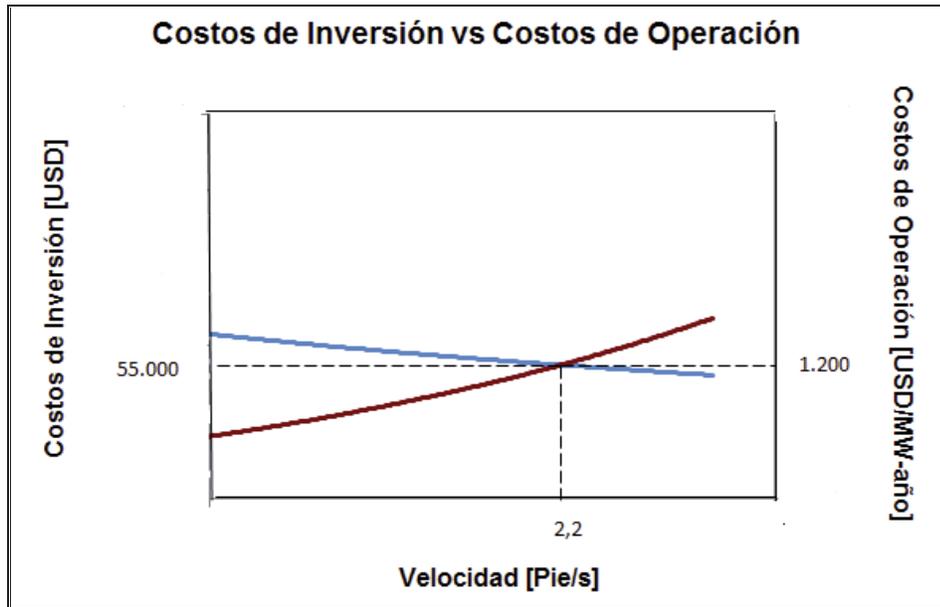


Figura N° 42: Relación B fuera de recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU

Condiciones de proceso C

	Aire	Agua de enfriamiento	Unidades
$\mu$	0.021	0.59	$C_p$
$C_p$	0.255	1	$BTU/Lb \cdot ^\circ F$
$k$	0.019	0.372	$BTU/h \cdot pie \cdot ^\circ F$
$\rho$	0.188	62.4	$Lb/pie^3$
$\dot{m}$	110213	205267	$Lb/h$
$T_i$	385.2	102.6	$^\circ F$
$T_f$	111.6	138.6	$^\circ F$

Tabla 34: Condiciones de proceso, Planta de Amoniaco

Las características de diseño obtenidas, se detallan en Anexo IV

A continuación en la Tabla 35 se muestra el resumen de cálculos obtenidos a partir de los diseños de intercambiadores de Tubos y Carcasa

$v_t$	Re (t)	Re(c)	Pr (t)	Pr (c)	$h_i$	$h_o$	$R_d$
2,01	12726,6	165110,4	3,84	0,68	665,6	56,35	0,005
1,98	16062,3	112788,5	3,84	0,68	620	59,47	0,006
2,68	27522,45	124427,8	3,84	0,68	779	63,64	0,0099
2,75	33148,7	145546,9	3,84	0,68	920	54,05	0,005
2,84	39496,8	145546,9	3,84	0,68	792	54,05	0,005

**Tabla 35: Resumen C cálculos fuera de rango, Intercambiadores de Tubos y Carcasa**

La Tabla 36 muestra el resumen de costos obtenidos en base a datos fuera de rango recomendado para Chile:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
2,01	261158,95	8376
1,98	277106,6	7116,5
2,68	280530,52	9855,2
2,75	258540,06	8229
2,84	257371,9	7790,5

**Tabla 36: Resumen C de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, Chile**

A continuación en la Figura N°43 se muestra la relación de Costos de Inversión vs Costos de Operación obtenida a partir de parámetros fuera de rango recomendado, para Chile.

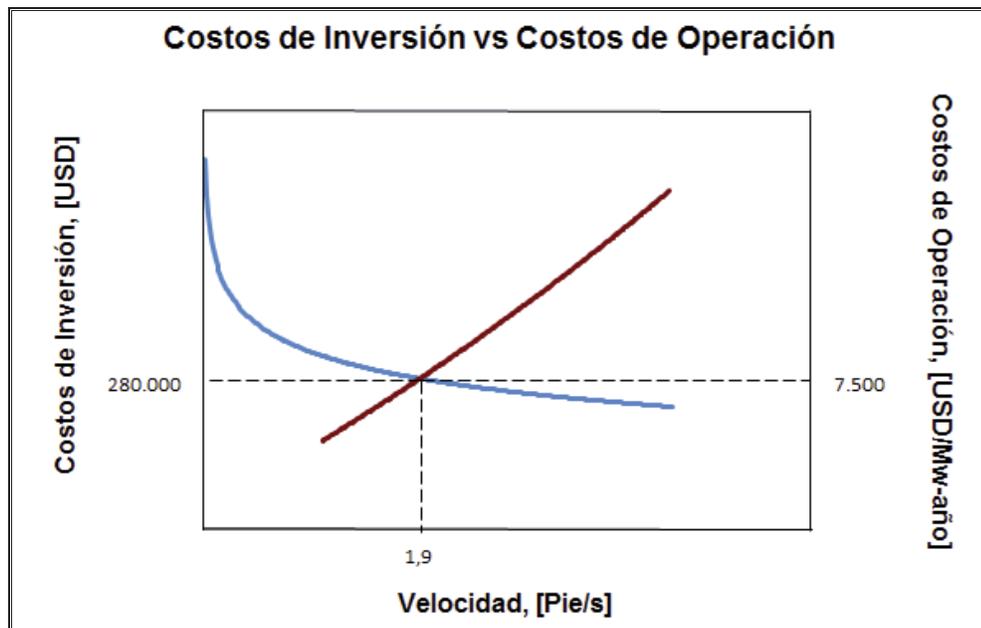


Figura N° 43: Relación C fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile

En la Tabla 37 se muestra en resumen los costos obtenidos bajo datos fuera de rango recomendado para países pertenecientes a la OCDE:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
2,01	261158,95	6037
1,98	277106,6	5129,4
2,68	280530,52	7130,4
2,75	258540,06	5931,4
2,84	257371,9	5615,2

Tabla 37: Resumen C de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, OCDE

A continuación en la Figura N° 44 se muestra la relación de costos obtenida bajo datos fuera de rango recomendado

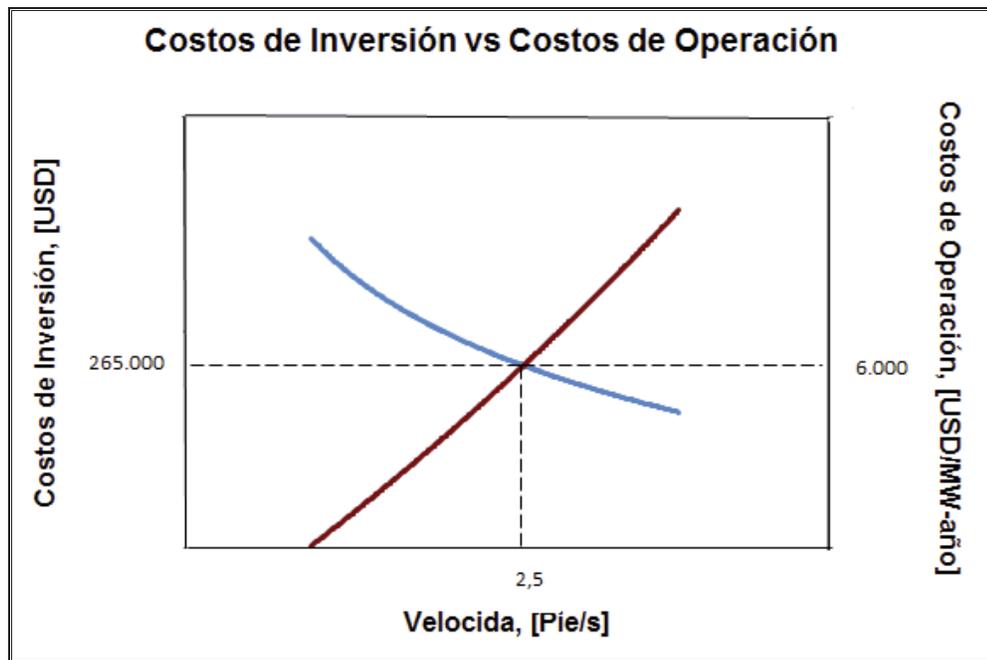


Figura N° 44: Relación C fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE.

La Tabla 38 muestra el resumen de los costos obtenidos bajo datos fuera de rango recomendados para EEUU:

Velocidad [pie/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
2,01	261158,95	3807
1,98	277106,6	3234,8
2,68	280530,52	4479,6
2,75	258540,06	3740,5
2,84	257371,9	3541,2

Tabla 38: Resumen C de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos con datos fuera de rango recomendado, EEUU

La Figura 45 muestra la relación de costos obtenida con datos fuera de rango recomendado para EEUU:

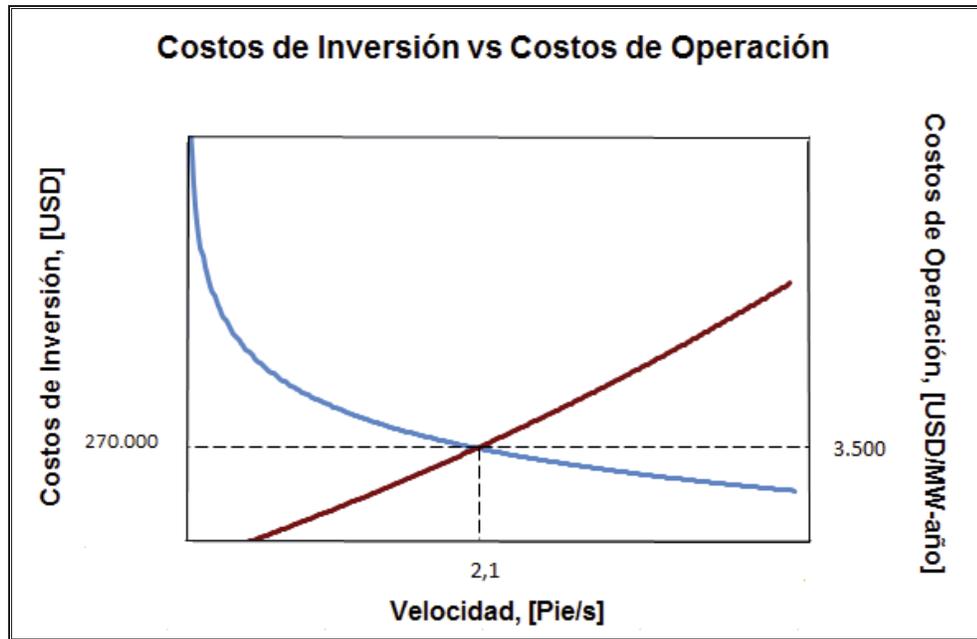


Figura N° 45: Relación C fuera de rango recomendado, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU

## 5.2 Intercambiadores de placas

### 5.2.1 Diseño de equipos en base a parámetros fuera de rango recomendado.

- Condiciones de proceso para intercambiadores de placas. Se utilizará las condiciones de proceso obtenidas de Memoria de título Recuperación de energía en proceso de producción de Ácido Sulfúrico.

	Ácido	Agua	Unidades
$\mu$	14.40	2.16	$Kg/m \cdot h$
$Cp$	1.45	4.18	$KJ/Kg \cdot ^\circ C$
$k$	1.3	2.24	$KJ/m \cdot h \cdot ^\circ C$
$\rho$	1782	1000	$Kg/m^3$
$F_v$	311.67	262.67	$m^3/h$
$T_i$	95	40	$^\circ C$
$T_f$	65	62	$^\circ C$

Tabla 39: Condiciones de proceso, Planta de Ácido<sup>8</sup>

El procedimiento de diseño se muestra a continuación a modo de ejemplo, el diseño del resto de los intercambiadores de Placas se realiza de la misma manera.

Las características de los intercambiadores de detallan en Anexo IV

---

<sup>8</sup> Recuperación de energía en proceso de producción de Ácido Sulfúrico, Vincenzo Sartori, 2012

En la Figura N°46 se muestra el procedimiento a seguir, detallado en Capítulo 3

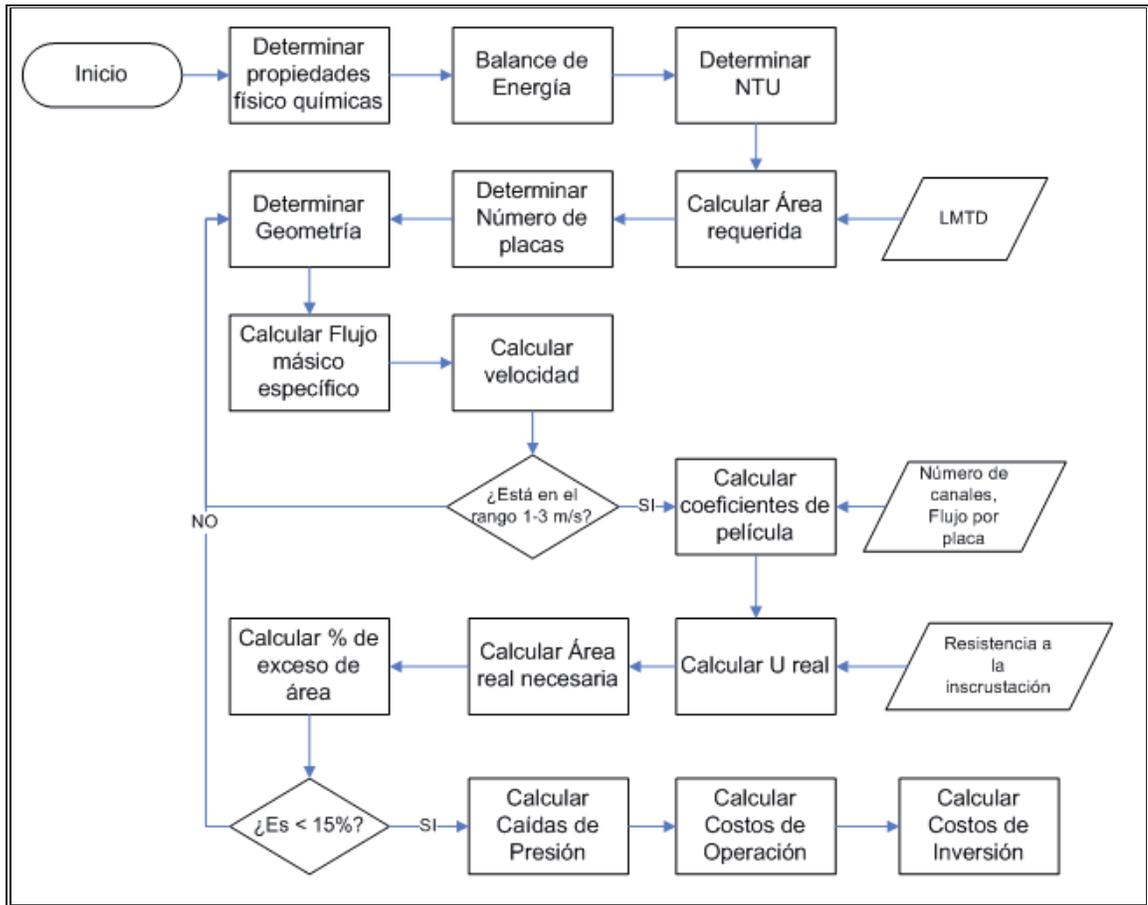


Figura N° 46: Procedimiento de diseño, Intercambiadores de Placas

- Determinar propiedades físico químicas, detalle en Tabla 29.
- Balance de Energía

$$Q = \dot{m}_1 \cdot Cp_1 \cdot \Delta T_1 = \dot{m}_2 \cdot Cp_2 \cdot \Delta T_2$$

$$Q = 6711034,28 \text{ [W]}$$

- Calcular NTU para corriente fría y corriente caliente:

Lado caliente

$$NTU = \frac{T_1 - T_2}{LMTD}$$

Lado frío

$$NTU = \frac{t_2 - t_1}{LMTD}$$

$$NTU_{total} = NTU_{caliente} + NTU_{frio}$$

$$NTU = 2$$

- Calcular Área requerida:

$$A_r = \frac{Q}{U_D \cdot LMTD}$$

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}}$$

$$LMTD = 28,8151495 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$U_D = 2500 \text{ [W/m}^2\text{]} \text{ Tabla 9 [Anexo II]}$$

$$A_r = 93,2 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Determinar Número de placas:

$$N_p = \frac{A_r}{A_p}$$

$$N_p = 115$$

- Determinar Geometría

Tipo de Placas	P16
Ancho de placa [mm]	1080
Espesor de Placa [mm]	1,1
N° de pasos	2
N° de placas	139

Número real de placas:

$$N_p = (n \cdot n_p + n \cdot n_p) - 1$$

$$N_p = 139$$

- Calcular flujo másico específico para cada corriente

$$G = \frac{\dot{m}}{a}$$

Fluido frío:

$$G = 1311121,09 \text{ [Kg/h m}^2\text{]}$$

Fluido Caliente:

$$G = 2772266,85 \text{ [Kg/h m}^2\text{]}$$

- Calcular velocidad para ambas corrientes:

$$v = \frac{G}{\rho \cdot 3600}$$

Velocidad lado frío:

$$v_f = 0,36 \text{ [m/s]}$$

Velocidad lado caliente:

$$v_c = 0,43 \text{ [m/s]}$$

- Calcular coeficientes de película para ambas corrientes:

Flujo turbulento

$$h = 0,2536 \cdot \left(\frac{k}{De}\right) \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,4}$$

Reynolds para Flujo en serie:

$$Re = \frac{De \cdot G}{\mu}$$

$$De = 2 \cdot b$$

Re frío = 6434,2

Re caliente = 2040,7

Pr frío = 4,03

Pr caliente = 16,06

Coeficiente de película lado frío:

$h_f = 7770,7 \text{ [W/m}^2 \text{ °C]}$

Coeficiente de película lado caliente:

$h_c = 3716,7 \text{ [W/m}^2 \text{ °C]}$

- Calcular coeficiente global de transferencia de calor:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + r_1 + \frac{1}{h_2} + r_2 + \frac{x}{k_p}$$

$r_{\text{caliente}} = 0,000005 \text{ [m}^2 \text{ °C/W]}$

$r_{\text{frío}} = 0,0000086 \text{ [m}^2 \text{ °C/W]}$

$U = 2431,04 \text{ [W/m}^2 \text{ °C]}$

- Calcular Área real necesaria:

$$A_o = \frac{Q}{U \cdot LMTD \cdot F_T}$$

$$A_o = 103,01 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Calcular % de exceso de área:

$$\% \text{ Exceso de área} = \left( \frac{A_d - A_o}{A_o} \right) \cdot 100$$

$$A_d = N_p \cdot A_p$$

$$A_d = 112,59 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\% \text{ de exceso} = 9,3 \%$$

- Calcular caídas de presión:

$$\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

$$\Delta P = \frac{2 \cdot f \cdot G^2 \cdot L}{g \cdot De \cdot \rho}$$

$$f = \frac{2,5}{Re^{0,3}}$$

$$f \text{ caliente} = 0,254$$

$$f \text{ frío} = 0,180$$

$$\Delta P \text{ frío} = 689,74 \text{ [Kg/m}^2\text{]}; 0,98 \text{ [Psi]}$$

$$\Delta P \text{ caliente} = 2442,19 \text{ [Kg/m}^2\text{]}; 3,47 \text{ [Psi]}$$

- Calcular Costos de Operación

$$Pot = \frac{1}{\eta} \cdot \left( \left( \frac{\Delta P_t \cdot \dot{m}_t}{\rho_t} \right) + \left( \frac{\Delta P_c \cdot \dot{m}_c}{\rho_c} \right) \right)$$

$$Pot [HP] = \frac{Pot}{550}$$

Pot = 0,067092851

Costos de Operación = 90510,94 [USD/MW-año]

- Calcular Costos de Inversión

$$C_o = 702 \cdot A^{0,6907}$$

Co = 18336,1451 [USD]

$$C_p = C_o \cdot \frac{I_p}{I_o}$$

I<sub>p</sub>; I<sub>o</sub>: Figura N°2 Anexo III

C<sub>p</sub> = 23783,462 [USD]

A continuación en la Tabla 40 se muestra el resumen de los diseños de Intercambiadores de Placas

$v_c$	$v_f$	Re (c)	Re (f)	h (c)	h (f)
0,43	0,26	2040,7	6434,2	3716,7	7770,7
0,28	0,23	1236,2	3897,6	2902,2	6067,9
0,32	0,27	1488,4	4677,1	3139,2	6563,5
0,21	0,18	525,2	1656,1	3019,6	6313,4
0,23	0,19	612,2	1930,2	3002,2	6276,9
0,19	0,16	872,2	2750	2267,3	4740,4
0,28	0,24	784,8	2474,7	3414,6	7139,1

**Tabla 40: Resumen de cálculos, Intercambiadores de Placas**

La Tabla 41 muestra el resumen de costos obtenidos para Intercambiadores de Placas en Chile

Velocidad caliente [m/s]	Velocidad frío [m/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
0,43	0,36	23783,4	90510,9
0,28	0,28	31748,4	44778,9
0,32	0,27	25743,7	47977,2
0,22	0,18	42424,3	40372,4
0,23	0,19	42644,5	27501,7
0,19	0,17	44045,3	16183,2
0,29	0,24	33241,7	22951,5

**Tabla 41: Resumen de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, Chile**

En la Figura N°47, se muestra la Relación de Costos obtenida en Chile

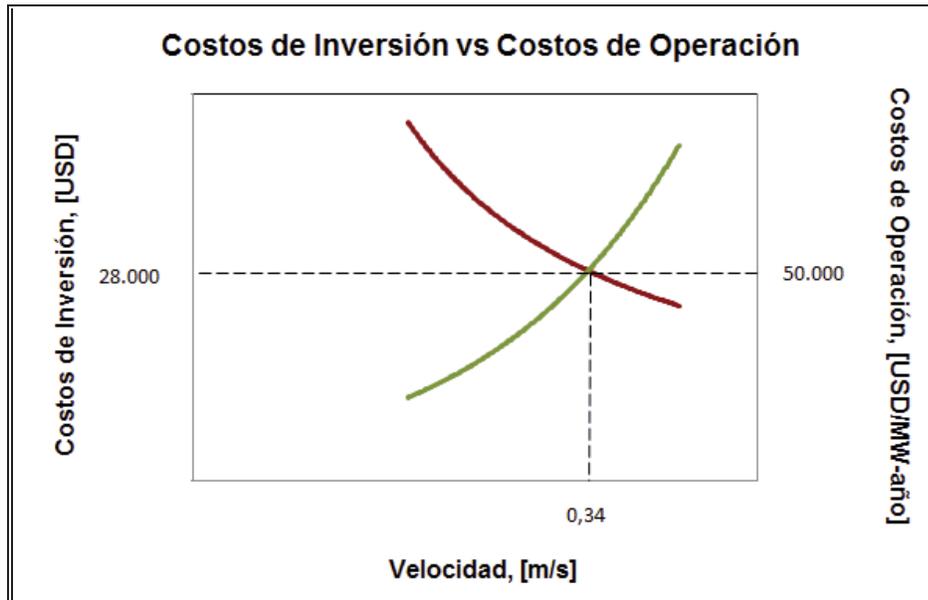


Figura N° 47: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, Chile

La Tabla 42 muestra el resumen de costos obtenidos para países de la OCDE:

Velocidad caliente [m/s]	Velocidad frío [m/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
0,43	0,36	23783,4	65238,4
0,28	0,28	31748,4	32275,7
0,32	0,27	25743,7	34580,9
0,22	0,18	42424,3	29099,6
0,23	0,19	42644,5	19822,6
0,19	0,17	44045,3	11664,5
0,29	0,24	33241,7	24471,5

Tabla 42: Resumen de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidos, OCDE

La Figura N° 48 muestra la relación de costos obtenida para países de la OCDE:

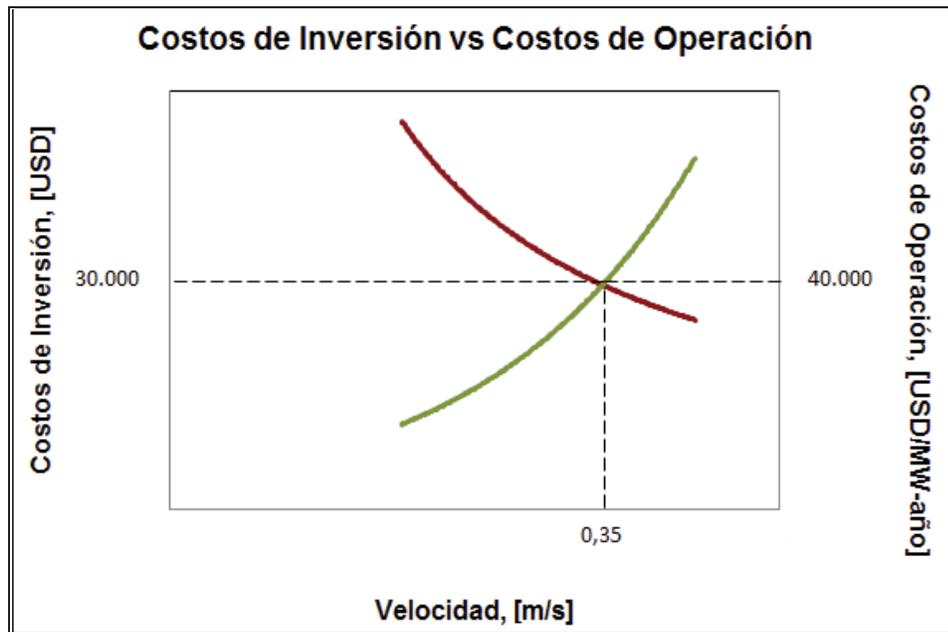


Figura N° 48: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, OCDE

A continuación en la Tabla 43 se muestra el resumen de costos obtenidos para EEUU:

Velocidad caliente [m/s]	Velocidad frío [m/s]	Costos de Inversión [USD]	Costos de Operación [USD/MW-año]
0,43	0,36	23783,4	41141,3
0,28	0,28	31748,4	20354
0,32	0,27	25743,7	21807,8
0,22	0,18	42424,3	18351,1
0,23	0,19	42644,5	12500,7
0,19	0,17	44045,3	7356
0,29	0,24	33241,7	15432,5

Tabla 43: Resumen de Costos de Inversión y Costos de Operación obtenidas, EEUU

La Figura N° 49 muestra la relación de costos obtenida en EEUU

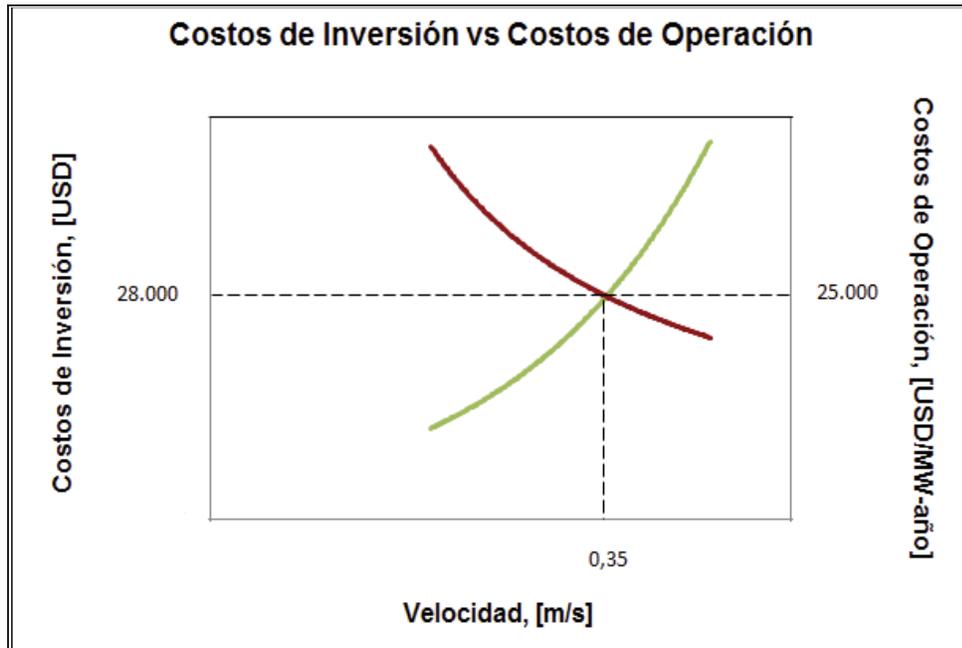


Figura N° 49: Relación A, Costos de Inversión vs Costos de Operación, EEUU

## 6. Análisis de resultados

### 6.1 Intercambiadores de Tubos y Carcasa

Los resultados obtenidos para cada condición de proceso utilizada se detallan a continuación en las Tabla 44, Tabla 45 y Tabla 46:

Condiciones de proceso A

	Chile	OCDE	EEUU	Unidades
Velocidad Recomendada	7,8	5,9	7,8	[Pie/s]
Velocidad fuera de rango recomendado	2,7	2,5	2,4	[Pie/s]

**Tabla 44: Resumen de velocidades óptimas obtenidas, condiciones de proceso A**

Condiciones de proceso B

	Chile	OCDE	EEUU	Unidades
Velocidad Recomendada	3,3	3,5	3,6	[Pie/s]
Velocidad fuera de rango recomendado	2,1	2,1	2,2	[Pie/s]

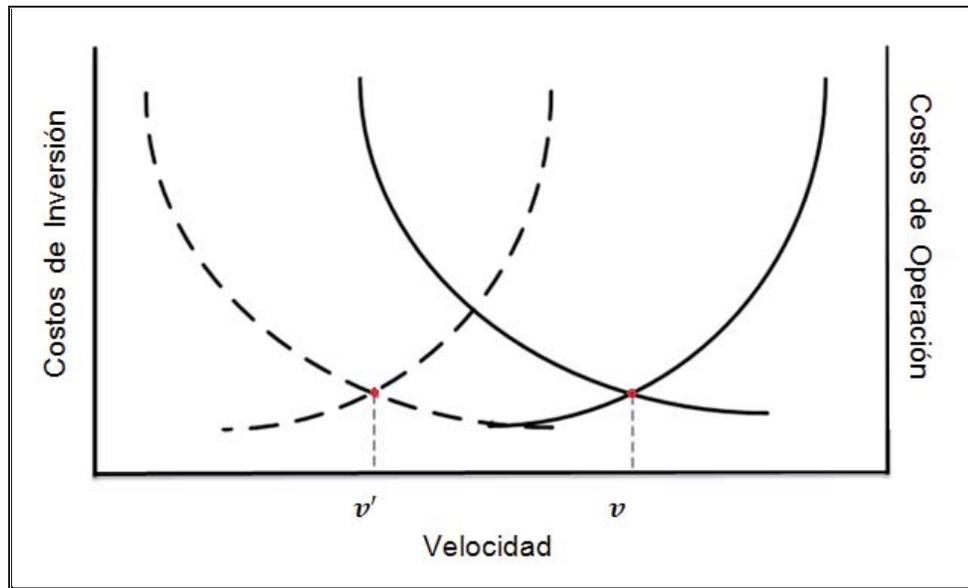
**Tabla 45: Resumen de velocidades óptimas obtenidas, condiciones de proceso C**

Condiciones de procesos C

	Chile	OCDE	EEUU	Unidades
Velocidad Recomendada	4,2	4,1	3,9	[Pie/s]
Velocidad fuera de rango recomendado	1,9	2,5	2,1	[Pie/s]

**Tabla 46: Resumen de velocidades óptimas obtenidas, condiciones de proceso C**

Como se puede apreciar en la Tablas, las velocidades fuera de rango obtenidas en los tres sectores analizados, Chile, Países de la OCDE y EEUU, fluctúan en un valor de 2 [Pie/s], esto indica que para obtener un óptimo resultado entre los Costos de Inversión vs Costos de Operación la velocidad del fluido que circula por los tubos debe disminuir con respecto a los parámetros recomendados, los cuales están en el rango de 3 – 9 [Pie/s]. Este hallazgo indica que la curva de costos se ve desplazada hacia la izquierda como muestra la figura N°50.



**Figura N° 50: Comparación de curva de costos**

En la Figura N°50 se puede apreciar el desplazamiento de la curva hacia la izquierda, donde  $v'$  corresponde a la velocidad óptima obtenida con datos fuera del rango recomendado.

## 6.2 Intercambiadores de Placas

Para los intercambiadores de placas diseñados, se realizó de acuerdo a las velocidades obtenidas en condiciones normales de proceso, se utilizaron placas ya diseñadas de las cuales se puede deducir la velocidad con que fluirán las corrientes.

	Chile	OCDE	EEUU	Unidades
Velocidad Obtenida	0,34	0,35	0,35	[m/s]

**Tabla 47: Resumen de velocidad obtenida, condiciones de proceso, planta de Ácido**

Se puede apreciar que la velocidad óptima de diseño obtenida fluctúa alrededor de los 0,35 [m/s], esto al compararlo con los parámetros recomendados, está por debajo del rango, 1 – 3 [m/s]

## Conclusión

Se definió la interrogante de actualizar los parámetros de diseño de intercambiadores de calor, parámetros que fueron establecidos en el momento en el cual la energía no jugaba un rol tan importante como lo es ahora. Estos parámetros fueron obtenidos por la propia experiencia donde el costo de Inversión era el protagonista, debido a los grandes costos y poca variedad de los materiales de construcción.

Se determinó que las variables a actualizar serían la velocidad y las caídas de presión respectivas.

Para el caso de los intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa se realizó el diseño de los equipos en base a condiciones de proceso obtenidas de trabajos anteriores, el procedimiento para el diseño de los intercambiadores fue el siguiente:

- Primero se procedió a realizar los diseños con los parámetros recomendados de velocidad.

Se realizaron 3 partidas de diseño de equipos de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

En este primer punto se pudo concluir que las variables analizadas se comportan de manera similar independiente del lugar en el cual se realiza en análisis: en Chile por ejemplo la velocidad óptima obtenida para los líquidos es de 7,8 [Pie/s] mientras que en los países pertenecientes a la OCDE la velocidad que se obtuvo es de 5,9 [Pie/s] y en el caso de EEUU los resultados obtenidos fueron de 7,8 [Pie/s] todo esto se analizó con respecto a los mismos costos de Inversión , solo variando los costos energéticos de cada sector.

Para la segunda muestra a analizar se obtuvo el siguiente resultado. La velocidad óptima de diseño para Chile fue de 3,3 [Pie/s], para los países de la OCDE fue de 3,5 [Pie/s] y para EEUU fue de 3,6 [Pie/s]

En el caso de la tercera muestra de datos se obtuvo lo siguiente: velocidad óptima de diseño para Chile fue de 4,2 [Pie/s], para los países de la OCDE fue de 4,1 [Pie/s] y para el caso de EEUU 3,9 [Pie/s]

- Segundo se realizó el diseño de los equipos en base a parámetros fuera de los rangos recomendados.

De manera homóloga a lo anterior se analizaron 3 condiciones de proceso, de las cuales se obtuvo lo siguiente:

Para el primer caso se realizó el diseño de los equipos en base a parámetros fuera del rango recomendado, obteniéndose como resultado una velocidad óptima de diseño para Chile de 2,7 [Pie/s] para los países de la OCDE 2,5 [Pie/s] y para el caso de EEUU es de 2,4 [Pie/s]

Para el segundo caso, la velocidad óptima de diseño para Chile fue de 2,1 [Pie/s], para países de la OCDE 2,1 [Pie/s] y para EEUU 2,2 [Pie/s].

Para el tercer caso, la velocidad óptima de diseño para Chile fue de 1,9 [Pie/s], para países de la OCDE 2,5 [Pie/s] y para EEUU 2,1 [Pie/s].

Al analizar los resultados se puede ver que las velocidades fuera de los rangos recomendados, se encuentran dentro de valores muy similares, todas las velocidades fluctúan alrededor de los 2 [Pie/s].

A modo de conclusión general para el diseño de los Intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa, se puede decir que es recomendable disminuir la velocidad de transporte de fluidos, esto quiere decir que el tamaño del equipo debe ser mayor lo que implica un mayor costo de inversión, pero repercute en un menor costo de operación, ya que al disminuir la velocidad de transporte de los fluidos, los costos por bombeo se hacen menores. Esto hace que la relación Costos de Operación vs Costos de Inversión se comporte de manera que el punto óptimo de velocidad disminuya con respecto a la relación de Costos de Operación vs Costos de Inversión obtenida con parámetros recomendados.

Con los resultados obtenidos para los Intercambiadores de Placas se puede concluir que debido a que las placas tienen un diseño predeterminado, y que la transferencia de calor es más efectiva que en los intercambiadores de Tubos y Carcasas, la velocidad óptima recomendada para el transporte de fluidos es del orden de 0,35 [m/s], con ésta velocidad se obtiene una transferencia de calor ideal entre las corrientes.

De manera global, se concluye, con los resultados obtenidos, que para obtener una óptima relación de Costos de Inversión vs Costos de Operación, la velocidad de diseño se debe disminuir.

A consecuencia de esto se actualiza el paradigma de los parámetros establecidos en la década de los 40.

## Bibliografía

1. Cunningham, R; Historia de la Energía. Revista Petrotecnia. Argentina. 2003
2. Burquin, J; Energía: Técnica, económica y sociedad. Ediciones S.L. 2000
3. International Energy Agency: Key World Energy Stats. 2011
4. Balance Nacional de Energía 2011. Ministerio de Energía. [www.minenergia.cl](http://www.minenergia.cl)
5. Kern, D; Procesos de transferencia de calor. Ed. McGraw Hill Book company. 1999.
6. Perry R: Manual del Ingeniero Químico. 6<sup>rd</sup> Ed. Ed. McGraw Hill Book company.
7. Sinnott R, Towler G: Chemical engineering Design. Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. ED Elsevier inc. 2008.
8. Branan, C; Rules of Thumb for Chemical Engineers. 3<sup>rd</sup> Ed. Gulf Publishing Company.
9. Torres, J: Apuntes de Transferencia de calor.
10. Vega, Luis: Apuntes de Ingeniería Económica.
11. Peters, Max. Timmerhaus, Klaus: Plant design and economics for Chemical Engineers. 4<sup>rd</sup> Ed. Ed McGraw- Hill.
12. Haslego C, Polley G: Designing Plate and Frame Heat Exchangers. Part I.
13. Alfa Laval: Heat Exchangers Guide 4rd Ed.
14. Riquelme Sandoval, J; Rogel Alcapia, A: Factibilidad técnico-económica para la instalación de una planta de Oxígeno, 2007.
15. Rebolledo Navarro, M: Estudio de pre factibilidad técnico y económica de una planta de Amoniaco, 2008.
16. Sartori Estévez, V: Recuperación de Energía en proceso de producción de Ácido Sulfúrico, 2012.
17. García Hernández J.M; Ponce Ortega J.M; Serna González M. : Síntesis rigurosa de redes de Intercambiadores de calor usando método híbrido, 2007.

# ANEXO I

## Datos generales de consumos energéticos

<b>World</b>									
<b>1973</b>									
(Mtoe)									
SUPPLY AND CONSUMPTION	Coal/peat	Crude oil	Oil products	Natural gas	Nuclear	Hydro	Biofuels and waste <sup>(a)</sup>	Other <sup>(b)</sup>	Total
Production	1 477.06	2 938.38	-	993.10	53.05	110.19	643.78	6.13	6 221.69
Imports	140.01	1 561.28	407.65	73.40	-	-	0.12	8.14	2 190.61
Exports	-129.98	-1 612.99	-442.73	-72.56	-	-	-0.19	-8.27	-2 266.72
Stock changes	12.30	-19.68	-16.40	-15.09	-	-	0.06	-	-38.82
<b>TYPES</b>	<b>1 499.40</b>	<b>2 866.99</b>	<b>-51.49</b>	<b>978.85</b>	<b>53.05</b>	<b>110.19</b>	<b>643.76</b>	<b>6.00</b>	<b>6 106.76</b>
Transfers	-	-46.76	48.78	-	-	-	-	-	2.02
Statistical diff.	8.61	12.00	-6.77	4.78	-	-	-0.17	-0.03	18.43
Electricity plants	-559.66	-22.91	-318.28	-160.52	-52.95	-110.19	-2.61	502.64	-724.47
CHP plants	-86.32	-	-28.26	-50.84	-0.10	-	-0.75	100.70	-65.57
Heat plants	-7.81	-	-0.90	-0.68	-	-	-0.80	7.11	-3.08
Blast furnaces	-81.68	-	-2.72	-	-	-	-0.06	-	-84.45
Gas works	9.87	-0.60	-9.07	-6.21	-	-	-	-	-6.01
Coke ovens <sup>(c)</sup>	-98.10	-	-0.68	-0.19	-	-	-0.02	-	-98.99
Oil refineries	-	-2 782.24	2 761.32	-	-	-	-	-	-20.92
Petchem. plants	-	5.09	-5.37	-	-	-	-	-	-0.28
Liquefaction plants	-0.73	0.23	-	-	-	-	-	-	-0.50
Other transf.	-	-	-0.12	-0.03	-	-	-23.74	-	-23.89
Energy ind. own use	-35.06	-2.59	-158.81	-106.83	-	-	-0.20	-57.68	-361.16
Losses	-8.86	-7.07	-0.27	-6.03	-	-	-0.25	-43.14	-65.62
<b>TFC</b>	<b>639.67</b>	<b>22.15</b>	<b>2 227.36</b>	<b>652.29</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>615.18</b>	<b>515.61</b>	<b>4 672.26</b>
Industry	362.08	16.42	431.56	356.95	-	-	91.51	286.35	1 544.86
Transport <sup>(d)</sup>	32.93	-	1 019.05	17.72	-	-	0.24	10.60	1 080.54
Other	238.65	0.00	520.70	259.26	-	-	523.42	218.67	1 760.70
Non-energy use	6.01	5.73	256.05	18.37	-	-	-	-	286.16

(a) Biofuels and waste final consumption has been estimated.  
 (b) Other includes geothermal, solar, wind, electricity and heat, etc.  
 (c) Also includes patent fuel and BKB plants.  
 (d) Includes international aviation and international marine bunkers.

**Figura N° 1: Consumo mundial de energía año 1973**

<b>World</b>									
<b>2010</b>									
(Mtoe)									
<b>SUPPLY AND CONSUMPTION</b>	<b>Coal/ peat</b>	<b>Crude oil</b>	<b>Oil products</b>	<b>Natural gas</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Hydro</b>	<b>Biofuels and waste</b>	<b>Other<sup>(a)</sup></b>	<b>Total</b>
Production	3 596.04	4 069.38	-	2 719.10	718.96	295.62	1 277.08	113.07	12 789.25
Imports	640.82	2 295.06	1 053.71	817.02	-	-	10.78	51.38	4 868.77
Exports	-681.28	-2 211.55	-1 111.80	-826.35	-	-	-9.29	-50.74	-4 891.01
Stock changes	-79.80	6.49	6.16	17.84	-	-	-0.54	-	-49.86
<b>TPES</b>	<b>3 475.77</b>	<b>4 159.37</b>	<b>-51.93</b>	<b>2 727.61</b>	<b>718.96</b>	<b>295.62</b>	<b>1 278.03</b>	<b>113.71</b>	<b>12 717.16</b>
Transfers	0.00	-156.64	179.33	-	-	-	-	-	22.69
Statistical diff.	-49.50	11.30	-27.05	-1.68	-	-	-0.40	0.19	-67.14
Electricity plants	-1 974.84	-34.63	-201.57	-705.47	-715.67	-295.62	-63.40	1 582.73	-2 408.47
CHP plants	-161.19	-0.01	-22.50	-304.76	-3.13	-	-35.21	321.34	-205.45
Heat plants	-103.61	-0.81	-12.92	-90.14	-0.15	-	-10.42	188.67	-29.38
Blast furnaces	-168.50	-	-0.79	-0.11	-	-	-	-	-169.40
Gas works	-8.80	-	-3.53	2.81	-	-	-0.02	-	-9.54
Coke ovens <sup>(b)</sup>	-51.08	-	-2.40	-0.00	-	-	-0.01	-	-53.49
Oil refineries	-	-3 964.42	3 921.30	-0.80	-	-	-	-	-43.92
Petchem. plants	-	30.51	-31.35	-	-	-	-	-	-0.84
Liquefaction plants	-16.20	7.85	-	-7.10	-	-	-	-	-15.45
Other transf.	0.01	0.13	-0.17	-2.22	-	-	-53.14	-0.39	-55.77
Energy ind. own use	-86.22	-10.10	-210.37	-275.36	-	-	-13.27	-196.78	-792.10
Losses	-2.70	-8.23	-0.58	-24.63	-	-	-0.15	-175.98	-212.27
<b>TFC</b>	<b>853.14</b>	<b>34.34</b>	<b>3 535.48</b>	<b>1 318.16</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1 102.01</b>	<b>1 833.49</b>	<b>8 676.63</b>
Industry	677.86	12.51	310.02	463.87	-	-	195.83	762.85	2 422.94
Transport <sup>(c)</sup>	3.36	0.04	2 195.89	89.06	-	-	57.56	23.91	2 369.81
Other	135.96	6.75	435.64	612.83	-	-	848.62	1 046.73	3 086.53
Non-energy use	35.97	15.05	593.93	152.40	-	-	-	-	797.35

(a) Other includes geothermal, solar, wind, electricity and heat, etc.  
(b) Also includes patent fuel and BKB plants.  
(c) Includes international aviation and international marine bunkers.

Figura N° 2: Consumo mundial de energía año 2010

# OECD

1973

(Mtoe)

SUPPLY AND CONSUMPTION	Coal/ peat	Crude oil	Oil products	Natural gas	Nuclear	Hydro	Biofuels and waste	Other <sup>(1)</sup>	Total
Production	819.25	710.51	-	706.22	49.22	78.94	87.29	6.13	2 457.55
Imports	121.92	1 277.47	336.20	62.55	-	-	0.03	7.55	1 805.73
Exports	-111.10	63.58	-172.72	-50.38	-	-	-0.01	-7.01	-404.80
Int. marine bunkers	-	-	-73.65	-	-	-	-	-	-73.65
Int. aviation bunkers	-	-	-24.64	-	-	-	-	-	-24.64
Stock changes	14.52	-10.78	-11.36	-12.07	-	-	0.06	-	-19.64
<b>TPES</b>	<b>844.60</b>	<b>1 913.62</b>	<b>53.83</b>	<b>706.32</b>	<b>49.22</b>	<b>78.94</b>	<b>87.36</b>	<b>6.66</b>	<b>3 740.55</b>
Transfers	-	-41.28	42.49	-	-	-	-	-	1.22
Statistical diff.	14.82	11.29	2.56	-5.61	-	-	-0.00	0.00	23.06
Electricity plants	-387.69	-20.61	-228.38	-108.33	-49.12	-78.94	-1.43	364.70	-509.81
CHP plants	-52.07	-	-7.89	-11.64	-0.10	-	-0.75	30.94	-41.51
Heat plants	-7.81	-	-0.90	-0.68	-	-	-0.80	7.11	-3.08
Blast furnaces	-65.64	-	-2.72	-	-	-	-	-	-68.36
Gas works	11.02	-0.60	-8.72	-6.37	-	-	-	-	-4.68
Coke ovens <sup>(2)</sup>	-25.71	-	-0.68	-0.19	-	-	-0.02	-	-26.60
Oil refineries	-	-1 865.94	1 868.42	-	-	-	-	-	2.48
Petchem. plants	-	4.88	-5.16	-	-	-	-	-	-0.28
Liquefaction plants	-	0.02	-	-	-	-	-	-	0.02
Other transf.	-	-	-0.12	-0.03	-	-	-	-	-0.15
Energy ind. own use	-24.53	-0.99	-128.88	-72.36	-	-	-0.07	-33.38	-260.20
Losses	-3.80	-	-0.23	-2.63	-	-	-	-30.54	-37.20
<b>TFC</b>	<b>303.19</b>	<b>0.39</b>	<b>1 583.63</b>	<b>498.48</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>84.30</b>	<b>345.49</b>	<b>2 815.48</b>
Industry	182.69	0.39	312.91	250.44	-	-	42.26	169.41	958.08
Transport	7.34	-	665.68	17.00	-	-	0.00	5.30	695.32
Other	110.07	-	393.09	225.47	-	-	42.04	170.78	941.45
Non-energy use	3.10	-	211.95	5.58	-	-	-	-	220.63

Figura N° 3: Consumo de energía países de la OCDE año 1973

# OECD

## 2010

(Mtoe)

SUPPLY AND CONSUMPTION	Coal/peat	Crude oil	Oil products	Natural gas	Nuclear	Hydro	Biofuels and waste	Other <sup>(a)</sup>	Total
Production	984.22	894.85	-	965.11	596.49	116.21	258.50	63.83	3 879.21
Imports	369.05	1 536.81	563.98	636.80	-	-	10.12	33.19	3 149.95
Exports	-285.96	-354.29	-501.46	-299.24	-	-	-5.18	-32.25	-1 478.38
Intl. marine bunkers	-	-	-90.21	-	-	-	-	-	-90.21
Intl. aviation bunkers	-	-	-85.88	-	-	-	-	-	-85.88
Stock changes	19.06	-3.63	1.29	14.30	-	-	0.16	-	31.17
<b>TPES</b>	<b>1 086.37</b>	<b>2 073.74</b>	<b>-112.28</b>	<b>1 316.96</b>	<b>596.49</b>	<b>116.21</b>	<b>263.60</b>	<b>64.77</b>	<b>5 405.87</b>
Transfers	-	-49.66	63.27	-	-	-	-	-	13.61
Statistical diff.	-8.20	-5.59	-6.55	1.43	-	-	-0.03	-0.19	-19.14
Electricity plants	-785.14	-4.13	-50.42	-349.41	-593.73	-116.21	-43.97	787.54	-1 155.47
CHP plants	-85.22	-	-15.40	-112.85	-2.76	-	-32.56	152.09	-96.70
Heat plants	-5.14	-	-1.46	-8.35	-	-	-5.79	16.34	-4.40
Blast furnaces	-49.07	-	-0.79	-0.11	-	-	-	-	-49.97
Gas works	-2.04	-	-2.99	3.47	-	-	-0.02	-	-1.59
Coke ovens <sup>(b)</sup>	-7.76	-	-1.19	-0.00	-	-	-0.00	-	-8.95
Oil refineries	-	-2 033.89	2 030.82	-0.80	-	-	-	-	-3.87
Petchem. plants	-	26.84	-27.33	-	-	-	-	-	-0.49
Liquefaction plants	-0.79	1.30	-	-1.93	-	-	-	-	-1.43
Other transf.	0.02	0.13	-0.08	-0.49	-	-	-0.30	-0.39	-1.12
Energy ind. own use	-14.09	-0.10	-117.47	-107.12	-	-	-0.26	-76.89	-315.93
Losses	-0.94	-	-0.01	-3.84	-	-	-0.03	-64.48	-69.31
<b>TFC</b>	<b>128.00</b>	<b>8.65</b>	<b>1 758.12</b>	<b>736.95</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>180.62</b>	<b>878.77</b>	<b>3 691.11</b>
Industry	102.11	2.21	113.47	255.25	-	-	72.09	283.67	828.80
Transport	0.14	0.03	1 107.23	22.67	-	-	40.28	9.33	1 179.69
Other	23.57	0.73	210.10	429.06	-	-	68.25	585.77	1 317.48
Non-energy use	2.19	5.67	327.31	29.97	-	-	-	-	365.14

(a) Other includes geothermal, solar, wind, electricity and heat, etc.

(b) Also includes patent fuel and BKB plants.

**Figura N° 4: Consumo de energía países de la OCDE año 2010**

<b>Balance Nacional de Energía</b>		<b>2010</b>
<b>Consumo Sectorial Industrial y Minero</b>		
<b>ENERGETICO</b>	<b>TOTAL</b>	
<b>TOTAL DERIVADOS</b>	<b>34.640</b>	
PETROLEO COMBUSTIBLE	6.490	
DIESEL	21.903	
KEROSENE	529	
GAS LICUADO	3.466	
NAFTA	0	
GAS REFINERIA	2.232	
KEROSENE AVIACION	0	
GASOLINA MOTOR (*)	21	
<b>ELECTRICIDAD</b>	<b>30.928</b>	
<b>CARBON (**)</b>	<b>2.501</b>	
<b>COKE</b>	<b>2.708</b>	
<b>ALQUITRAN (***)</b>	<b>0</b>	
<b>GAS CORRIENTE</b>	<b>356</b>	
<b>GAS ALTO HORNO</b>	<b>76</b>	
<b>GAS NATURAL (**)</b>	<b>12.146</b>	
<b>METANOL</b>	<b>0</b>	
<b>LEÑA</b>	<b>14.002</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>97.356</b>	

(\*) Se incluyen las Gasolinas 93, 95 y 97

(\*\*) Las Importaciones-Exportaciones se consideran en etapa de energético primario

(\*\*\*) Alquitrán de uso energético (Producido en siderurgia)

Nota 1: El factor de conversión utilizado para la hidroelectricidad corresponde al utilizado en metodología internacional de generación de balances equivalente a 860 Kcal/Kwh

Fuente: Encuestas a empresas del sector energía e industrias intensivas en consumo energético

Elaboración: Ministerio de Energía, Diciembre 2011

# ANEXO II

## Gráficas y Tablas de datos para Diseño de Equipos

### Tubos y carcasa

	Tipos de fluidos	Velocidad (pie/s)	
<b>Tubos</b>	<b>Líquidos</b>	3 - 9	
<b>Carcasa</b>	<b>Líquidos</b>	1 - 3	
	<b>Vapores Alto PM</b>	<b>Presión de vacío</b>	160- 230
		<b>Presión Atmosférica</b>	32 - 100
		<b>Alta Presión</b>	32 - 100

Tabla N°1: Velocidades recomendadas para fluidos.

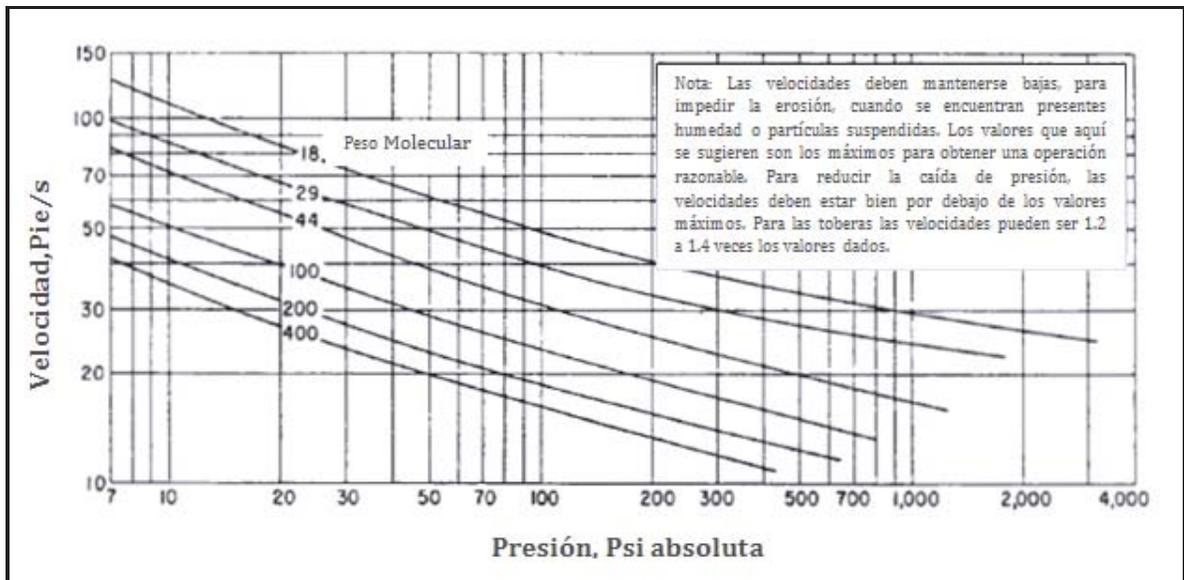


Figura N° 1: Velocidad máxima para los gases y vapores a través de los Intercambiadores de calor, del lado de carcasa.

<b>Enfriadores</b>		
<b>Fluido caliente</b>	<b>Fluido frío</b>	<b>U<sub>D</sub> total (Btu/h pie °F)</b>
Agua	Agua	250-500
Methanol	Agua	250-500
Amoniaco	Agua	250-500
Soluciones acuosas	Agua	250-500
Sustancias orgánicas Ligeras <sup>1</sup>	Agua	75-150
Sustancias orgánicas Medias <sup>2</sup>	Agua	50-125
Sustancias orgánicas Pesadas <sup>3</sup>	Agua	5-75
Gases	Agua	2-75
Agua	Salmuera	100-200
Sustancias orgánicas Ligeras	Salmuera	40-100

<sup>1</sup> Las sustancias orgánicas Ligeras son fluidos con viscosidades menores de 0,5 cp.

<sup>2</sup> las sustancias orgánicas Medias son fluidos con viscosidades de 0,5-1,0 cp.

<sup>3</sup>Las sustancias orgánicas Pesadas son fluidos con viscosidades mayores a 1,0 cp.

<b>Calentadores</b>			
<b>Fluido caliente</b>	<b>Fluido frío</b>		<b>U<sub>D</sub> total (Btu/h pie °F)</b>
Vapor de agua	Agua		200-700
Vapor de agua	Metanol		200-700
Vapor de agua	Amoniaco		200-700
Vapor de agua	Soluciones acuosas:	Menos de 2.0 cp	200-700
		Mas de 2.0 cp.	100-500
Vapor de agua	Sustancias orgánicas Ligeras		50-100
Vapor de agua	Sustancias orgánicas Medias		100-200
Vapor de agua	Sustancias orgánicas Pesadas		6-60
Vapor de agua	Gases		5-50

Intercambiadores de Tubos y Carcasa		
Fluido Caliente	Fluido Frio	$U_D$ total (Btu/h pie °F)
Agua	Agua	250-500 <sup>1</sup>
Soluciones acuosas	Soluciones acuosas	250-500 <sup>1</sup>
Sustancias orgánicas Ligeras	Sustancias orgánicas Ligeras	40-75
Sustancias orgánicas Medias	Sustancias orgánicas Medias	20-60
Sustancias orgánicas Pesadas	Sustancias orgánicas Pesadas	10-40
Sustancias orgánicas Pesadas	Sustancias orgánicas Ligeras	30-60
Sustancias orgánicas Ligeras	Sustancias orgánicas Pesadas	10-40

Tabla N° 2: Valores aproximados de coeficientes globales de transferencia de calor para diseño. Incluyen factor de obstrucción de 0,003 y Caída de presión de 5-10 Psi en corriente controlante. <sup>1</sup> Incluyen factor de obstrucción de 0,001.

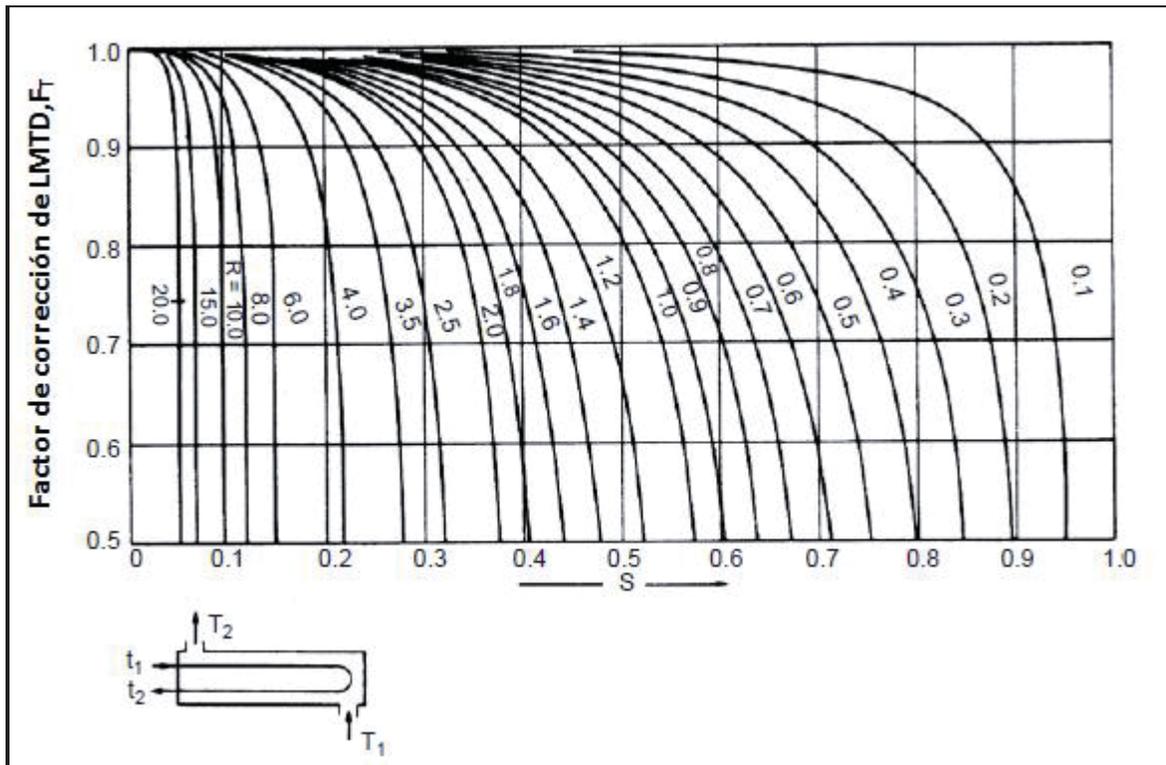


Figura N° 2: Gráfica de factor de corrección de LMTD, para Intercambiador tipo 1-2

Tubo DE, plg	BWG	Espesor de la pared,	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg <sup>2</sup>	Superficie por pie lin. pies <sup>2</sup>		Peso por pie lineal, lb, de acero
					Exterior	Interior	
½	12	0.109	0.282	0.0625	0.1309	0.0748	0.493
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145		0.1125	0.190
¾	10	0.134	0.482	0.182	0.1963	0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.560	0.247		0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1529	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314		0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
1	8	0.165	0.670	0.355	0.2618	0.1754	1.61
	9	0.148	0.704	0.389		0.1843	1.47
	10	0.134	0.732	0.421		0.1916	1.36
	11	0.120	0.760	0.455		0.1990	1.23
	12	0.109	0.782	0.479		0.2048	1.14
	13	0.095	0.810	0.515		0.2121	1.00
	14	0.083	0.834	0.546		0.2183	0.890
	15	0.072	0.856	0.576		0.2241	0.781
	16	0.065	0.870	0.594		0.2277	0.710
17	0.058	0.884	0.613	0.2314	0.639		
18	0.049	0.902	0.639	0.2361	0.545		
1¼	8	0.165	0.920	0.665	0.3271	0.2409	2.09
	9	0.148	0.954	0.714		0.2498	1.91
	10	0.134	0.982	0.757		0.2572	1.75
	11	0.120	1.01	0.800		0.2644	1.58
	12	0.109	1.03	0.836		0.2701	1.45
	13	0.095	1.06	0.884		0.2775	1.28
	14	0.083	1.08	0.923		0.2839	1.13
	15	0.072	1.11	0.960		0.2896	0.991
	16	0.065	1.12	0.985		0.2932	0.900
17	0.058	1.13	1.01	0.2969	0.808		
18	0.049	1.15	1.04	0.3015	0.688		
1½	8	0.165	1.17	1.075	0.3925	0.3063	2.57
	9	0.148	1.20	1.14		0.3152	2.34
	10	0.134	1.23	1.19		0.3225	2.14
	11	0.120	1.26	1.25		0.3299	1.98
	12	0.109	1.28	1.29		0.3356	1.77
	13	0.095	1.31	1.35		0.3430	1.56
	14	0.083	1.33	1.40		0.3492	1.37
	15	0.072	1.36	1.44		0.3555	1.20
	16	0.065	1.37	1.47		0.3587	1.09
17	0.058	1.38	1.50	0.3623	0.978		
18	0.049	1.40	1.54	0.3670	0.831		

Tabla N° 3: Datos de tubos para Condensadores e Intercambiadores de calor.

Tubos de $\frac{3}{4}$ " DE, arreglo en cuadro de 1 plg						Tubos de 1" DE, arreglo en cuadro de $\frac{1}{4}$ plg					
Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P	Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
8	32	26	20	20		8	21	16	14		
10	52	52	40	36		10	32	32	26	24	
12	81	76	68	68	60	12	48	45	40	38	36
13 $\frac{1}{4}$	97	90	82	76	70	13 $\frac{1}{4}$	61	56	52	48	44
15 $\frac{1}{4}$	137	124	116	108	108	15 $\frac{1}{4}$	81	76	68	68	64
17 $\frac{1}{4}$	177	166	158	150	142	17 $\frac{1}{4}$	112	112	96	90	82
19 $\frac{1}{4}$	224	220	204	192	188	19 $\frac{1}{4}$	138	132	128	122	116
21 $\frac{1}{4}$	277	270	246	240	234	21 $\frac{1}{4}$	177	166	158	152	148
23 $\frac{1}{4}$	341	324	308	302	292	23 $\frac{1}{4}$	213	208	192	184	184
25	413	394	370	356	346	25	260	252	238	226	222
27	481	460	432	420	408	27	300	288	278	268	260
29	553	526	480	468	456	29	341	326	300	294	286
31	657	640	600	580	560	31	406	398	380	368	358
33	749	718	688	676	648	33	465	460	432	420	414
35	845	824	780	766	748	35	522	518	488	484	472
37	934	914	886	866	838	37	596	574	562	544	532
39	1049	1024	982	968	948	39	665	644	624	612	600
Tubos de $1\frac{1}{4}$ " DE, arreglo en cuadro de $\frac{1}{16}$ plg						Tubos de $1\frac{1}{2}$ " DE, arreglo en cuadro de $\frac{1}{8}$ plg					
10	16	12	10			12	16	16	12	12	
12	30	24	22	16	16	13 $\frac{1}{4}$	22	22	16	16	
13 $\frac{1}{4}$	32	30	30	22	22	15 $\frac{1}{4}$	29	29	25	24	22
15 $\frac{1}{4}$	44	40	37	35	31	17 $\frac{1}{4}$	39	39	34	32	29
17 $\frac{1}{4}$	56	53	51	48	44	19 $\frac{1}{4}$	50	48	45	43	39
19 $\frac{1}{4}$	78	73	71	64	56	21 $\frac{1}{4}$	62	60	57	54	50
21 $\frac{1}{4}$	96	90	86	82	78	23 $\frac{1}{4}$	78	74	70	66	62
23 $\frac{1}{4}$	127	112	106	102	96	25	94	90	86	84	78
25	140	135	127	123	115	27	112	108	102	98	94
27	166	160	151	146	140	29	131	127	120	116	112
29	193	188	178	174	166	31	151	146	141	138	131
31	226	220	209	202	193	33	176	170	164	160	151
33	258	252	244	238	226	35	202	196	188	182	176
35	293	287	275	268	258	37	224	220	217	210	202
37	334	322	311	304	293	39	252	246	237	230	224
39	370	362	348	342	336						

Tabla N° 4: Disposición de los espejos de tubos (Cuenta de tubos). Arreglo cuadrado.

Tubos de 3/4" DE, arreglo triangular de 15/16 plg						Tubos de 3/4" DE, arreglo triangular de 1 plg					
Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P	Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
8	36	32	26	24	18	8	37	30	24	24	
10	69	58	47	42	36	10	61	52	40	36	
12	109	98	86	82	78	12	92	82	76	74	70
13 1/4	127	114	96	90	86	13 1/4	109	106	86	82	74
15 1/4	170	160	140	136	128	15 1/4	151	138	122	118	110
17 1/4	239	224	194	188	178	17 1/4	203	196	178	172	166
19 1/4	301	282	252	244	234	19 1/4	262	250	226	218	210
21 1/4	361	342	314	306	290	21 1/4	316	302	278	272	260
23 1/4	442	420	386	378	364	23 1/4	384	376	352	342	328
25	532	506	468	446	434	25	470	452	422	394	382
27	637	602	550	536	524	27	559	534	488	474	464
29	721	692	640	620	594	29	630	604	556	538	508
31	847	822	766	722	720	31	745	728	678	666	640
33	974	938	878	852	826	33	856	830	774	760	732
35	1102	1068	1004	988	958	35	970	938	882	864	848
37	1240	1200	1144	1104	1072	37	1074	1044	1012	986	870
39	1377	1330	1258	1248	1212	39	1206	1176	1128	1100	1078
Tubos de 1" DE, arreglo triangular de 1 1/4 plg						Tubos de 1 1/4" DE, arreglo triangular de 1 5/8" plg					
8	21	16	16	14		10	20	18	14		
10	32	32	26	24		12	32	30	26	22	20
12	55	52	48	46	44	13 1/4	38	36	32	28	26
13 1/4	68	66	68	64	60	15 1/4	54	51	45	42	38
15 1/4	91	86	80	74	72	17 1/4	69	66	62	58	54
17 1/4	131	118	106	104	94	19 1/4	95	91	86	78	69
19 1/4	163	152	140	136	128	21 1/4	117	112	105	101	95
21 1/4	199	188	170	164	160	23 1/4	140	136	130	123	117
23 1/4	241	232	212	212	202	25	170	164	155	150	140
25	294	282	256	252	242	27	202	196	185	179	170
27	349	334	302	296	286	29	235	228	217	212	202
29	397	376	338	334	316	31	275	270	255	245	235
31	472	454	430	424	400	33	315	305	297	288	275
33	538	522	486	470	454	35	357	348	335	327	315
35	608	592	562	546	532	37	407	390	380	374	357
37	674	664	632	614	598	39	449	436	425	419	407
39	766	736	700	688	672						
Tubos de 1 1/2" DE, arreglo triangular de 1 7/8 plg											
12	18	14	14	12	12						
13 1/4	27	22	18	16	14						
15 1/4	36	34	32	30	27						
17 1/4	48	44	42	38	36						
19 1/4	61	58	55	51	48						
21 1/4	76	72	70	66	61						
23 1/4	95	91	86	80	76						
25	115	110	105	98	95						
27	136	131	125	118	115						
29	160	154	147	141	136						
31	184	177	172	165	160						
33	215	206	200	190	184						
35	246	238	230	220	215						
37	275	268	260	252	246						
39	307	299	290	284	275						

Tabla N° 5: Disposición de los espejos de tubos (Cuenta de tubos). Arreglo Triangular.

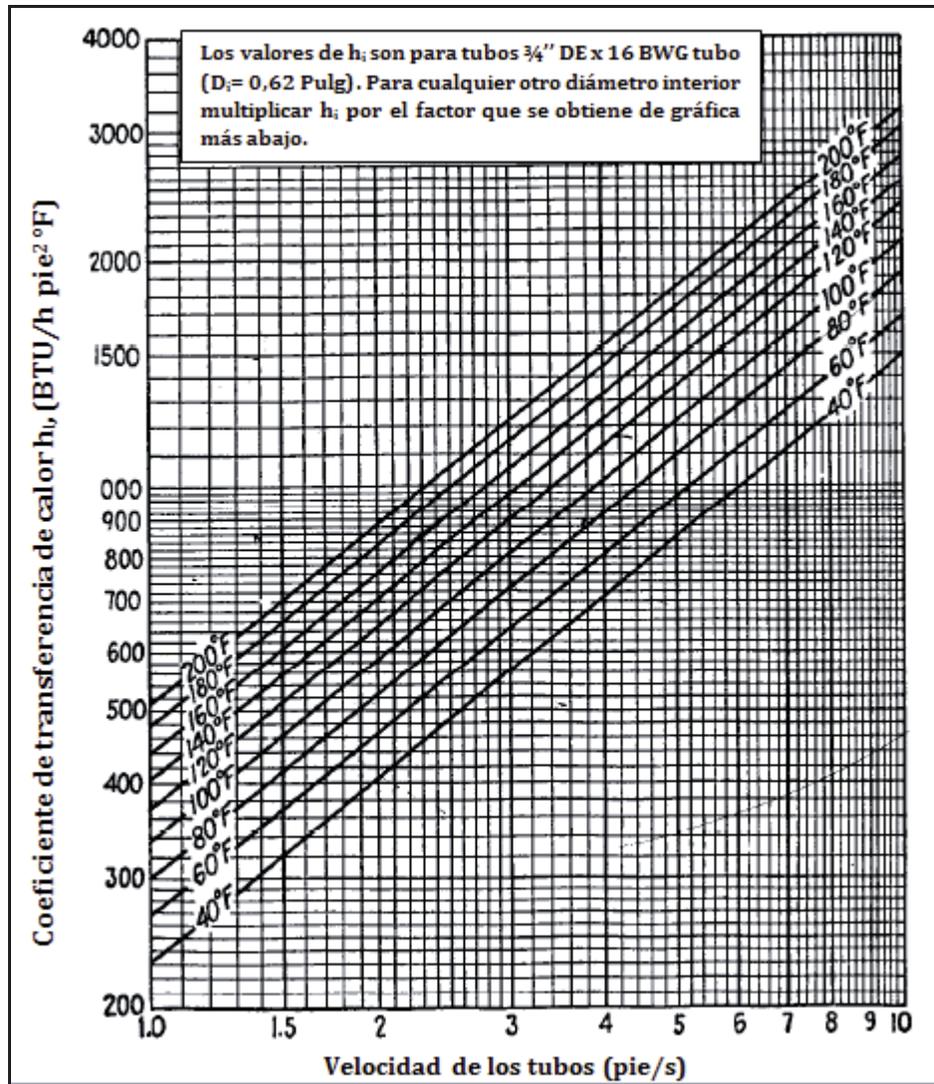


Figura N° 3: Curva de transferencia de calor, agua en los tubos.

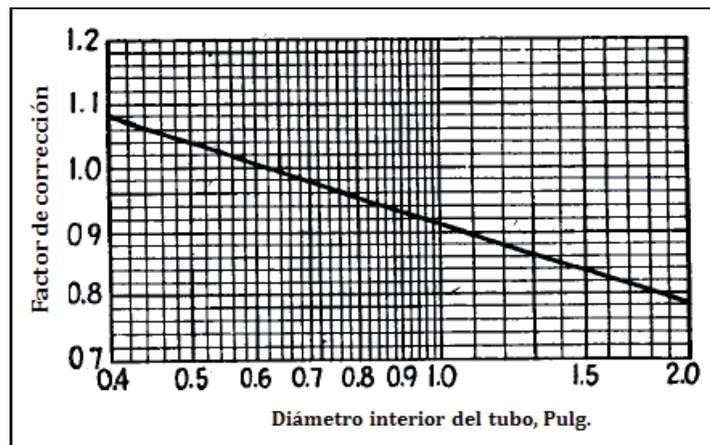


Figura N° 4: Gráfica de factor de corrección de  $h_i$

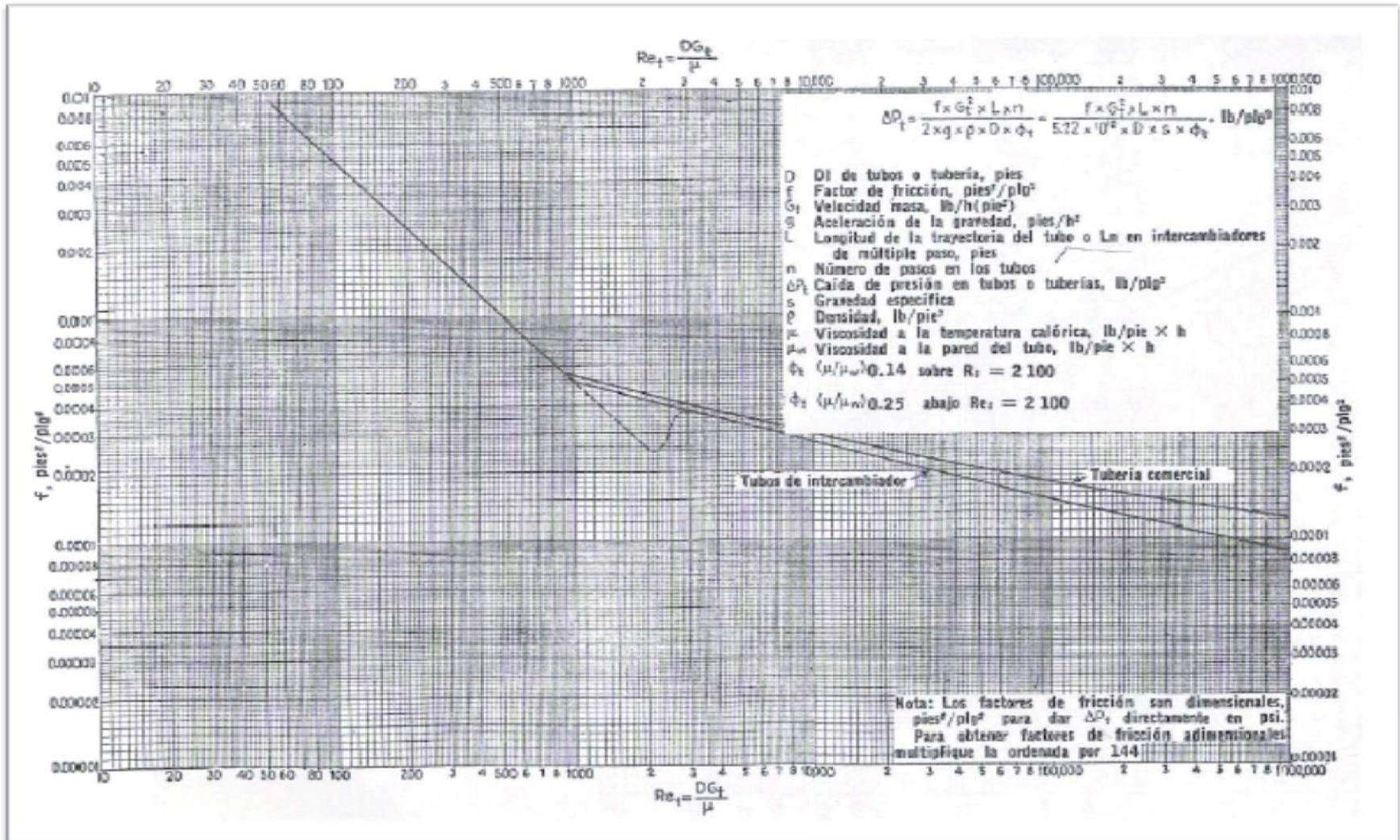


Figura N° 5: Gráfica de factor de fricción, para lado tubo.

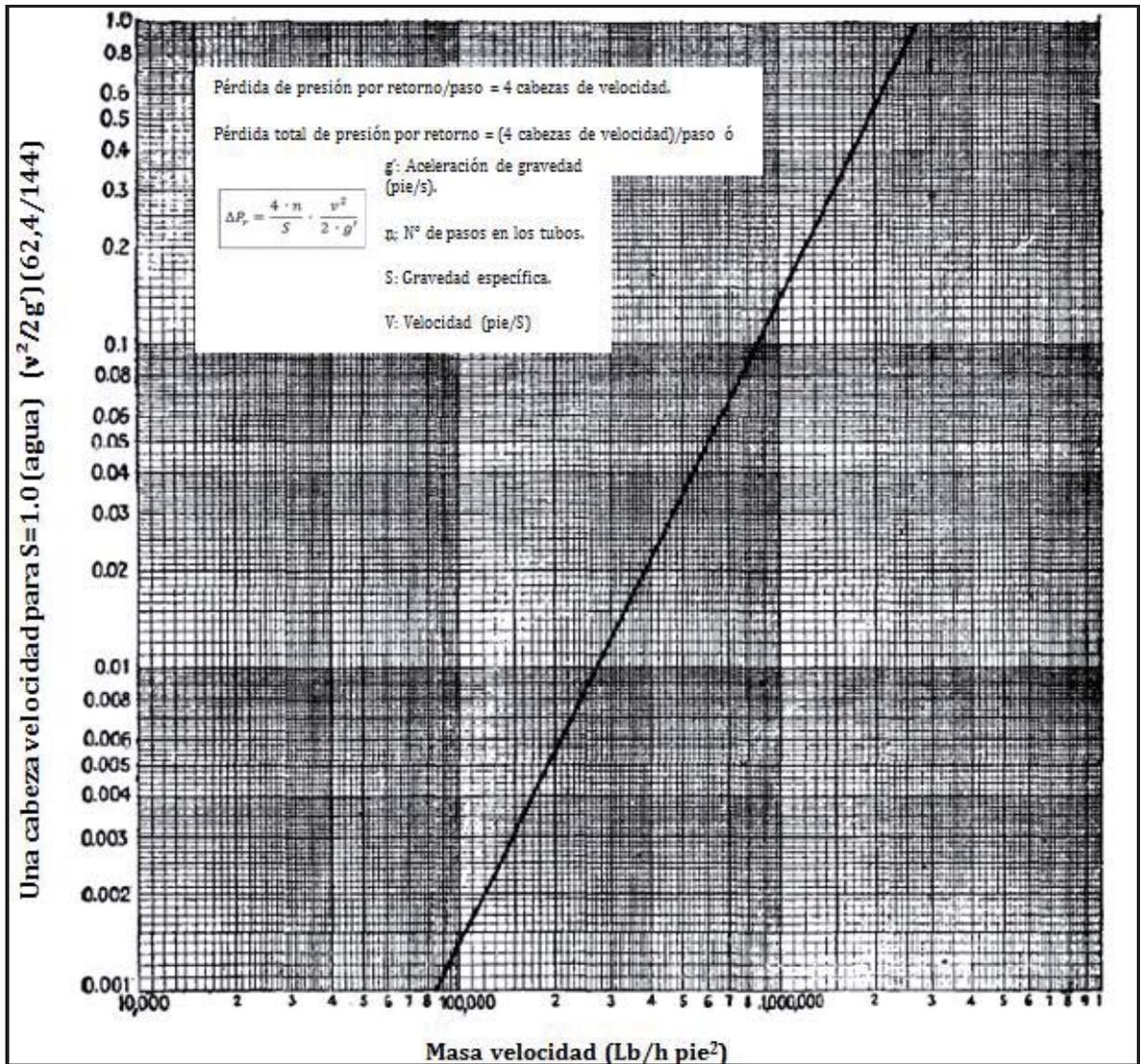


Figura N° 6: Pérdida de presión por retorno, lado de tubos.

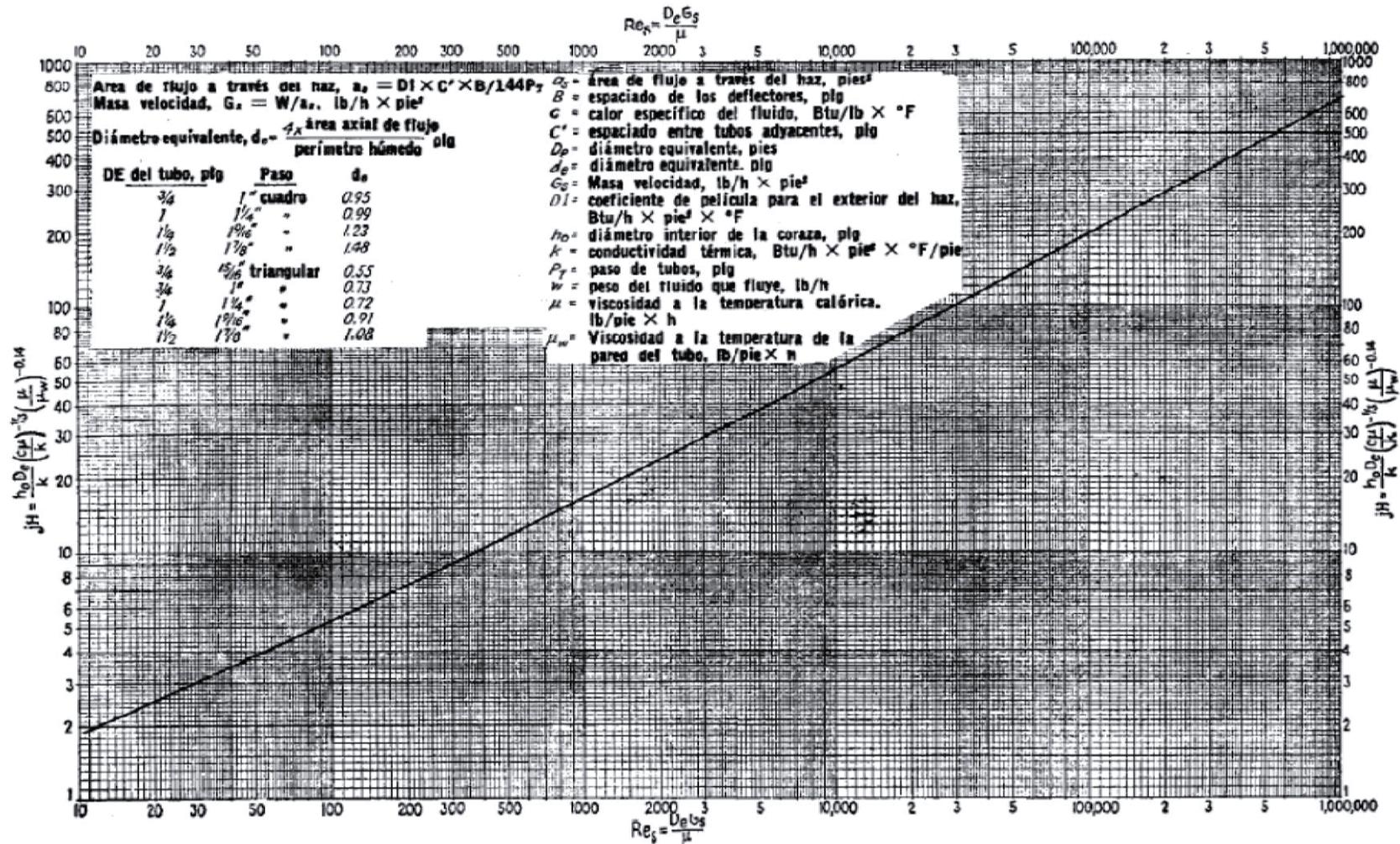


Figura N° 7: Curva de Transferencia de calor para lado carcasa con haz de tubos con deflectores segmentados 25%

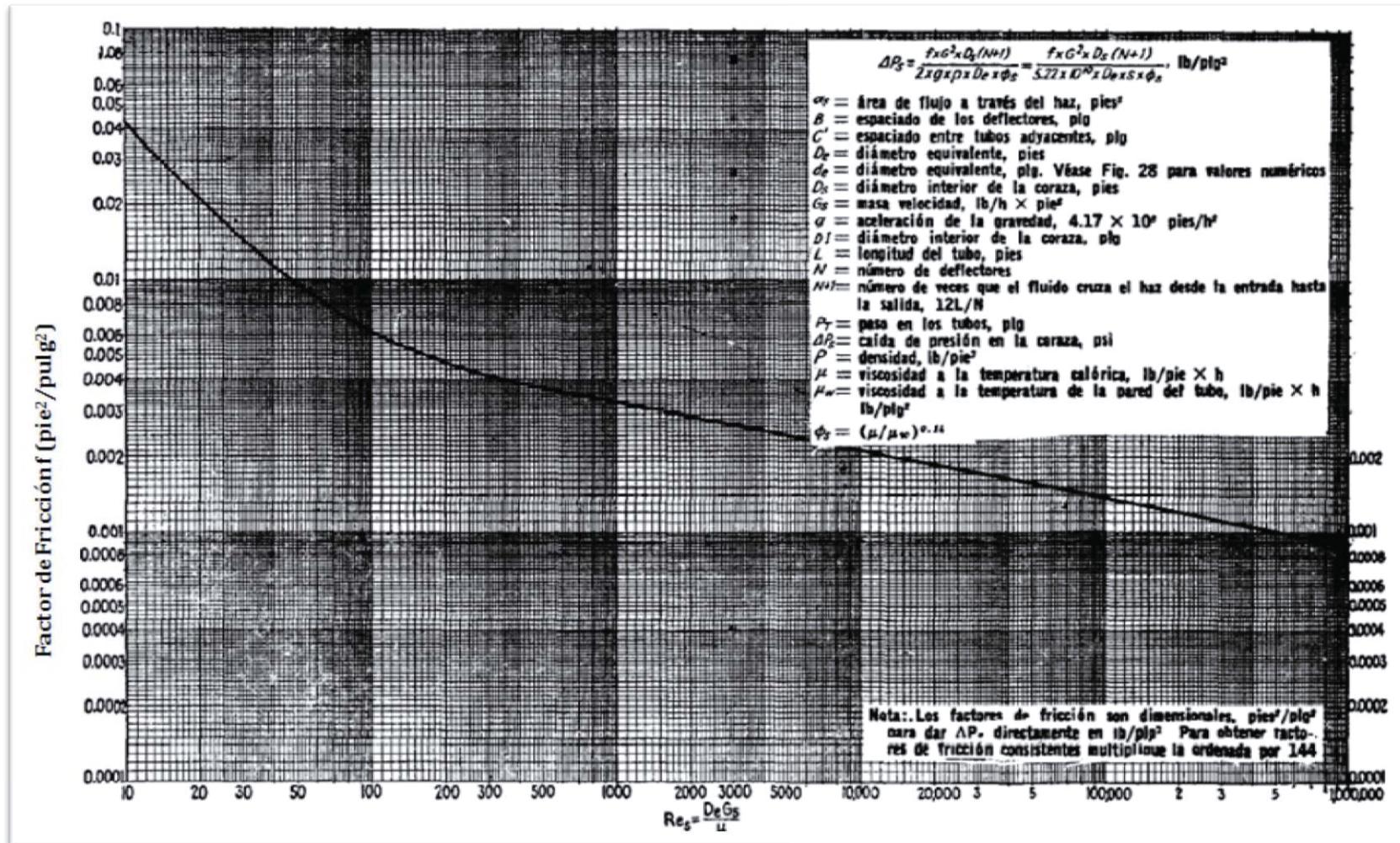


Figura N° 8: Factores de fricción lado de la carcasa, para haz de tubos con deflectores segmentados 25%

Temperatura del medio calefactor	Hasta 240°F		240-400°F	
Temperatura del agua	125°F o menos		Más de 125°F	
Agua	Velocidad del agua, p/s		Velocidad del agua, p/s	
	3 pies o menos	Más de 3 pies	3 pies o menos	Más de 3 pies
Agua de mar	0,0005	0,0005	0,001	0,001
Salmuera Natural	0,002	0,001	0,003	0,002
Torre de Enfriamiento y tanque de rocío artificial				
Agua de compensación tratada	0,001	0,001	0,002	0,002
Sin tratar	0,003	0,003	0,005	0,004
Agua de la ciudad o de pozo (como grandes lagos)	0,001	0,001	0,002	0,002
Grandes Lagos	0,001	0,001	0,002	0,002
Agua de Río:				
Mínimo	0,002	0,001	0,003	0,022
Mississippi	0,003	0,002	0,004	0,003
Delaware, Schykill	0,003	0,002	0,004	0,003
East River y New Cork Bay	0,003	0,002	0,004	0,003
Canal Sanitario de Chicago	0,008	0,006	0,010	0,008
Lodosa y Turbia	0,003	0,002	0,004	0,003
Dura (Más de 15g/gal)	0,003	0,003	0,005	0,003
Enfriamiento de máquinas	0,001	0,001	0,001	0,003
Destilada	0,0005	0,0005	0,0005	0,003
Alimentación tratada para Calderas	0,001	0,0005	0,001	0,001
Purga de Calderas	0,002	0,002	0,002	0,002

**Tabla N° 6: Factores de obstrucción**

<b>Fraciones de petróleo</b>			
<b>Tipos de fluidos</b>	<b>Factor de obstrucción</b>	<b>Tipos de fluidos</b>	<b>Factor de obstrucción</b>
<b>Aceites industriales:</b>		<b>Líquidos industriales</b>	
Combustolío	0,005	Orgánicos	0,001
Aceites de recirculación (limpio)	0,001	Refrigerantes, calefacción, enfriadores o evaporadores	0,001
Aceites para maquinaria y transformadores	0,001	Salmueras de enfriamiento	0,001
Aceites para quenching	0,004	<b>Unidades de destilación atmosférica</b>	
Aceites vegetales	0,003	Fondos residuales (<25°API)	0,005
<b>Gases y vapores industriales:</b>		Fondos residuales (>25°API)	0,002
Gas horno coque (gas manufacturado)	0,01	Vapores superiores sin tratar	0,0013
Gases de escape de máquinas Diesel	0,01	Vapores superiores tratados	0,003
Vapores orgánicos	0,0005	Cortes intermedios	0,0013
Vapor sin aceite	x	<b>Unidades de destilación al vacío</b>	
Vapor de alcohol	x	Vapores superiores a aceite:	
Vapor de escape (con aceite)	0,001	De la torre de burbujeo (condensador parcial)	0,001
Vapor refrigerante (condensado de compresores recíprocos)	0,002	Del tanque flash (sin reflujo apreciable)	0,003
Aire	0,002	Aceite delgado	0,002
<b>Vapores superiores en condensadores enfriados por agua</b>		Vapores superiores	0,001
De la Torre de burbujeo (condensador final)	0,001	Gasolina	0,0005
Del tanque flash	0,004	<b>Debutinizador, depropanizador, depentanizador y unidades de alquilación</b>	
<b>Cortes intermedios</b>		Alimento	0,001
Aceite	0,001	Enfriadores de producto	0,001
Agua	0,002	Vapores superiores	0,001
Fondos residuales (<20°API)	0,005	Calderetas de producto	0,002
Fondos residuales (>20°API)	0,002	Alimento del reactor	0,002
<b>Estabilizadores de gasolina natural</b>		<b>Unidades de tratamiento lubricante</b>	
Alimento	0,0005	Alimento de aceite solvente	0,002
Vapores superiores	0,0005	Vapores superiores	0,001
Enfriadores de producto e intercambiadores	0,0005	Aceite refinado	0,001
Calderetas de producto	0,001	Intercambiadores calentadores de aceite refinado enfriado por agua	0,003
<b>Unidades de eliminación de HS</b>		<b>Gomas y breas</b>	
Para vapores superiores	0,001	Generadores de vapor enfriados por aceite	0,005
Intercambiadores, enfriadores de solución	0,0016	Enfriados por agua	0,003

Caldereta		0,0016	Solvente	0,001
<b>Unidades de Cracking</b>			<b>Unidades desulfatadoras</b>	
Alimento Gas-oil	Menos de 500°F	0,002	Aceite de alimento	0,002
	500°F y más	0,003	Solvente	0,001
Alimento de NAFTA	Menos de 500°F	0,002	Asfalto y resina:	
	500°F y más	0,004	Generadores de vapor enfriados por aceite	0,005
Vapores del separador, tanque flash y vaporizador		0,006	Enfriador por agua	0,003
Aceite refinado		0,001	Vapores de solvente	0,001
Aceite refinado por agua		0,003	<b>Unidades para eliminar ceras</b>	
Vapores de la torre de burbujeo		0,002	Aceite lubricante	0,001
Residuo		0,010	Solvente	0,001
<b>Unidades de absorción</b>			Calentamiento de mezcla aceite-cera	0,001
Gas		0,002	Enfriamiento de mezcla aceite-cera	0,003
Aceite graso		0,002		

**Tabla 7: Factores de obstrucción de fracciones de petróleo**

	<b>Condiciones</b>	<b><math>\Delta P</math> Recomendables (Psi)</b>
<b>Líquidos</b>	$\mu < 1 \text{ Cp}$	5
	$1 < \mu < 10 \text{ Cp}$	7 - 10
<b>Gases y Vapores</b>	Alto Vacío	0,058 - 0,116
	Vacío Medio	$0,1 * P$ absoluta
	$14,5 < P < 29 \text{ Psi}$	$0,5 * P$ manométrica del sistema
	$P > 145 \text{ Psi}$	$0,1 * P$ manométrica del sistema

**Tabla N° 8: Caídas de presión recomendables para fluidos.**

## Intercambiadores de placas

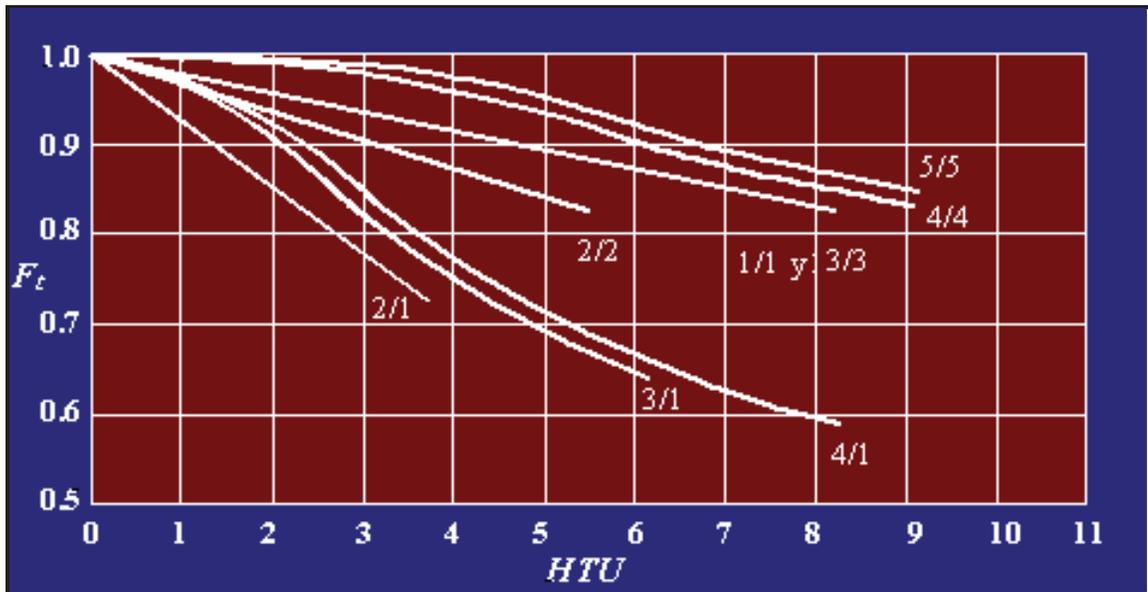


Figura N° 9: Factor de Corrección de Temperatura para Intercambiador de placas

Coeficientes globales de transferencia de calor ( $U_D$ )		
Fluido Caliente	Fluido Frio	$U_D$ (W/m <sup>2</sup> °C)
Orgánico liviano	Orgánico liviano	2500-5000
Orgánico liviano	Orgánico viscoso	250-500
Orgánico viscoso	Orgánico viscoso	100-200
Orgánico liviano	Agua de proceso	2500-3500
Orgánico viscoso	Agua de proceso	250-500
Orgánico liviano	Agua de enfriamiento	2000-4500
Orgánico viscoso	Agua de enfriamiento	250-450
Vapor condensado	Orgánico liviano	2500-3500
Vapor condensado	Orgánico viscoso	250-500
Agua de proceso	Agua de proceso	5000-7500

Agua de proceso	Agua de enfriamiento	5000-7000
Soluciones acuosas diluidas	Agua de enfriamiento	5000-7000
Vapor condensado	Agua de proceso	3500-4500

**Tabla N° 9: Coeficientes globales de transferencia de calor para intercambiadores de placas.**

Fluido	$r \cdot 10^5 \text{ m}^2\text{C}/W$
<b>Agua:</b>	
Desmineralizada o destilada	0,17
Blanda	0,34
Dura	0,86
De enfriamiento (tratada)	0,70
De mar	0,86
De río	0,86
<b>Aceites lubricantes</b>	0,34 - 0,86
<b>Aceites vegetales</b>	0,34 - 1,03
<b>Solventes Orgánicos</b>	0,17 - 0,51
<b>Vapor</b>	0,17
<b>Fluidos de proceso en general</b>	0,34 - 1,03

**Tabla 10: Resistencias a la incrustación recomendadas.**

Tipo de fluido	Tipo de fluido	Velocidad de flujo relativa al agua ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	$\Delta P$ (Psi)
Agua	Agua o vapor		14,7 - 29,4
Solución acuosa	Agua o vapor	0,6 - 0,8	100 - 200
Aceite	Agua o vapor	0,4 - 0,7	157 - 333
Aceite	Aceite	0,4 - 0,7	196 - 440
Solvente orgánico	Agua o vapor	0,9 - 1,1	26 - 32
Aceite vegetal	Agua o vapor	0,8	78 - 113

**Tabla 11: Velocidades de flujo relativas y Caídas de presión.**

		Tipos de placas											
Características de placa		P20	P0	P2	P5	P45	P25	P4	P16	P13	P14	P3	P15
Ancho (mm)		280	180	320	350	800	1000	844	1080	630	670	500	800
Área de intercambio/placa (m <sup>2</sup> )		0,031	0,032	0,12	0,14	0,55	0,61	0,75	0,81	0,18	0,32	0,32	0,53
N° máximo de placas		175	75	250	200	350	600	500	300	318	275	400	320
Área de intercambio máx (m <sup>2</sup> )		5,4	2,4	30	28	193	366	375	243	57	88	128	170
Espesor (mm)		0,5	0,6	0,6	0,8	0,6	1,0	0,6	1,1	0,9	0,7	0,6	1,0
Espesor entre placas (mm)		1,6 - 1,8	2,5	3,0	2,8-3,0	4,9	4,9-5,2	2,7	4,7- 5,3	3,0- 3,2	5,0	3,0	5,0 - 5,3
Temperatura máxima (°C)	Elastómeros	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	Asbesto	280	280	280	-----	-----	-----	280	-----	-----	-----	280	-----
Flujo por canal (m <sup>3</sup> /h)		0,05-0,15	0,14-0,25	0,45-0,7	0,36-0,9	3 - 5	4 - 10	1,1-2,5	5- 12,5	0,9-2,9	1,8-2,9	0,7-1,25	1,45-4,0
Flujo total máximo (m <sup>3</sup> /h)		2,5	11	50	16	125	450	260	400	30	140	140	65
Presión máx. de diseño (atm)		10	16	16	10	12	12	12	6	11	16	16	11

Tabla N° 12: Características de placas estándar Alfa Laval.

Tipos de placas		Tipos de fluidos						
		Agua 40°C	Soluciones acuosas	Aceite mineral	Aceite mineral	Aceites pesados	Compuestos orgánicos	Aceite vegetal
		Agua 40°C o vapor	Agua 40°C o vapor	Agua	Aceite mineral	Agua 40°C o vapor	Agua 40°C o vapor	Agua 40°C o vapor
P20	V	130	72	86	61	50	135	135
	U	4100	1220	523	250	440	2100	1100
P0	V	210	195	220	175	175	255	200
	U	3486	1220	540	240	370	1980	950
P2	V	650	590	650	520	520	650	540
	U	3900	1280	570	280	430	2100	1000
P5	V	830	540	580	470	360	870	760
	U	3480	900	360	190	280	1920	825
P13	V	2000	1300	1400	1000	860	1850	1800
	U	3600	930	340	145	230	1800	910
P3	V	1150	1000	1100	870	870	1100	900
	U	3900	1280	570	280	430	2100	1000
P14	V	3400	1950	2300	1450	1400	3200	2900
	U	3370	780	340	135	225	1630	825
P15	V	5400	3600	4000	3000	3500	5400	5500
	U	3250	710	290	120	210	1510	935
P45	V	3800	3000	3600	3000	3000	4000	4000
	U	4000	1280	620	280	385	2555	1510
P25	V	7200	4000	5000	4000	4000	3000	8000
	U	3250	790	350	162	267	2030	1220
P4	V	2100	1800	2000	1600	1600	2000	1600
	U	3250	1160	530	255	385	1920	895
P16	V	9400	6100	6500	5000	4300	9700	9000
	U	3020	1100	300	120	185	1510	815
P17	V	9700	6500	6700	5400	4300	9700	9400
	U	3140	1100	300	130	190	1510	835

Tabla 13: Velocidades de flujo por canal y Coeficientes globales de transferencia de calor.

# ANEXO III

**Gráficas y Tablas de datos para cálculo de costos de Inversión de Equipos**

**Factores de corrección de intercambiadores de calor de tubos y carcasa.**

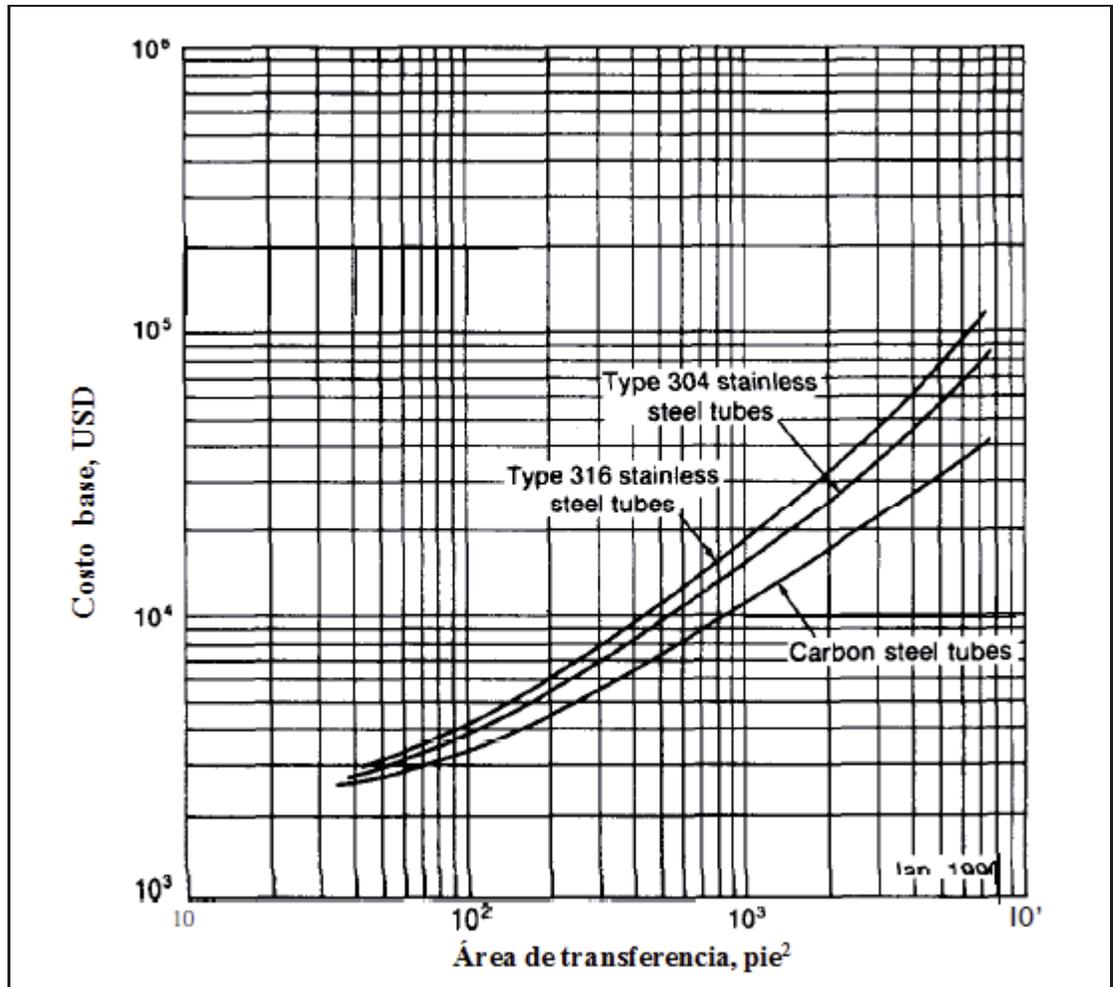


Figura N° 1: Costo base intercambiador de calor, año base 2003

Tipo de intercambiador	$f_d$
AES	1,00
AEM	0,87
AEU	0,85
AKT	1,20
BES	0,92
BEM	0,8
BEU	0,75
BKT	1,10
TERMOSIFON	1,35

Tabla 1: Factor de tipo de Intercambiador

Número de pasos por tubos	$f_{np}$
2	1,0
4	1,02
6	1,04
8	1,06
12	1,08

Tabla 2: Factor de Número de pasos por tubos.

Longitud [pie]	$f_l$
8	1,35
12	1,13
16	1,00
20	0,92
23	0,90

Tabla 3: Factor de longitud.

Temperatura [°F]	$f_t$
$T < 350$	1,00
$350 < T < 550$	1,08

Tabla 4: Factor de Temperatura.

Diámetro [pulg]	Arreglo [pulg]	$F_{\phi}$
3/4	Cuadrado 1"	1,0
3/4	Triangular 1 5/16	0,95
3/4	Triangular 1	0,97
1	Cuadrado 1 ¼	1,07
1	Triangular 1 ¼	0,97

Tabla 5: Factor de diámetro y arreglo de tubos.

Presión [Psi]	$f_p$		
	1,6 [pie]	3,2 [pie]	16,4 [pie]
< 145,5	1	1	1
145,5 – 291	1,03	1,08	1,18
291 – 436,6	1,15	1,20	1,32
436,6 – 582	1,28	1,35	1,50
582 – 946	1,67	1,75	1,93
946 – 1237	1,80	1,90	2,10
1237 – 1892	2,35	2,45	2,70
1892 - 2620	3,0	3,15	3,45

Tabla 6: Factor de Presión.

Tipo de material	$f_m$				
	< 10 m <sup>2</sup>	10 -50 m <sup>2</sup>	50 -100 m <sup>2</sup>	100-500 m <sup>2</sup>	500- 1000 m <sup>2</sup>
AC/AC	1	1	1	1	1
AC/Cu	1,05	1,1	1,15	1,3	1,5
AC/Mo	1,4	1,55	1,75	2,05	2,35
AC/304	1,55	1,75	2,15	2,6	3,2
304/304	2,3	2,55	2,9	3,4	4,5
AC/316	1,95	2,5	2,55	3	3,65
AC/Monel	2,8	3,05	3,55	4,35	5,25
Monel/Monel	4,5	4,8	5,3	6,1	7,1
AC/Ti	4,7	5,8	7,3	9,4	12
Ti/Ti	11	12,2	13,9	16,3	19,1

Tabla 7: Factor de tipo de material de Carcasa/Tubos

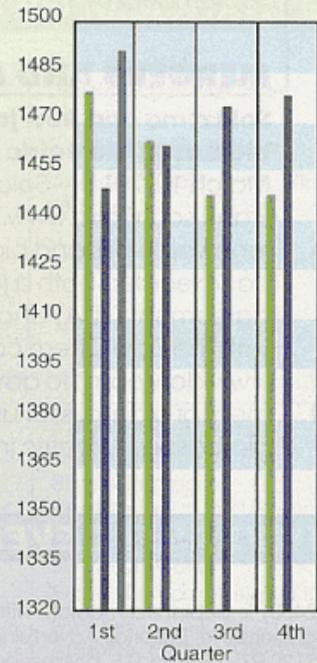
## MARSHALL & SWIFT EQUIPMENT COST INDEX

(1926 = 100)

	1st Q 2011	4th Q 2010	3rd Q 2010	2nd Q 2010	1st Q 2010
<b>M &amp; S INDEX</b>	1,490.2	1,476.7	1,473.3	1,461.3	1,448.3
<b>Process industries, average</b>	1,549.8	1,537.0	1,534.4	1,522.1	1,510.3
Cement	1,546.6	1,532.5	1,530.0	1,519.2	1,508.1
Chemicals	1,519.8	1,507.3	1,505.2	1,493.5	1,481.8
Clay products	1,534.9	1,521.4	1,518.3	1,505.6	1,496.0
Glass	1,447.2	1,432.7	1,428.5	1,416.4	1,403.0
Paint	1,560.7	1,545.8	1,542.1	1,527.6	1,515.1
Paper	1,459.4	1,447.6	1,444.5	1,430.1	1,416.4
Petroleum products	1,652.5	1,640.4	1,637.0	1,625.9	1,615.6
Rubber	1,596.2	1,581.5	1,579.3	1,564.2	1,551.0
<b>Related industries</b>					
Electrical power	1,461.2	1,434.9	1,419.2	1,414.0	1,389.6
Mining, milling	1,599.7	1,579.4	1,576.7	1,569.1	1,552.1
Refrigeration	1,827.8	1,809.3	1,804.8	1,786.9	1,772.2
Steam power	1,523.0	1,506.4	1,502.3	1,488.0	1,475.0

### Annual Index:

<b>2003 = 1,123.6</b>	<b>2004 = 1,178.5</b>	<b>2005 = 1,244.5</b>	<b>2006 = 1,302.3</b>
<b>2007 = 1,373.3</b>	<b>2008 = 1,449.3</b>	<b>2009 = 1,468.6</b>	<b>2010 = 1,457.4</b>



Source: Marshall & Swift's Marshall Valuation Service manual. Reprinted and published with permission of Marshall & Swift/Boeckh, LLC and its licensors, copyright 2010. May not be reprinted, copied, automated or used for valuation without permission.

Figura N° 2: Índice de Marshall and Swift, año 2010

# ANEXO IV

## Resultados obtenidos de diseño de Equipos

Características de Intercambiador de Calor

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 13	
Diámetro interno [Pulg]	1,31	35
Diámetro externo [Pulg]	1 ½	
Largo [Pie]	14	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	176	
$\Delta P$ [Psi]	5,343	0,12

**Tabla 1: Características de intercambiador de Tubos y Carcasa A1**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 14	
Diámetro interno [Pulg]	1,08	29
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	174	
$\Delta P$ [Psi]	6,070	0,343

**Tabla 2: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A2**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 13	
Diámetro interno [Pulg]	1,06	29
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	14	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	212	
$\Delta P$ [Psi]	3,901	0,42

**Tabla 3: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A3**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 18	
Diámetro interno [Pulg]	0,902	23,25
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	4	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	192	
$\Delta P$ [Psi]	3,705	1,03

**Tabla 4: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A4**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 16	
Diámetro interno [Pulg]	0,87	23,25
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	212	
$\Delta P$ [Psi]	11,032	1,54

**Tabla 5: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A5**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 14	
Diámetro interno [Pulg]	0,834	25
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	14	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	252	
$\Delta P$ [Psi]	9,904	1,03

**Tabla 6: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A6**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 12	
Diámetro interno [Pulg]	0,782	29
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	12	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	294	
$\Delta P$ [Psi]	8,22	0,35

**Tabla 7: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A7**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 10	
Diámetro interno [Pulg]	0,732	29
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	10	
N° de pasos	4	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	338	
$\Delta P$ [Psi]	2,63	0,44

**Tabla 8: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A8**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 14	
Diámetro interno [Pulg]	0,584	21,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	14	
N° de pasos	4	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	314	
$\Delta P$ [Psi]	12,069	3,11

**Tabla 9: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A9**

Características de diseño de intercambiadores de calor de tubos y carcasa, condiciones de proceso B:

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 15	
Diámetro interno [Pulg]	0,606	17,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	142	
$\Delta P$ [Psi]	6,688	0,028

**Tabla 10: Características de intercambiadores Tubos y Carcasa B1**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 8	
Diámetro interno [Pulg]	0,67	19,25
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	116	
$\Delta P$ [Psi]	6,645	0,22

**Tabla 48: Características de Intercambiador de Tubos Y Carcasa B2**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 10	
Diámetro interno [Pulg]	0,482	17,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	178	
$\Delta P$ [Psi]	10,194	0,716

**Tabla 12: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa B3**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 12	
Diámetro interno [Pulg]	0,532	17,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	166	
$\Delta P$ [Psi]	9,426	0,33

**Tabla 13: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa B4**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 11	
Diámetro interno [Pulg]	0,51	17,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	142	
$\Delta P$ [Psi]	14,63	0,34

**Tabla 14: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa B5**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 14	
Diámetro interno [Pulg]	0,584	15,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	24	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	128	
$\Delta P$ [Psi]	11,023	1,5

**Tabla 15: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa B6**

Características de diseño de Intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa, condiciones de proceso C:

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 12	
Diámetro interno [Pulg]	0,532	35
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	780	
$\Delta P$ [Psi]	4,237	0,105

**Tabla 16: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa C1**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 14	
Diámetro interno [Pulg]	0,584	31
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	722	
$\Delta P$ [Psi]	11,185	0,44

**Tabla 17: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa C2**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 18	
Diámetro interno [Pulg]	0,652	37
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	720	
$\Delta P$ [Psi]	13,504	0,48

**Tabla 18: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa C3**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 10	
Diámetro interno [Pulg]	0,732	39
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	672	
$\Delta P$ [Psi]	8,625	0,11

**Tabla 19: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa C4**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 14	
Diámetro interno [Pulg]	0,834	39
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	600	
$\Delta P$ [Psi]	6,25	0,08

**Tabla 20: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa C5**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 18	
Diámetro interno [Pulg]	0,902	37
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	532	
$\Delta P$ [Psi]	5,53	0,12

**Tabla 21: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa C6**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 10	
Diámetro interno [Pulg]	0,982	37
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	24	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	357	
ΔP [Psi]	8,19	0,14

**Tabla 22: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa C7**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 8	
Diámetro interno [Pulg]	0,67	37
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	544	
ΔP [Psi]	10,885	0,12

**Tabla 23: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa C8**

**Resultados obtenidos con parámetros fuera de rango recomendado, para Intercambiadores de tubos y carcasa**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 10	
Diámetro interno [Pulg]	1,23	35
Diámetro externo [Pulg]	1 ½	
Largo [Pie]	10	
N° de pasos	4	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	230	
ΔP	0,451	0,153

**Tabla 24: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A'1**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 15	
Diámetro interno [Pulg]	1,36	29
Diámetro externo [Pulg]	1 ½	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	4	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	147	
ΔP	0,911	0,43

**Tabla 25: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A'2**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 18	
Diámetro interno [Pulg]	1,4	29
Diámetro externo [Pulg]	1 ½	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	2	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	127	
ΔP [Psi]	0,362	0,32

**Tabla 26: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A'3**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 18	
Diámetro interno [Pulg]	1,15	25
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	4	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	155	
ΔP [Psi]	1,780	1,009

**Tabla 27: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A'4**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 10	
Diámetro interno [Pulg]	0,982	35
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	10	
N° de pasos	4	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	275	
ΔP [Psi]	0,774	0,135

**Tabla 28: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A'5**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 8	
Diámetro interno [Pulg]	0,67	31
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	8	
N° de pasos	4	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	430	
ΔP [Psi]	1,66	0,024

**Tabla 29: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A'6**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 18	
Diámetro interno [Pulg]	0,352	21,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	2	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	270	
$\Delta P$ [Psi]	1,22	1,11

**Tabla 30: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A'7**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 16	
Diámetro interno [Pulg]	0,62	21,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	2	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	302	
$\Delta P$ [Psi]	1,30	1,41

**Tabla 49: Características de intercambiador de Tubos y Carcasa A'8**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 11	
Diámetro interno [Pulg]	0,51	25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	12	
N° de pasos	2	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	452	
$\Delta P$ [Psi]	1,26	0,66

**Tabla 32: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa A'9**

**Características de Intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa, condiciones de proceso B con parámetros fuera de rango recomendado:**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 13	
Diámetro interno [Pulg]	0,56	17,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	178	
$\Delta P$ [Psi]	5,43	0,71

**Tabla 33: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, B'1**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 17	
Diámetro interno [Pulg]	0,634	17,25
Diámetro externo [Pulg]	$\frac{3}{4}$	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	166	
$\Delta P$ [Psi]	4,344	0,366

**Tabla 34: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, B'2**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 13	
Diámetro interno [Pulg]	0,81	19,25
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	136	
$\Delta P$ [Psi]	0,93	0,33

**Tabla 35: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, B'3**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 10	
Diámetro interno [Pulg]	0,732	19,25
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	116	
$\Delta P$ [Psi]	4,24	0,025

**Tabla 36: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, B'4**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 18	
Diámetro interno [Pulg]	0,902	19,25
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	116	
$\Delta P$ [Psi]	1,65	0,24

**Tabla 37: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, B'5**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 8	
Diámetro interno [Pulg]	0,92	21,25
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	95	
$\Delta P$ [Psi]	1,966	0,19

**Tabla 38: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, B'6**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 11	
Diámetro interno [Pulg]	1,01	23,25
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	96	
ΔP [Psi]	1,525	0,10

**Tabla 39: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, B'7**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 10	
Diámetro interno [Pulg]	0,982	21,25
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	24	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	78	
ΔP [Psi]	2,603	0,15

**Tabla 40: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, B'8**

**Características de Intercambiadores de calor de Tubos y Carcasa, condiciones de proceso C con parámetros fuera de rango recomendado:**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 10	
Diámetro interno [Pulg]	0,482	33
Diámetro externo [Pulg]	¾	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Cuadrado	
N° de tubos	718	
ΔP [Psi]	1,427	0,14

**Tabla 41: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, C'1**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 16	
Diámetro interno [Pulg]	0,62	35
Diámetro externo [Pulg]	¾	
Largo [Pie]	16	
N° de pasos	4	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	882	
ΔP [Psi]	1,87	0,11

**Tabla 42: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, C'2**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 12	
Diámetro interno [Pulg]	0,782	37
Diámetro externo [Pulg]	1	
Largo [Pie]	18	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	614	
ΔP [Psi]	3,81	0,15

**Tabla 43: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, C'3**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 8	
Diámetro interno [Pulg]	0,92	39
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	6	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	432	
ΔP [Psi]	3,54	0,12

**Tabla 44: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, C'4**

	<b>Tubos (Agua de enfriamiento)</b>	<b>Carcasa (Aire)</b>
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Tipo	BWG 13	
Diámetro interno [Pulg]	1,06	39
Diámetro externo [Pulg]	1 ¼	
Largo [Pie]	20	
N° de pasos	8	1
Arreglo	Triangular	
N° de tubos	419	
ΔP [Psi]	5,12	0,10

**Tabla 45: Características de Intercambiador de Tubos y Carcasa, C'5**

### Características de Intercambiadores de placas

Tipo de Placas	P16
Ancho de placa [mm]	1080
Espesor de Placa [mm]	1,1
N° de pasos	2
N° de placas	139
$\Delta P$ (F. Caliente) [Psi]	3,47
$\Delta P$ (F. Frío) [Psi]	0,98

**Tabla 46: Características de Intercambiador de Placas, A1**

Tipo de Placas	P45
Ancho de placa [mm]	800
Espesor de Placa [mm]	0,6
N° de pasos	2
N° de placas	311
$\Delta P$ (F. Caliente) [Psi]	1,71
$\Delta P$ (F. Frío) [Psi]	0,49

**Tabla 47: Características de Intercambiador de Placas, A2**

Tipo de Placas	P25
Ancho de placa [mm]	1000
Espesor de Placa [mm]	1
N° de pasos	2
N° de placas	207
$\Delta P$ (F. Caliente) [Psi]	1,84
$\Delta P$ (F. Frío) [Psi]	0,52

**Tabla 48: Características de Intercambiador de Placas, A3**

Tipo de Placas	P4
Ancho de placa [mm]	844
Espesor de Placa [mm]	0,6
N° de pasos	1
N° de placas	347
$\Delta P$ (F. Caliente) [Psi]	1,55
$\Delta P$ (F. Frío) [Psi]	0,43

**Tabla 49: Características de Intercambiador de Placas, A4**

Tipo de Placas	P3
Ancho de placa [mm]	500
Espesor de Placa [mm]	0,6
N° de pasos	1
N° de placas	167
$\Delta P$ (F. Caliente) [Psi]	1,05
$\Delta P$ (F. Frío) [Psi]	0,29

**Tabla 50: Características de Intercambiador de Placas, A5**

Tipo de Placas	P14
Ancho de placa [mm]	670
Espesor de Placa [mm]	0,7
N° de pasos	2
N° de placas	175
$\Delta P$ (F. Caliente) [Psi]	0,62
$\Delta P$ (F. Frío) [Psi]	0,17

**Tabla 51: Características de Intercambiador de Placas, A6**

Tipo de Placas	P13
Ancho de placa [mm]	630
Espesor de Placa [mm]	0,9
N° de pasos	2
N° de placas	207
$\Delta P$ (F. Caliente) [Psi]	1,3
$\Delta P$ (F. Frío) [Psi]	0,37

**Tabla 52: Características de Intercambiador de Placas, A7**