



91
207
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**BALANCES DE EXERGIA PARA LA
OPTIMIZACION DE PROCESOS.**

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

GERMAN MONTALVO CATAÑO



MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO SEGÚN EL TEMA

PRESIDENTE: M. en C. ALEJANDRO ANAYA
DURAND

VOCAL: M. en I. JOSÉ FRANCISCO GUERRA
RECASENS

SECRETARIO: I.Q. CLAUDIO ARMANDO AGUILAR
MARTÍNEZ

1er. SUPLENTE: I.Q. JOSÉ AGUSTÍN TEXTA MENA

2do. SUPLENTE: M. en C. CELESTINO MONTIEL
MALDONADO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Biblioteca de la Facultad de Química
U. N. A. M.
Ciudad Universitaria.
Coyoacán, D.F.

ASESOR:


I.Q. CLAUDIO ARMANDO AGUILAR MARTÍNEZ.

SUSTENTANTE:


GERMAN MONTALVO CATAÑO.

AGRADECIMIENTOS:

- A mi padre:** Porque sin su silencioso y gran apoyo, yo no estaría aquí.
- A mi madre:** Porque sin su fuerza y preocupación por mi persona no hubiera llegado hasta aquí.
- A mis hermanas:** Por haberme aguantado durante 24 años mis defectos, virtudes y alguna que otra broma pesada.
- A mis amigos:** Gerardo Farfán, Ileana, Briseyda, Olivia, Job, Cristina, Ramón, Filiberto, Paco, Erick Cruz, Erick Martínez, Cuquis, Rosalía, Rosana, Elías, y tantas, y tantas personas que han estado junto a mí: **Gracias**. Por ser mi segunda familia con la que he estado en este arduo camino.
- A mis maestros:** Por haberme enseñado no solo a ser ingeniero, sino a ser un ser humano.
- A mi Asesor:** Por ayudarme a realizar uno de mis más anhelados sueños.

Al Lic. Virgilio Gastelum Z. y Sra. Sofia S. de Gastelum

“Dedicado también a todo aquel que tenga un sueño y la voluntad para lograrlo”.

GRACIAS

GERMAN MONTALVO CATAÑO

INDICE

	Pags.
Introducción	1
1. Fundamentos de Exergía	4
1.1 Que es la Exergía	5
1.1.1 Conceptos y Definiciones	5
1.1.2 Diferencias entre Exergía y Energía	9
1.1.3 Parámetros de la Exergía	9
1.1.4 Tipos de Exergía	10
1.1.4.1 Aplicaciones de los tipos de Exergía	13
1.1.4.2 Balance de Exergía	16
1.1.4.3 La importancia termodinámica de la Exergía	17
1.1.4.4 La importancia económica de la Exergía	17
1.2 Que es la Tecnología Pinch	20
1.2.1 Historia y problemas que enfrenta la Tecnología Pinch	20
1.2.2 Fundamentos Termodinámicos y Reglas de la Tecnología Pinch	24
1.3 Relación entre Exergía y Tecnología Pinch	38
1.3.1 Fundamentos	38
1.3.2 Desarrollo del Análisis Combinado de Exergía y Tecnología Pinch	38
1.4 Glosario de Términos	42
1.4.1 Subíndices	42
1.4.2 Superíndices	42
2. Relación entre los balances de Exergía y la Optimización de Procesos	43
2.1 Balances y Análisis de Exergía	44
2.1.1 El papel que juegan los balances de Exergía en la optimización de Procesos	44
2.1.2 Herramientas y Metodología de los Balances de Exergía	45
2.1.2.1 Herramientas	45
2.1.2.2 Ecuaciones que gobiernan la Exergía	46

	Pags.
2.1.2.3 Metodología de los balances de Exergía	48
2.2 Procedimiento de la Metodología de los balances de Exergía	54
2.3 Glosario de Términos	56
2.3.1 Subíndices	56
2.3.2 Superíndices	56
3. Aplicación de la Exergía y la Optimización Técnica	57
3.1 Secuencia de Calculo	58
3.2 Desarrollo de un balance de Exergía	60
3.3 Observaciones del Balance de Exergía de la Planta de MTBE	69
3.4 Análisis del balance de Exergía en la optimización técnica	71
3.4.1 Analisis de los Bloques	71
3.5 Opciones de Optimización	74
3.5.1 Perspectivas de Optimización	75
3.6 Glosario de Términos	78
3.6.1 Superíndices	78
4. Relación entre Exergía y Optimización Económica	79
4.1 La Exergía dentro de la optimización económica	80
4.1.1 Análisis Termoeconómico	81
4.1.2 Optimización por Análisis Termoeconómico	82
4.2 Optimización Económica de la Planta de MTBE	89
4.3 Análisis del Balance de Exergía en la Optimización Económica	93
4.4 Glosario de Términos	94
4.4.1 Subíndices	94
4.4.2 Superíndices	94
5. Conclusiones	95
5.1 Conclusiones de la Optimización Técnica	96

	Pags.
5.2 Conclusiones de la Optimización Económica	97
5.3 Conclusiones Generales	98
6. Anexo	99
6.1 DFP	100
6.2 Lista de Equipo	101
7. Bibliografía	103
7.1 Revistas	104
7.2 Tesis	106
7.3 Libros	106
7.4 Software	106

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria de proceso, esta viviendo una etapa en donde la única constante es tener mejores procesos cada día, esta es tener procesos óptimos para las necesidades técnicas y económicas, tanto del industrial, como del mercado al cual se dirige el bien producido por el proceso.

Siguiendo, el tenor de tener procesos óptimos, académicos e industriales se han dado a la tarea de mejorar cada vez más los procesos, a esto se le llama **Optimización de Procesos**.

La optimización de procesos se encamina a dos puntos que son muy importantes para la industria de proceso:

a) Energía.

b) Materia.

Atendiendo la optimización de estos dos puntos, la optimización de procesos se dirige a mejorar diferentes aspectos de los procesos como:

- * Maximizar la conversión del producto de una reacción.
- * Minimizar el numero de etapas de separación y purificación entre productos y reactivos.
- * Minimizar los efluentes del proceso.
- * Maximizar el uso de la energía alimentada al proceso.
- * Minimizar la energía alimentada al proceso.

La presente tesis se enfoca a uno de los aspectos antes mencionados:

- * Maximizar el uso de la energía alimentada.
- * Minimizar la cantidad de energía alimentada.

El como hacerlo nos lleva a utilizar una de la tantas metodologías que existen actualmente, en este caso utilizaremos los **Balances de Exergía**, porque ofrece múltiples ventajas:

- I. Obedece a la Primera Ley y Segunda Ley de Termodinámica.
- II. Sus parámetros son considerados parámetros absolutos al obedecer la Segunda Ley de la Termodinámica.
- III. Nos indica realmente que tan eficiente es un proceso.

Aunque este término no es tan conocido en nuestro país a nivel estudiantil grado licenciatura, debería serlo, debido a que complementando los balances de materia y energía con los balances de exergía podemos llevar a cabo una verdadera optimización de los procesos industriales.

Es por eso, que la presente tesis no intenta ser un tratado sobre exergía, sino una ayuda para personas que esten relacionadas con la Ingeniería Química, en donde puedan obtener información de una manera sencilla y practica, de que es la exergía y cual es su uso en la optimización de los procesos.

1. FUNDAMENTOS DE EXERGIA.

1.1. QUE ES LA EXERGIA.

Para responder esto debemos contestarnos tres preguntas:

1. ¿Que es la exergía?
2. ¿De donde proviene?
3. ¿A que principio obedece?

1.1.1 CONCEPTOS Y DEFINICIONES

Primero hay que contestarnos la pregunta ¿De donde proviene la exergía?.

La primera vez que se menciono la exergía fue a partir de el análisis de energía mediante la Segunda Ley de la Termodinámica, en la literatura científica sobre este concepto fue P.G. Tait⁵, así como también por J.W. Gibbs, J.C. Maxwell y Lord Kelvin³ los que hicieron las primeras investigaciones.

En este siglo donde tiene una desarrollo más importante acerca de este concepto, pero este desarrollo tiene dos corrientes bien definidas:

La corriente europea que es donde se le llama exergía^{5,6}, donde sus máximos representantes en este siglo son: Z. Rant, F. Bosnjankovic, y J. Szargut⁶.

La otra corriente europea que es donde el concepto tiene el nombre de disponibilidad^{1,2,4,5,15,17}. Teniendo por representantes: J.H. Keenan, G. Darricus, R.A. Gaggioli por mencionar algunos.

Como vemos el concepto tiene mas de cien años. Ahora que ya sabemos de donde viene históricamente, solo nos falta saber ¿De donde proviene científicamente?. Esto es más fácil que la pregunta anterior, puesto que la exergía proviene de un análisis de la Segunda Ley de la Termodinámica.

La siguiente pregunta es ¿Que es la exergía?.

Esto no es tan simple, pues a lo largo del tiempo se han dado diferentes definiciones por lo que daremos algunas de ellas, para adoptar una definición que englobe a todas las demás.

- ♦ "La exergía representa la capacidad para llevar a cabo un cambio. La energía no sirve como una medida de capacidad para causar un cambio, solo la exergía puede."

Gaggioli & Petit¹

- ♦ "La exergía representa la cantidad de trabajo que uno puede obtener de un proceso reversible llevándolo a un equilibrio termodinámico con unos límites definidos."

de Nevers²

- ♦ "Exergía es el trabajo potencial, cuando un sistema es llevado a las condiciones del ambiente."

Chiu³

- ♦ "Exergía es el trabajo potencial relativo, cuando llevamos a un sistema a un estado final de equilibrio."

El-Sayed & Evans⁴

- ♦ "La exergía es una medida de la calidad de la energía."

Lee, Morabito & Wood¹¹

- ♦ "Exergía es la cantidad de trabajo potencial cuando una cantidad de materia es llevada a un estado de equilibrio termodinámico con los componentes comunes de la naturaleza circundante por medio de procesos reversibles, involucrando una interacción con los componentes de la naturaleza antes mencionados."

Szargut⁶

Como podemos ver las definiciones van al mismo punto que es la cantidad de trabajo potencial de un sistema, pero ¿Hasta donde? hasta llegar a un equilibrio, ¿Con quien? con los alrededores, y ¿Cuales alrededores? la naturaleza circundante al sistema.

Es por todas estas preguntas que podemos seleccionar una definición de todas la antes mencionadas, y es la definición que nos da Szargut, porque es precisa en decir que es la exergía.

Para entender este concepto se puede dar un ejemplo lo suficientemente simple, tratando de quitar lo abstracto del mismo, como el del sistema que se describe posteriormente (Fig. 1.1), donde tenemos un tanque que esta en lo alto de la colina, este

tanque suministra agua para mover un molino, después de realizar este trabajo el agua es descargada a un lago.

La energía potencial que desarrolla el agua es debido a la diferencia de altura del nivel en el tanque y el lago que se encuentra en la falda de la colina. Pero, en vista de que el tanque se vacía, y se necesita tener en movimiento el molino, por lo tanto es necesario mantener en cierto nivel el agua en el tanque que permita tener en movimiento el molino, por lo que hace falta una bomba para tal tarea.

La exergía del agua es el trabajo potencial que se puede desarrollar debido a la diferencia de alturas entre el tanque y el lago, siendo este último el estado de referencia para el cálculo del trabajo potencial, pero parte de esta exergía es utilizada para realizar el trabajo de mover el molino, otra parte de esta exergía es consumida para mover la bomba de retorno y otra parte de la exergía es perdida al descargarse en el lago y llegar a un equilibrio con estado de referencia.

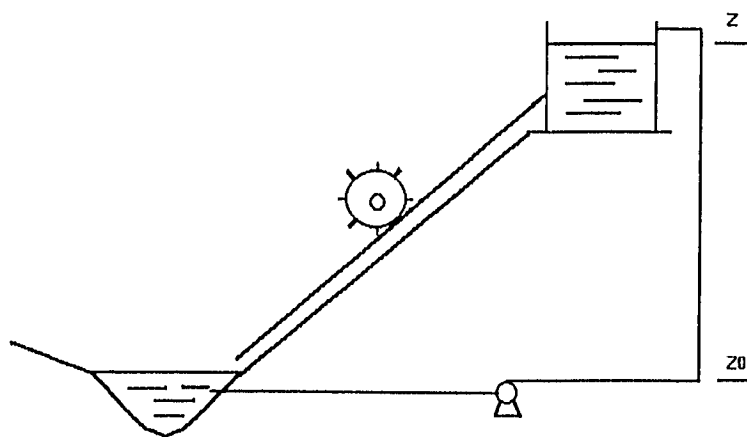


Figura 1.1

Ahora hay una pregunta que nos falta responder, y es ¿A que principio obedece la exergía?

Obedece a uno solamente y es a la Segunda Ley de la Termodinámica que en esencia postula²:

"La energía potencial es cualquiera cuando no se tiene un completo equilibrio con el ambiente circulante, lo que representa una capacidad de cambio, y esta energía potencial puede ser transferida de un cuerpo a otro (pero solo se puede transferir completamente con límites ideales). En nuestra realidad, para llevar a cabo un cambio algo de esa energía potencial es invariablemente usada, porque es necesaria para llevar a cabo el cambio (que se traduce en un cambio de entropía)".

1.1.2 DIFERENCIAS ENTRE EXERGIA Y ENERGÍA.

Ya que vimos a que principio obedece, hay que ver diferencias hay entre energía y exergía⁶, para poder terminar de entender el concepto y compararlo con lo que algunos autores lo llaman la esencia de energía.

Tabla 1.1

<i>Energía</i>	<i>Exergía</i>
Esta sujeta a la Primera Ley de la Termodinámica.	Esta exenta de la Primera Ley de la Termodinámica.
Esta en función del estado de la materia del sistema.	Esta en función del estado de la materia del sistema y del ambiente.
Puede ser calculada en base a cualquier estado de referencia.	El estado de referencia esta determinado por el ambiente.
Se incrementa con la Temperatura.	En procesos isobáricos alcanza el mínimo a la temperatura del ambiente y a bajas temperaturas se incrementa debido a las diferencias de Temperatura.
En la adopción de un estado de gas ideal no depende de la Presión.	Depende de la Presión.
La energía no se crea, ni se destruye.	La exergía se crea y se destruye.

1.1.3 PARÁMETROS DE LA EXERGIA

Para calcular la exergía de un sistema se tiene que tener en cuenta cinco parámetros:

1. Las características termodinámicas de la atmósfera.
2. El tipo de sistema.
3. Los tipos de interacción entre la atmósfera y el sistema.
4. El estado inicial y final del sistema.
5. El rango de disipación producido en el sistema.

El primer parámetro especificara el estado de referencia del sistema.

El segundo parámetro indicara el tipo de exergía que contendrá el sistema.

El tercer parámetro complementara al segundo parámetro, puesto que todo sistema tiene cuatro tipos de interacciones:

- 1) Transferencia de calor
- 2) Transferencia de calor y trabajo
- 3) Transferencia de calor, trabajo y masa
- 4) La combinación de los tres anteriores

El cuarto parámetro contabiliza la cantidad de trabajo potencial que desarrollará el sistema.

El quinto parámetro indicara la entropía generada por sistema del estado inicial al estado final y así la eficiencia del proceso en utilizar el trabajo del sistema.

1.1.4 TIPOS DE EXERGIA

Al saber estos cinco parámetro nos hacemos una pregunta ¿Hay más de un tipo de exergía?. La respuesta es sí, de acuerdo a lo siguiente:

La exergía, al igual que la energía, tiene dos formas principales de manifestación:

- a) La que no se encuentra asociada a la materia, esta es la exergía de transferencia.
- b) La que se encuentra relacionada a la materia, la cual se define como la exergía de materia.

La primera de estas manifestaciones esta conformada por la exergía relacionada al trabajo de eje (E_{EJE}), la cual es igual al trabajo de eje (W_{EJE}) y por la exergía calorífica (E_{H}), la cual de manera contraria a la exergía de trabajo de eje, la exergía calórica es diferente a la cantidad de calor (ΔH). La exergía calórica es equivalente a la cantidad de calor (ΔH) resultante de una maquina reversible que opera entre una fuente de calor a una temperatura constante (T) y un deposito de calor a una temperatura constante (T_0).

La segunda manifestación de la exergía, esto es la exergía de la materia tiene dos contribuciones. La primera llamada exergía inercial (E_i), que es asociada con la cantidad de materia independientemente del tipo de materia y se compone por la exergía cinética (E_v), resultante de la velocidad, y la exergía potencial (E_p), resultante de la posición con respecto al campo gravitacional de la tierra.

La segunda contribución a la exergía de la materia se denomina exergía sustancial (E_s), y depende del tipo de materia (de su composición y de sus condiciones de presión y temperatura); la exergía se divide en dos componentes:

- ♦ La exergía física (E_f), debida al alejamiento en temperatura y presión con respecto al estado de referencia.
- ♦ La exergía química (E_q), debida al alejamiento en composición con respecto al estado de referencia.

Los componentes de la energía sustancial se subdividen en varios términos. La exergía física se compone en:

- La exergía térmica (E_t), debida a la temperatura.
- La exergía mecánica (E_m), debida a la presión.

De igual manera la exergía química se compone en dos partes:

- * La exergía reaccional (E_r), que resulta de las reacciones químicas necesarias para producir a partir de la composición de la sustancia, sustancias que existen como componentes estables del estado de referencia.
- * La exergía concentracional (E_{conc}), que resulta de los procesos necesarios para igualar la concentración de componentes obtenidos del estado de referencia, con su concentración real en el estado de referencia.

En procesos químicos, la exergía sustancial reviste la particular importancia (sobretudo en lo que a análisis termoeconómicos se refiere) y es muchas veces conveniente evaluar separadamente los componentes térmico, mecánico y químico de la misma.

De los diferentes tipos de exergía mencionados se pueden integrar de tal manera que la exergía se representa por medio de la fórmula:

$$E = E_v + E_p + E_q + E_c + E_f + E_{ER} \quad (1.1)$$

Donde

$$E_f = (h - h_0) - T_0 * (s - s_0) \quad (1.2)$$

$$E_q = \mu_0 * (n_0 - n) \quad (1.3)$$

$$E_p = g / g_c * (z - z_0) \quad (1.4)$$

$$E_v = v^2 / (2 * g_c) \quad (1.5)$$

$$E_c = \Delta H * \eta_c \quad (1.6)$$

$$E_{EJE} = W_{EJE} \quad (1.7)$$

Haciendo la suposición de que estamos al nivel del suelo y nos movemos a la velocidad de la tierra, la ecuación (1) se reduce a:

$$E = E_f + E_q + E_{EJE} \quad (1.6')$$

Y sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación (1.6') nos resulta:

$$E = (h - h_0) - T_0 * (s - s_0) + \mu_0 * (n_0 - n) + W_{EJE} \quad (1.6'')$$

Para una mejor comprensión de los tipos de exergía, se encuentra la siguiente figura, el cual es un esquema sencillo de los tipos de exergía.

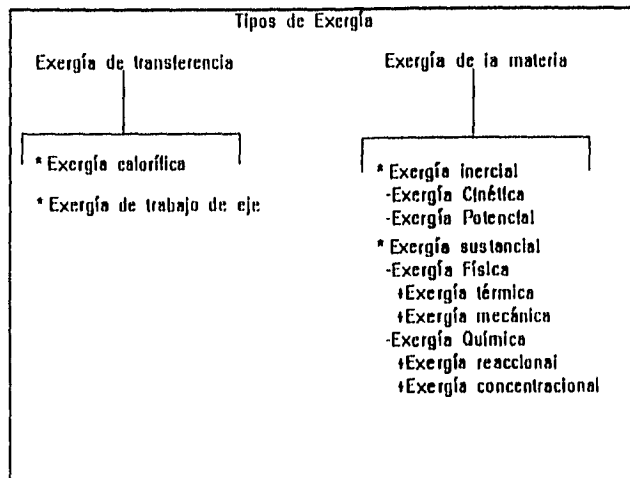


Figura 1.2

1.1.4.1 APLICACIONES DE LOS TIPOS DE EXERGÍA

- Exergía Inercial.

- ◆ Exergía Potencial.

En el caso de que se analice la exergía potencial que como ya se menciona, nos ocupa de aquellos casos que involucra un cambio de posición con respecto al de referencia. Tal como puede ocurrir en una caída de agua, en una presa, etc. Tal como se ejemplifica en la siguiente figura, la cual involucra una caída de agua en una cascada, la cual se encuentra a 2400 ft sobre el nivel del mar, el agua cae hasta un valle, que se encuentra a 100 ft sobre el nivel del mar. En donde la altura de referencia (z_0) es 100 ft sobre el nivel del mar.

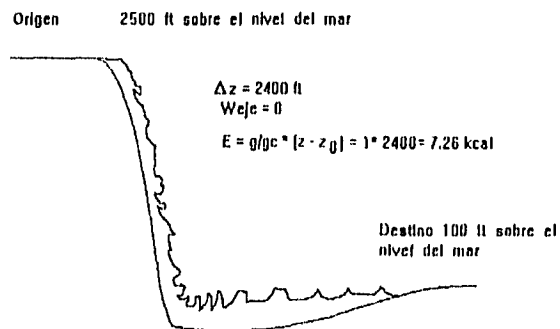


Figura 1.3

Es importante mencionar que los analistas de exergía ponen gran atención en la definición de estado de referencia, mientras que para los analistas de trabajo perdido esto no es objeto de una gran preocupación por parte de ellos. Las controversias que hay sobre la selección apropiada del estado de referencia, son significativas para los analistas de exergía, pero no para los analistas de trabajo perdido.

También este tipo de exergía se presenta en sistemas de flujo de fluidos en los cuales, el fluido cambia su posición que normalmente es de baja cantidad de potencial, y que por medio de un sistema de bombeo es capaz de aumentar este potencial.

◆ Exergía Cinética.

En lo que respecta a la exergía cinética se aplica principalmente es sistemas que tienen un cambio en la velocidad con respecto al de referencia en este caso la velocidad de la tierra.

Un ejemplo de esta situación se presenta en forma objetiva mediante el análisis de un avión supersónico en vuelo, en donde este tiene una velocidad diferente a la de referencia y con el análisis de este tipo de exergía se puede optimizar la velocidad con respecto a la resistencia aerodinámica del avión; otro tipo de aplicación de este tipo de exergía se puede ver su aplicación en el análisis de un eyector que comprende a una geometría de flujo de fluidos en un tubo tipo Venturi.

En donde un tubo tipo Venturi es un dispositivo que diseñado en forma apropiada minimiza la fricción de forma, el cual se observa en la siguiente figura. La forma de líneas de la corriente del medidor elimina virtualmente la separación de la capa límite, de manera que el arrastre de forma es insignificante. La acción del fluido de entrada en el tubo Venturi sufre la transformación de exergía mecánica (debida a la presión) en exergía cinética a causa de que en la vena contracta se presenta la velocidad máxima y la presión mínima.



Tubo "Venturi"

Figura 1.4

- Exergía Química.

La exergía química tiene su principal aplicación en sistemas donde se realicen reacciones de tipo químico.

Una aplicación objetiva de la exergía química es un reactor como se muestra en la siguiente figura. El cual es un reactor catalítico isotérmico, continuo, de flujo estacionario, en estado estacionario, este reactor produce amoníaco a partir de hidrogeno y nitrógeno, donde su estado de referencia es 1 atmósfera y 25° C.

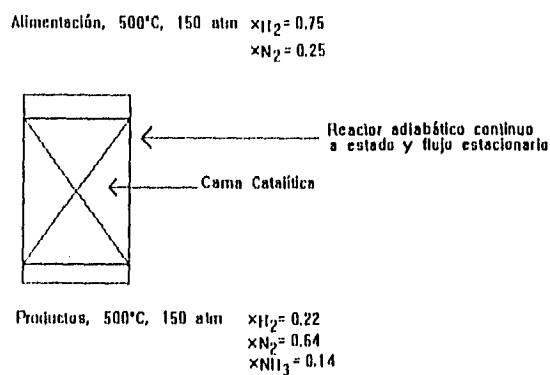


Figura 1.5

- Exergía Física.

Este tipo de exergía esta integrado de los siguientes componentes:

- * Exergía Térmica.
- * Exergía Mecánica.

Como el objetivo de este trabajo es el análisis a detalle de este tipo de exergía, en esta parte del trabajo solo las mencionamos y mas adelante se desarrollara una metodología y secuencia de cálculo.

1.1.4.2 BALANCE DE EXERGÍA

En el presente trabajo el balance de exergía se ejemplifica por la sección de separación y purificación de una planta de Metil-Terbutil-Eter (MTBE), la cual implica en su balance el calculo de la exergía física, ya que el sistema analizado no involucra reacción química, se toma como referencia un nivel de exergía potencial igual a cero y no se encuentra en movimiento el sistema, por lo que las exergías: Química, Potencial y Cinética tienen un valor de cero.

Sin embargo en otros sistemas mas complejos es posible que puedan existir las exergías Física, Química, Potencial y Cinética, que su análisis seria objeto de otro tema diferente al alcance del presente trabajo.

1.1.4.3 LA IMPORTANCIA TERMODINÁMICA DE LA EXERGIA

La importancia termodinámica de la exergía deriva de su mismo significado que es el trabajo potencial, si sabemos el trabajo potencial que puede desarrollar un proceso y sabemos cuanto trabajo realmente desarrollo, podemos saber la verdadera eficiencia del proceso, basándonos en la Segunda Ley de la Termodinámica y no en la Primera que la primera no nos dice que es la energía potencial.

1.1.4.4 LA IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LA EXERGIA

La importancia económica de la exergía se basa en ciertas observaciones fundamentales, las cuales apoyan todo el desarrollo posterior⁶:

- Todos los procesos industriales ocurren a las condiciones terrestres, la cual en términos prácticos es un fuente inagotable de energía, trabajo y materia. Para poder entender esta observación debemos explicar separadamente energía, trabajo y materia.

a) La energía de la atmósfera puede ser incrementada o decrementada por un intercambio de calor.

b) La atmósfera puede realizar una cantidad ilimitada de trabajo o recibir una cantidad ilimitada de trabajo realizado, para expandir o contraer volumen contra la presión.

c) Ciertas especies químicas presentes en la atmósfera pueden ser retiradas, y otras pueden ser depositadas dentro de esta.

Nosotros asimismo que la energía, el trabajo y la materia que puede ser obtenida o descargada de la atmósfera no tiene un valor económico.

- En los procesos industriales existen ciertas sustancias naturales, las cuales no están en equilibrio con la atmósfera. Estas sustancias son llamadas "recursos naturales". Al contrario que en la atmósfera, en el sistema económico en que vivimos se le asigna un valor económico a nuestros recursos naturales, pero hemos descubierto que estos recursos no son inagotables, además de que forzamos esos recursos naturales a cambiar su estado termodinámico en una planta industrial, produciéndose trabajo. Este trabajo es considerado valioso en un sentido netamente económico.
- Cuando a estos recursos naturales se les reduce en su estado termodinámico para estar en equilibrio con la atmósfera, no hay trabajo útil alguno. Al estar los recursos naturales en equilibrio con la atmósfera se le llama "estado muerto" o "estado de referencia".
- El trabajo es disponible por un sistema a expensas de un recurso natural, este trabajo es utilizado para transformar el estado actual de las sustancias de otro sistema a las de la atmósfera, y a este trabajo, se le confiere un valor económico.

En la mayoría de los casos, el concepto de un cambio en el estado termodinámico implica la transformación del estado o naturaleza de las sustancias a través de reacciones químicas. Sin embargo hay un hecho que suele pasarse por alto y es el que no hay una proporción directa entre exergía y un valor económico. Por el hecho de que el valor de la exergía es reducida en vista del avance de las transformaciones energéticas, donde estas transformaciones energéticas tienen un valor económico.

Además la exergía ayuda a tener nuevas soluciones para un problema de optimización de costos, aplicándose con gran éxito en un análisis termoeconómico por dos razones:

1. La eficiencia energética es un índice generalizado de la imperfección del proceso.
2. Sirviendo la exergía como un criterio en la evaluación de las capacidades de las plantas térmicas.

Ahora nos hacemos una pregunta, ¿Si es tan importante la exergía tanto económicamente como termodinámicamente, ¿Porque no se había usado con tanta frecuencia?. Bueno la razón no es tan simple porque por la complejidad, orden y probabilidad implicadas en el concepto de entropía, representa un obstáculo histórico.

Por otro lado no es hasta la crisis energética de los años 70's que no se tiene un uso práctico en América, y recientemente en México debido a la disminución de subsidios en los energéticos primarios, es cuando nace la preocupación por tener procesos más eficientes.

Como referencia, se puede mencionar que en los años 60's en Austria se realizó por primera vez un balance de exergía a nivel nacional, para disminuir los consumos energéticos, pues Austria es un país que no cuenta con grandes recursos de energéticos primarios.

1.2 QUE ES LA TECNOLOGÍA PINCH.

1.2.1 ANTECEDENTES Y PROBLEMATICA DE LA TECNOLOGÍA PINCH.

a) ANTECEDENTES

La Tecnología Pinch fue creada en los años 70's por Bodo Linhoff⁶ con un objetivo inicial, el cual era para definir las oportunidades de ahorro de energía de los servicios auxiliares (vapor de calentamiento o agua de enfriamiento) y mejorar el diseño de redes de intercambio de calor.

Actualmente la Tecnología Pinch en Estados Unidos de América tiene 15 años de aplicación industrial, principalmente en la Industria Química de Proceso (IQP) que se integra por las siguientes industrias¹³:

- 1) Cemento, Acero, Fibras y Textiles.
- 2) Pulpa y Papel.
- 3) Comida y Bebidas.
- 4) Químicos y Farmacéuticos.
- 5) Petróleo.

En estas industrias de los Estados Unidos se han obtenido ahorros de energía en un rango de 20 a 40% y ahorros hasta de 3.4 millones de dólares de 1993¹³. Sin embargo en México no se ha aplicado esta tecnología en forma amplia a toda la industria de proceso, teniéndose inicios de su aplicación desde aproximadamente diez años en la industria del Petróleo y parcialmente en la Petroquímica.

Lamentablemente por las limitaciones que todos ya conocemos en México no se tienen estadísticas confiables de los ahorros logrados por la incipiente aplicación de esta Tecnología.

b) PROBLEMATICA DE LA TECNOLOGIA PINCH

La Tecnología Pinch originalmente tenía como objetivo primordial el de optimizar las redes de intercambio de calor mediante los siguientes principios:

- **Requerimientos mínimos de energía.**

Debido a que deben cumplirse con las cantidades mínimas de vapor de calentamiento y agua de enfriamiento para que funcione la red de intercambio de calor al mínimo costo.

- **Número mínimo de unidades.**

Se debe tener un número mínimo de intercambiadores de calor, para que se enfríen las corrientes calientes y se calienten las corrientes frías, optimizando el área de transferencia. Así mismo, el número mínimo de intercambiadores deberán contar con un máximo de carga térmica, para así enfriar o calentar más rápidamente.

- **Área mínima de red de intercambio de calor.**

Debido a que se tenía que contar con un número mínimo de intercambiadores, el área total debía de ser la mínima.

e) DESARROLLO

Actualmente la Tecnología Pinch ya no solo se limita a optimizar el diseño de redes de intercambio de calor sino que ha tenido nuevos desarrollos¹⁰ como:

- * **Optimización de la caída de presión.**

Originalmente en la Tecnología Pinch no se tomaba en cuenta las caídas de presión en la red de intercambio de calor.

- * **Diseño de un caso multibase.**

Porque la metodología de la Tecnología Pinch fue inútil en casos reales de diseños flexibles que son los más comunes.

- * **Perfiles de una Columna de Destilación.**

Debido a que en una Columna de Destilación no solo se da una transferencia de masa, sino también se da una transferencia de calor.

- * **Diseño de Procesos a Temperatura.**

Esto es para los procesos criogénicos requieren de grandes cantidades de energía para trabajar a bajas temperaturas, esto es a temperaturas muy por abajo de la temperatura ambiente.

- * **Integración de los Procesos Batch.**

Estos son procesos muy comunes en la industria Farmacéutica, Comidas y Bebidas.

- * **Pinch del Uso del Agua.**

El agua y los efluentes acuosos son problemas en el diseño de la integración de procesos y que es necesario minimizar.

*** Integración Global.**

Trata la integración energética total del proceso con la infraestructura óptima de los servicios auxiliares.

*** Reducción de Emisiones.**

Cada vez más son más estrictas las regulaciones ambientales y la IQP aprovecha la Tecnología Pinch para reducir el número y cantidad de emisiones contaminantes, de esta manera la reducción de emisiones se ha convertido en un objetivo primordial.

1.2.2 FUNDAMENTOS TERMODINAMICOS Y REGLAS DEL PINCH.

La Tecnología Pinch trata de cumplir con la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica, pero en principio solo se conforma con satisfacer la Primera Ley y satisface la Segunda Ley haciendo "circuitos" para cumplir con esta.

Ahora cuales son los pasos de esta tecnología:

- 1) Conocer todas las corrientes frías y calientes disponibles o requeridas por el procesos así como sus temperaturas iniciales y finales.
- 2) Conocer los calores específicos a presión constante (C_p) de todas las corrientes (en la Tecnología Pinch los C_p 's son constantes).
- 3) Conocer los flujos a manejar.
- 4) Se asigna una ΔT entre las corrientes calientes y las corrientes frías.
- 5) Se obtienen los valores de las entalpías tanto de las corrientes frías como calientes por medio de la ecuación:
$$H = FC_p(T_i - T_{i,1}) \quad (1.8)$$
- 6) Se grafican los valores de H contra T de la suma de las corrientes frías y la suma de las corrientes calientes obteniéndose la gráfica que se llama "Curva Compuesta".
- 7) Se identifican las coordenadas $(H, T)_{MAX}$ de la curva que resulta de la suma de las corrientes frías se traza un línea vertical hasta las coordenadas $(H, T)_{MAX}$ de curva que resulta de la suma de las corrientes calientes, se calcula la diferencia de la entalpías conociéndose así el requerimiento de calentamiento.
- 8) Se identifican la coordenadas $(H, T)_{MIN}$ de la curva resultante de la suma de las corrientes frías y como la curva de la suma de las corrientes calientes empiezan con coordenadas $(0, T)$, el requerimiento de enfriamiento lo marca la H_{MIN} de la curva resultante de la suma de corrientes frías.
- 9) De la gráfica de la curva compuesta, se identifica la menor diferencia de las coordenadas (H, T) entre las curvas de las corrientes frías y calientes a una $H = \text{etc.}$, ahí se identifica como ΔT_{PINCH} es en ese punto, donde no hay transferencia de calor entre las corrientes calientes y frías.
- 10) Se proponen diferentes tipos de arreglos de la red de intercambio de calor para ver si se disminuyen las cargas térmicas de calentamiento y enfriamiento al mínimo.

De ahí que la curva compuesta se divide en partes:

◊ Arriba del Pinch.

Esto es la zona superior de las dos curvas donde se encuentra el ΔT_{PINCH} .

◊ Abajo del Pinch

Es la zona inferior de las dos curvas donde esta el ΔT_{PINCH} .

Es a partir de esta clasificación que se obtienen los criterios de optimización que dentro de la Tecnología Pinch son llamadas las tres reglas de oro:

I. No transferir calor a través del Pinch.

II. No usar agua de enfriamiento arriba del Pinch.

III. No usar vapor de calentamiento abajo del Pinch.

Pero, esto no es suficiente para encontrar un mejor arreglo de la red de intercambio de calor, es por eso que utiliza otro criterio para encontrar el arreglo óptimo y este se aplica a la red existente.

El criterio empleado se llama **El Principio del Más y Menos** que también es de suma importancia en la optimización de las energías intercambiables.

- 1) Incrementar las cargas de las corrientes calientes arriba del Pinch (Más).
- 2) Decrementar las cargas de las corrientes frías abajo del Pinch (Menos).
- 3) Decrementar las cargas de las corrientes calientes abajo del Pinch (Menos).
- 4) Incrementar las cargas de las corrientes frías abajo del Pinch (Más).

Para una mejor explicación tomemos un ejemplo de la bibliografía¹⁹ y desglosémoslo:

En un proceso identificado mediante el diagrama de bloques de la figura 1.6 existen cuatro corrientes con las siguientes características:

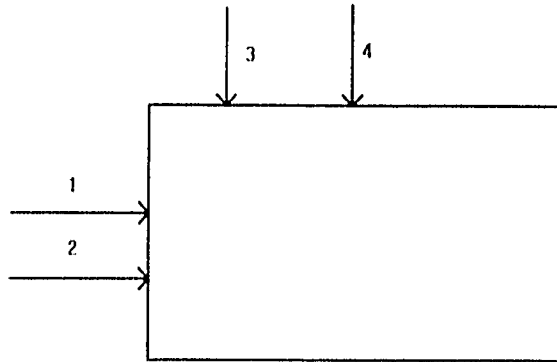


Figura 1.6

Tabla 1.2

No. Corriente	de Condición	F(lb / hr)	T_1 (°F)	T_2 (°F)	C_p (MBtu / lb hr °F)	FC_p (Btu / hr °F)
1	Caliente	1000	250	120	1E-3	170
2	Caliente	4000	200	100	1E-3	400
3	Fría	3000	90	150	1E-3	300
4	Fría	6000	130	120	1E-3	600

1) Como un primer paso calculamos el calor de cada corriente y la suma total:

Tabla 1.3

No. de Corriente	Q (MBtu/hr)
1	1 * (250 - 120) = 130
2	4 * (200 - 100) = 400
3	3 * (90 - 150) = -180
4	6 * (130 - 190) = -360
Suma de calor de todas las corrientes	130 + 400 - 360 - 180 = -10

Esta diferencia de -10 MBtu/hr debe conservarse en los requerimientos de los servicios auxiliares (Agua de Enfriamiento y Vapor de Calentamiento).

2) En el siguiente paso seleccionamos un ΔT_{MIN} para la comparación de las corrientes frías y calientes, el ΔT_{MIN} según la Tecnología Pinch puede ser cualquiera en donde el costo de área de transferencia sea mínimo, pero industrialmente se usa un ΔT_{MIN} de 10° debido a que los intercambiadores de calor usados serían de 1-2 pasos, y por lo tanto, el costo de estos intercambiadores sería menor que el de cualquier otro tipo.

3) Después se realiza un diagrama con todas las corrientes y sus temperaturas iniciales y finales, este diagrama se le ha llamado "Diagrama cascada" (Fig. 1.7).

FCp	1	4	3	6
		250		240
		200		190
		150		140
		100		90

Figura 1.7

3) Se realiza un balance de entalpías, tanto de las corrientes calientes como de las corrientes frías, de la siguiente manera de la Figura 1.7, tomamos la menor temperatura de corrientes calientes que es 100°F se aplica la ecuación (1.8) que dice:

$$H = FC_p (T_i - T_{i-1})$$

El FC_p de la corriente 2, es $4(\text{MBtu/hr } ^{\circ}\text{F})$, la T_i y T_{i-1} es 100°F .

De manera que nos resulta una entalpía igual a 0.

$$H = 4 * (100 - 100) = 0 \text{ MBtu/hr}$$

La siguiente temperatura a tomar es 120°F , el FC_p sigue siendo el de la corriente 2 ($4000 \text{ Btu/hr } ^{\circ}\text{F}$), T_i es 120°F y la T_{i-1} es 100°F por ser la temperatura inmediata inferior, así aplicando la ecuación (1.8) nos resulta:

$$H = 4 * (120 - 100) = 80 \text{ MBtu/hr}$$

De esta manera podemos llenar la siguiente tabla:

Tabla 1.4

Corrientes Calientes

T (°F)	H puntual (MBtu / hr)	H acumulada (MBtu / hr)
100	$4000 * (100 - 100) = 0$	0
120	$4000 * (120 - 100) = 80$	80
140	$(1000 + 4000) * (140 - 120) = 100$	180
160	$(1000 + 4000) * (160 - 140) = 100$	280
200	$(1000 + 4000) * (200 - 160) = 200$	480
250	$1000 * (250 - 200) = 50$	530

La entalpía acumulada es la suma de todas y cada una de las entalpías puntuales a la que le daremos un uso posterior.

Para las corrientes frías se aplica de igual manera, más hay un detalle que aclarar, que es que en la primera etapa puntual, el cual es que a la temperatura de 90° F se asume que T_1 es 110° F, El F_{cp} es el de la corriente 3(3000 Btu / hr °F) de manera que la ecuación (1.8) queda de la siguiente manera:

$$H = 3 * (110 - 90) = 60 \text{ MBtu / hr}$$

Esta entalpía se le asigna a la temperatura de 90° F por ser la entalpía latente en la corriente 3, por lo cual nos queda una tabla de la siguiente manera:

Tabla 1.5

Corrientes Frías

T (°F)	H Puntual (MBtu / hr)	H Acumulada (MBtu / hr)
90	60	60
130	$3 * (130 - 90) = 120$	180
150	$(3 + 6) * (150 - 130) = 180$	360
190	$6 * (190 - 150) = 240$	600

4) Una de las más importantes gráficas de la Tecnología Pinch es la gráfica de Curva Compuesta en donde se grafican las entalpías acumuladas de las corrientes frías y calientes, que calculamos anteriormente en el balance de entalpías contra el rango de temperaturas del proceso. Las entalpías acumuladas se grafican por separado, esto es las Corrientes Frías y las Corrientes Calientes, para de esta manera poder saber a que entalpía se encuentra el ΔT_{PINCH} , esto es el ΔT_{MIN} de toda la red de intercambio de calor.

Para dejar esto más claro observemos la gráfica de la Curva Compuesta del presente ejemplo (Fig. 1.8).

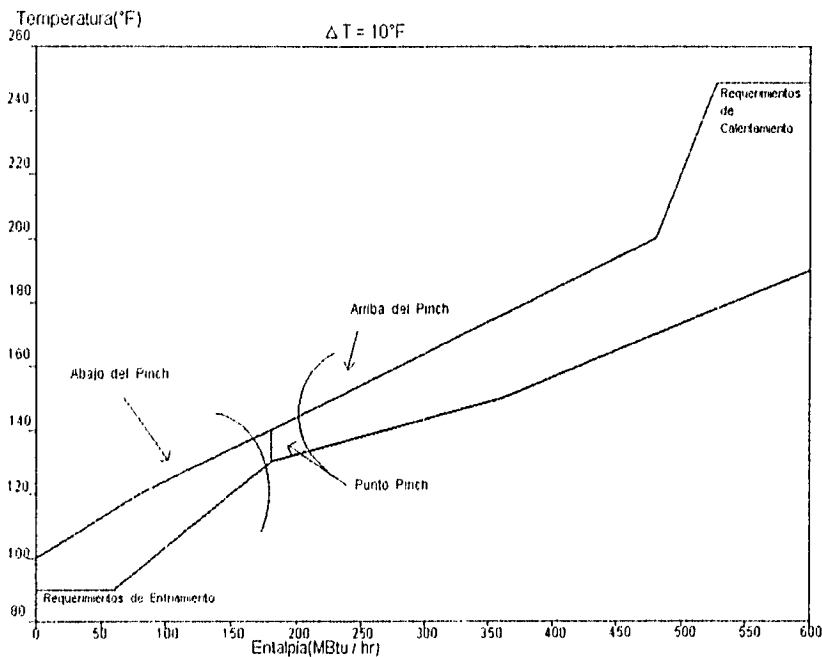


Figura 1.8

Si observamos con cuidado, aproximadamente a una entalpía de 180 MBtu/hr se da el punto Pinch que es de 10° F, arriba de este punto solo se calienta obedeciendo una de las reglas de oro de la Tecnología Pinch, abajo de el punto Pinch hay que enfriar siguiendo las reglas anteriormente mencionadas.

5) Ahora bien hay otra gráfica que nos ayuda a conocer donde esta el punto Pinch, es la gráfica llamada Gran Curva Compuesta.

Esta se compone de los promedios de las temperaturas y diferencia de las entalpías de las corrientes frías y las corrientes calientes, tomemos del presente ejemplo una temperatura dada para las dos corrientes:

Tabla 1.6

$T_c(^{\circ}F)$	$T_r(^{\circ}F)$	$T_p(^{\circ}F)$	$H_c(\text{MBtu/hr})$	$H_r(\text{MBtu/hr})$	$(H_c - H_r)(\text{MBtu/hr})$
160	150	155	100	180	80

De esta manera se gráfica la temperatura promedio (T_p) contra la resta de las entalpías, hay que hacer notar que abajo del Pinch es ($H_r - H_c$), pero arriba del Pinch es ($H_c - H_r$).

Lo observamos de una mejor manera en la gráfica correspondiente (Fig. 1.9).

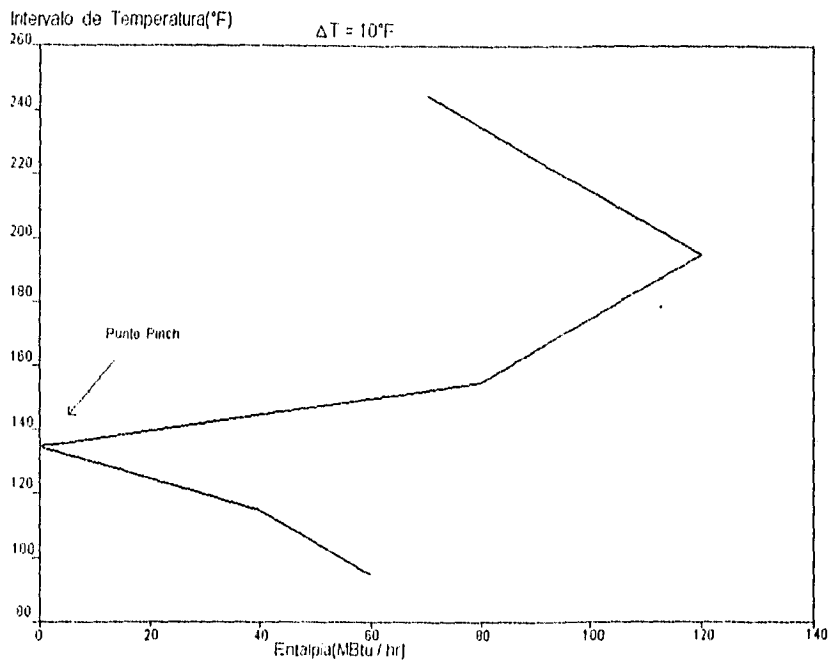


Figura 1.9

6) Ahora para cumplir con la Primera Ley de la Termodinámica surge la siguiente ecuación:

$$\text{No. de Int. de Cal.} = \text{No. de Corr.} + \text{No. de Servicios} \quad (1.9)$$

Para este caso la ecuación (1.9) se cumple de siguiente manera:

$$\text{No. de Int. de Cal.} = 4 + 2 - 1$$

$$\text{No. de Int. de Cal.} = 5$$

7) Para cumplir la Segunda Ley de la Termodinámica, el problema se divide en dos partes:

- Abajo del Pinch.

Esto es a una entalpía menor que en donde se da el punto Pinch.

- Arriba del Pinch.

Es a una entalpía mayor que donde se da el punto Pinch.

La ecuación a manejar en ambas zonas es la ecuación (1.9).

- Abajo del Pinch.

$$\text{No. de Int. de Cal.} = 3 + 1 - 1$$

$$\text{No. de Int. de Cal.} = 3$$

- Arriba del Pinch

$$\text{No. de Int. de Cal.} = 4 + 1 - 1$$

$$\text{No. de Int. de Cal.} = 4$$

8) Para hacer cumplir ambas leyes se toma el número mínimo de intercambiadores de calor, el cual es número de intercambiadores calculados en el paso 6), pero para cumplir con el paso 7) se realizan "circuitos" que cruzan el Pinch y así no violar las reglas de oro antes mencionadas, pero, ¿Que es un circuito?

Un circuito es una serie de conexiones que pueden ser dibujadas entre los intercambiadores de una red, esto quiere decir que un "circuito" es una cantidad de calor que fluye a través de la red de intercambiadores. Un circuito comienza en un

intercambiador de la red de intercambio de calor, para regresar al mismo intercambiador. Así mismo en un circuito puede entrar un servicio de calentamiento o enfriamiento. Para hacer un circuito surge una regla común que es la siguiente: "Por cada circuito agregamos un intercambiador".

Para cumplir lo referente a la red de mínima energía, se usa un sistema de comparación de corrientes, cuidando de no violar el ΔT_{PINCH} hasta tener el arreglo donde los servicios de calentamiento y enfriamiento en sus cargas térmicas sean mínimas siguiendo estas dos reglas¹⁹:

- ◆ Arriba del Pinch: $F_c C_{p_c} \leq F_r C_{p_r}$
- ◆ Abajo del Pinch: $F_c C_{p_c} \geq F_r C_{p_r}$

Para entender estas reglas un poco mas claro regresemos a nuestro ejemplo y comparemos la corriente 2 con la corriente 4 y la corriente 1 con la corriente 4, se toma la carga térmica de la corriente 4 por la regla antes mencionada (Fig. 1.10).

$$Q = 240 \text{ MBtu/hr} = 4 * (T_c - 140)$$

$$T_c = 200 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_r = 190 \text{ }^\circ\text{F}$$

Cumple el ΔT_{PINCH} , la comparación es viable.

Seguimos el mismo procedimiento para comparar la corriente 1 con la corriente 4. Después que se transfirió calor de la corriente 2 a la corriente 4, esto es unos 240 MBtu/hr, debemos saber el calor que todavía se le tiene que suministrar a la corriente 4 para llegar a la temperatura deseada (190 °F).

$$Q_{FALTANTE} = 360 - 240 = 120 \text{ MBtu/hr}$$

El calor que suministra la corriente 1 es la siguiente:

$$Q_1 = 1 * (250 - 140) = 110 \text{ MBtu/hr}$$

$$Q_{\text{FALTANTE}} = 120 \text{ MBtu/hr} = 6 * (T_f - 140)$$

$$T_f = 160 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_c = 250 \text{ }^\circ\text{F}$$

Se viola el ΔT_{PINCH} y por lo tanto debe hacerse otra comparación que cumpla el ΔT_{PINCH} .

Quedando el arreglo de intercambiadores arriba y abajo de Pinch como se puede observar en la figura 1.11.

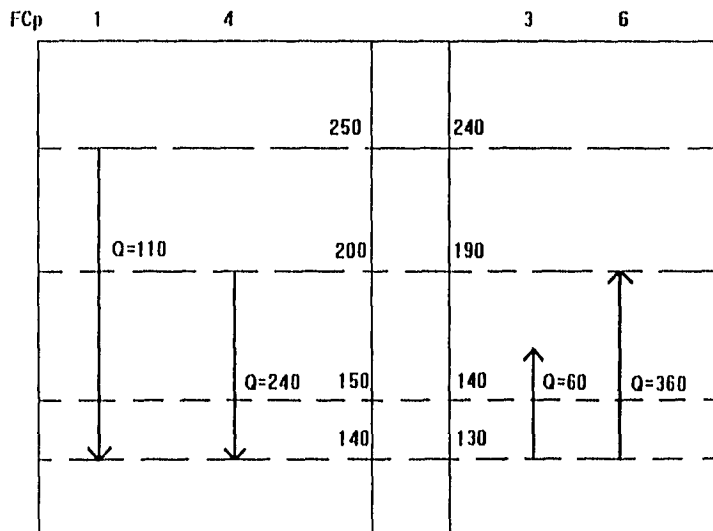


Figura 1.10

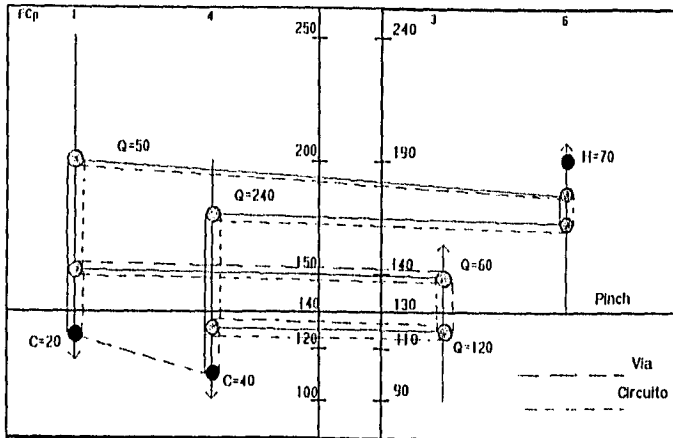


Figura 1.11

9) Para romper un circuito dentro de la red de intercambio de calor, debemos de tomar en cuenta las siguientes reglas:

- Romper un "circuito en el cual se incluya el intercambiador con la carga térmica más pequeña posible.
- Siempre hay que quitar la carga térmica más pequeña del circuito.
- Si se rompe un circuito que cruza el punto Pinch, normalmente se viola el ΔT_{PINCH} en la red.

Para entender como es un "circuito" podemos observar la Figura anterior (Fig. 1.11), junto con su camino.

De esto último surge otra pregunta ¿Que es un camino?.

Un camino es una vía, en la cual se conectan un intercambiador con servicio de calentamiento y un intercambiador con servicio de enfriamiento, así, como también puede ser un intercambiador con servicio de enfriamiento y un intercambiador con servicio de calentamiento, o un intercambiador de un servicio de calentamiento y un intercambiador con servicio de calentamiento.

10) Para reducir el número de intercambiadores de calor, debemos seguir ciertas reglas básicas:

- 1) El número de intercambiadores requerido para el proceso global es siempre menor o igual que la red de energía mínima.
- 2) Si se usa la red de energía mínima, entonces habrá circuitos que cruzan el punto Pinch.
- 3) Podemos romper los circuitos que cruzan el punto Pinch, pero, violamos el ΔT_{PINCH} .
- 4) Para no hacer esta violación se ajusta la carga térmica a través de un camino, con lo cual se incrementa el consumo de energía del proceso.

Siguiendo estas reglas la red de nuestro ejemplo nos resulta como se ve en la siguiente figura (Fig. 1.12)

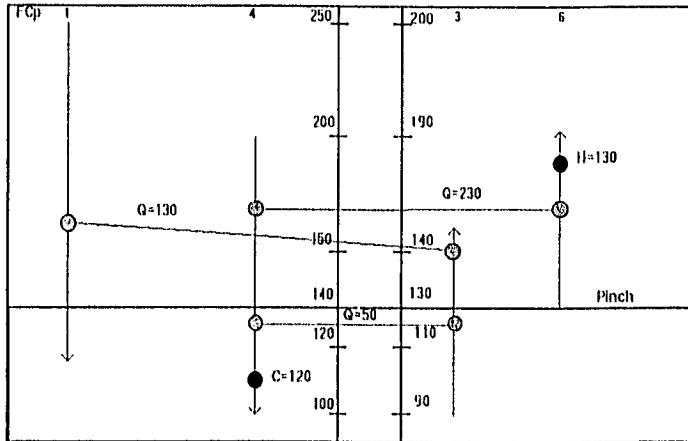


Figura 1.12

Esto es una breve descripción ejemplificada y resumida de todo lo extenso que puede optimizarse con la Tecnología Pinch, además de que esta descripción nos sirve para entender en toda su magnitud lo que vamos a referirnos en el subcapítulo posterior, pero si se necesita saber más sobre la Tecnología Pinch, consulte la bibliografía citada.

1.3 RELACIÓN ENTRE EXERGÍA Y TECNOLOGÍA PINCH

1.3.1 FUNDAMENTOS

Como vimos en el subcapítulo anterior la Tecnología Pinch ha tenido un gran impacto tanto a nivel industrial, en el diseño de procesos de redes de intercambio de calor, su uso en la optimización de procesos, evaluación a nivel energético de proyectos industriales. Además del gran valor que tiene desde el punto de vista de conocimiento sobre la optimización energética para la comunidad académica.

Su aceptación ha sido a nivel mundial, por lo que en sus 15 años de aplicación industrial, ha tenido un desarrollo internacional, partiendo de los desarrollos originales de Bodo Linhoff hacia una mejora continua de esta Tecnología^{9,10,11,13,14}.

Una de estas mejoras incluye un análisis que corresponde al título de este subcapítulo, y esta es el análisis combinado de Exergía y Tecnología Pinch. Como hemos visto la exergía no ha tenido el mismo éxito que tiene la Tecnología Pinch, esto se debe principalmente por las razones económicas antes mencionadas.

1.3.2 DESARROLLO DEL ANÁLISIS COMBINADO DE EXERGÍA Y TECNOLOGÍA PINCH.

El hacer este análisis combinado, responde a la necesidad de hacer una herramienta más fácil y más poderosa de usar, para así llegar a nuestro objetivo último:

"Sistemas de proceso, donde haya la utilización de la máxima cantidad de exergía con la mínima cantidad de energía."¹⁴

En un principio el análisis combinado resuelve los problemas de sistemas para proveer de calor y potencia, pero, debido al uso tan extenso de la Tecnología Pinch en la IQP y a la utilidad tan amplia que se le puede dar a la exergía en la IQP, podríamos aplicar este análisis a cualquier proceso de la IQP.

Para comprender mejor lo anterior se debe explicar en que consiste este Análisis Combinado de Exergía y Tecnología Pinch (ACETP).

Los fundamentos del ACETP están basados en las siguientes ecuaciones:

$$E = \Delta H * \eta_c \quad (1.6)$$

donde a una temperatura y presión constante:

$$E = \Delta H * (1 - (T_0 / T)) \quad (1.10)$$

ahora que a presión constante:

$$E = \Delta H * (1 - (T_0 - T_{LM})) \quad (1.11)$$

donde

$$T_{LM} = ((T_r - T_i) / \ln(T_r / T_i)) \quad (1.12)$$

Todo esta formulación es para una corriente de proceso.

Toda la formulación anterior se representa en un diagrama en el cual el Factor de Carnot(η_c) vs Entalpía(H), dando una curva, donde el área bajo la curva es la exergía.

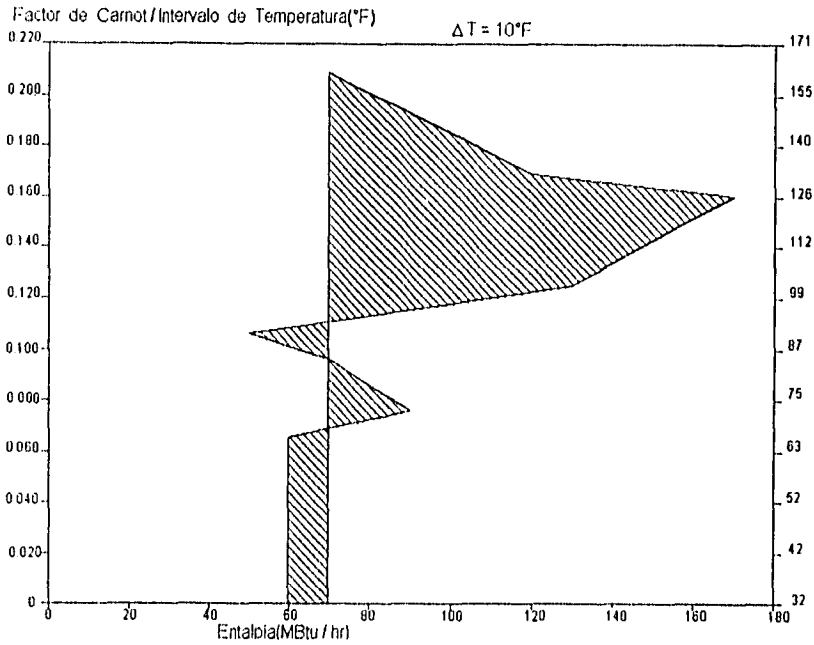


Figura 1.13

Pero, en el anterior diagrama no se toma en cuenta las pérdidas de exergía en un proceso de intercambio de calor($T_0 * \Delta S$).

El análisis tiene como los objetivos siguientes:

- 1) Encontrar el arreglo de una red o sistema de intercambio de calor donde se utilice la mínima cantidad de energía y la máxima cantidad de exergía.
- 2) Localizar las pérdidas de exergía, cuantificarlas y minimizarlas, para obtener la máxima cantidad de exergía utilizable.

Este análisis no solo responde a las reglas de la Tecnología Pinch antes mencionadas, sino que también obedece a la regla de la exergía que hace válido este análisis, la cual postula que siempre y cuando haya un desequilibrio entre las condiciones del proceso (T, P) y las condiciones del estado de referencia donde se

lleve a cabo el proceso (T_0, P_0) , entonces habrá una cierta cantidad de exergía que puede ser aprovechable.

Asimismo el ACETP nos ayudará a mostrar con una mayor facilidad la utilidad de los balances de exergía en la optimización técnica de los procesos, cosa que demostraremos más adelante en capítulos posteriores.

1.4 GLOSARIO DE TÉRMINOS

E	Flujo exergético
z	Altura
Cp	Capacidad calorífica
Δ	Diferencial
h	Entalpía específica
s	Entropía específica
Ec	Exergía calórica
Ev	Exergía cinética
E _{EJE}	Exergía de trabajo de eje
Ef	Exergía física
Ep	Exergía potencial
Eq	Exergía química
η_c	Factor de Carnot
Q	Flujo calorífico
H	Flujo entálpico
F	Flujo másico
g	Fuerza gravitacional
n	Número de moles
μ	Potencial Químico
P	Presión
T	Temperatura
v	Velocidad

1.4.2 Subíndices

0	Estado de referencia
i	i-ésima
MAX	Máximo
MIN.	Mínimo
f	Frío
C	Caliente

1.4.3 Superíndices

1...n	Referencias bibliográficas
-------	----------------------------

2. RELACIÓN ENTRE LOS BALANCES DE EXERGIA Y LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS.

2.1 BALANCES Y ANÁLISIS DE EXERGIA

2.1.1 EL PAPEL QUE JUEGAN LOS BALANCES DE EXERGIA EN LA OPTIMIZACION DE PROCESOS.

Los balances de exergía no ha tenido un papel relevante en la optimización de los procesos, aunque su importancia es reconocida en el diseño, optimización y su utilización industrial.

Pero, debido a que el uso acostumbrado e intensivo de los balances de materia y energía esta demasiado arraigado por los ingenieros químicos especializados en la optimización de procesos.

El papel que debería desempeñar los balances de exergía, no es más importante que el desempeñan los balances de materia y energía.

Para la optimización, los balances de materia y energía nos ofrecen una cantidad limitada de diseños óptimos para ser implementados, pero, los balances de materia y energía conjuntados con los balances de exergía no nos ofrecen cierta cantidad de diseños óptimos, sino que nos otorgan el diseño óptimo, el cual sea técnicamente viable y energéticamente eficiente.

Esto haría de la optimización de los procesos, una rama de la Ingeniería Química, mucho más dinámica, tratando de resolver los problemas de optimización, con nuevas formas de solución, y nuevas tecnologías.

2.1.2 HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA DE LOS BALANCES DE EXERGIA.

2.1.2.1 HERRAMIENTAS

Al igual que los balances de materia y energía, el análisis de los balances de exergía tienen ciertas herramientas que le ayudan a encontrar la solución a los problemas de optimización y estas son:

1) Se realizan los balances de exergía de todas y cada una de las corrientes de proceso, escribiéndose de la siguiente forma:

$$E_{\text{transportada}} = E_{\text{destruida}} \quad (2.1)$$

cuando hay un estado estacionario se utiliza la ecuación anterior(2.1)

2) Las relaciones de Transporte correlacionan una propiedad de uno o varios de los componentes con el flujo de exergía como por ejemplo:
el de la entropía:

$$E_s = \Delta T * F_s \quad (2.2)$$

3) Las relaciones cinéticas que concierne a reactivos, productos o transporte de uno o varios componentes con las fuerzas directrices. Tales relaciones son:

$$Q = N * A * \Delta T_{LM} \quad (2.3)$$

ó

$$r_A = k_A * C_s^n \quad (2.4)$$

4) Relaciones de propiedades termoestáticas

Estas son las relaciones de propiedades para un componente en específico, ya sea S a (T, P) , H a (T, P) , ΔH_{FSTD} .

2.1.2.2 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA EXERGIA

Para cumplir con el balance de exergía para un sistema o proceso se utiliza una ecuación:

$$E_{ENTRADA} = E_{SALIDA} + E_{DESTRUIDA} \quad (2.5)$$

para poder conocer toda la exergía que entra, sale o es destruida a continuación se describen los diferentes tipos de exergía.

- Exergía mecánica

Esta, casi siempre es la exergía de eje de la cual se expresa así:

$$E_{EJE} = (\omega - \omega_0) * \tau \quad (2.6)$$

donde la velocidad angular del estado de referencia (ω_0) es cero debido a que es la velocidad angular de la tierra y se toma que es cero en términos industriales, de manera que la exergía de eje se expresa así:

$$E_{EJE} = \omega * \tau \quad (2.7)$$

la cual es igual a la expresión de trabajo de eje y por lo tanto:

$$E_{EJE} = W_{EJE} \quad (2.8)$$

- Exergía física

Con la cual conocemos la exergía entre el estado a la cual esta la materia (T, P) con la su estado muerto (T₀, P₀).

$$E_F = (h - h_0) - T_0 * (s - s_0) \quad (1.2)$$

- Exergía química

La que nos lleva a conocer la exergía liberada por una reacción química.

$$E_Q = \mu_0 * (n_0 - n) \quad (1.3)$$

- Exergía potencial

Esta nos calcula la exergía que se puede liberar si hay una diferencia de alturas entre el sistema y el nivel de referencia, que por lo regular es el nivel del suelo.

$$E_P = g * (z - z_0) \quad (1.4)$$

- Exergía cinética

Nos da a conocer la exergía debido a la diferencia de velocidad entre el sistema y el estado muerto o de referencia.

$$E_C = (v - v_0)^2 / 2 \quad (1.5)$$

- Exergía calorífica

Con ello conocemos la exergía que se transfiere en una red de intercambio de calor, que nos relaciona la entalpía y factor de Carnot.

$$E_T = \Delta H * \eta_c \quad (1.6)$$

Excepto la exergía de trabajo y la exergía calorífica que son funciones de transferencia, porque transfieren exergía que se convierte en trabajo y calor respectivamente. Todas las demás exergías son funciones de estado, puesto que son dependientes de propiedades intensivas de los componentes.

2.1.2.3 METODOLOGIA DE LOS BALANCES DE EXERGIA

Antes de describir la metodología de los balances de exergía, se contemplan 3 puntos de una gran importancia para la metodología:

- 1) Descripción en de Bloques
- 2) Pérdidas de Exergía
- 3) Potencial de Mejoramiento

1) Descripción en Bloques

Esta descripción postula que un equipo o conjunto de equipos pueden englobarse dentro de una caja negra o bloque, donde solo se sabe que es lo que entra y que lo que sale en materia, calor y trabajo. Lo único que sabemos del bloque o caja negra es el que se dan 4 tipos de interacciones que se dan en la exergía, las cuales mencionamos anteriormente.

2) Pérdidas de exergía

Las pérdidas de exergía pueden dividirse en dos partes:

- Pérdidas que se dan dentro del sistema o del bloque (Irreversibilidades).
- Pérdidas que se dan afuera del sistema o del bloque (Efluentes).
- Pérdidas que se dan dentro del sistema o del bloque (Irreversibilidades).

Estas pérdidas son el resultado de la diferencia de la suma de exergía que entra al sistema o bloque y la suma de exergía que sale del sistema. Estas pérdidas son claves para el método de bloques, pero, ¿Como se expresan?

Se expresan por el teorema de Gouy-Stodola

$$I_{IT} = \Sigma E_{ENTRADA} - \Sigma E_{SALIDA} = T_0 * \Delta S \quad (2.9)$$

- Pérdidas que se dan afuera del sistema o del bloque (Efluentes)

Toda aquella exergía que debido al proceso es transferida al medio ambiente se le define como efluente.

Para cuantificar estas pérdidas se debe conocer las condiciones del estado de referencia del sistema y a ascende la diferencia de las condiciones del sistema con respecto al estado de referencia.

$$E_{fl} = \Sigma E_{ARROJADO AL MEDIO AMBIENTE} \quad (2.10)$$

Para conocer las pérdidas totales de exergía se suman irreversibilidades y efluentes.

$$Per_{Ex} = Irr + Efl \quad (2.11)$$

Si en un momento dado queremos conocer la exergía utilizable que sale del sistema se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{UTIL} = \Sigma E_{SALIDA} - Efl \quad (2.12)$$

De esta forma el balance de exergía se expresa así:

$$E_{ENTRADA} = E_{UTIL} + Irr + Efl \quad (2.13)$$

ó

$$E_{ENTRADA} = \Sigma E_{SALIDA} + Irr$$

ó

$$E_{ENTRADA} = E_{UTIL} + Per_{Ex}$$

El teorema de Gouy-Stodola postula que para un sistema compuesto por n bloques, las pérdidas totales de exergía son la suma de las pérdidas exergéticas de cada bloque.

Para evaluar las pérdidas de exergía, con respecto a una medida absoluta y bajo ciertas convenciones se toma en cuenta los siguientes parámetros:

- Eficiencia
- Efectividad
- Rendimiento

- Eficiencia

Se define como el coeficiente de la exergía que sale del sistema entre la exergía que entra al sistema.

$$\eta = \Sigma E_{\text{SALIDA}} / \Sigma E_{\text{ENTRADA}} \quad (2.14)$$

ó

$$\eta = 1 - (I_{\text{rr}} / \Sigma E_{\text{ENTRADA}}) \quad (2.15)$$

Este parámetro no considera a toda exergía que sale como un producto útil, ni tampoco a toda exergía que entra como un combustible. Es por eso que se requiere otro parámetro.

- Efectividad

Se define como un coeficiente de la exergía que sale del sistema como corrientes de proceso entre la exergía que entra al sistema como corrientes de proceso más la exergía que entra como trabajo

$$\varepsilon = (\Sigma E_{\text{CORR. SALIDA}} / \Sigma E_{\text{CORR. ENTRADA}}) + E_{\text{EJE}} \quad (2.16)$$

Los parámetros anteriores se aplican para cualquier sistema, pero para análisis muy particulares se utiliza un parámetro más.

- Rendimiento

Este parámetro es un coeficiente de la exergía útil que sale del sistema entre la exergía que entra al sistema

$$\xi = E_{\text{UTIL}} / \Sigma E_{\text{ENTRADA}} \quad (2.17)$$

ó

$$\xi = 1 - \text{Per}_{\text{EX}} / \Sigma E_{\text{ENTRADA}}$$

3) Potencial de Mejoramiento

Este es uno de los parámetros más importantes, porque de este se conoce el como mejorar el sistema a través de la optimización de las irreversibilidades del sistema, la efectividad del sistema, así como de los efluentes que son enviados al medio ambiente expresándose así:

$$\text{Pot} = \text{Irr} * (1 - \epsilon) + \text{Efl} \quad (2.18)$$

La ecuación (2.18) se divide en tres potenciales:

a)Potencial Interno

Representado por las irreversibilidades(Irr) para poder optimizar el sistema desde adentro.

b)Potencial Externo

Esta representado por los efluentes de exergía que van al medio ambiente(Efl) y mejorar que se utilice mejor esos efluentes.

c)Potencial Relativo

Se determina a través de la efectividad ($1 - \epsilon$), y nos dice la facilidad de optimizar el sistema, entre menor sea la efectividad, mayor es el potencial de optimizar el sistema.

2.2. PROCEDIMIENTO DE LA METODOLOGIA DE LOS BALANCES DE EXERGÍA.

Este procedimiento se divide en 8 puntos de esta manera puede ser un poco más entendible el proceso.

1) Se traduce el DFP (Diagrama de Flujo de Proceso) a un DB (Diagrama de Bloques) en donde se representan reactivos, productos, servicios auxiliares (Vapor, Agua), electricidad, pérdidas de calor, etc.

2) Se realiza el cálculo de un balance de materia, entalpía y entropía de todos y cada uno de los bloques, así como el de todo el proceso.

De esta manera se puede realizar el cálculo del balance de exergía del proceso.

3) Se calculan las propiedades del estado muerto para así calcular las irreversibilidades, efluentes y efectividad de todos y cada uno de los bloques, calculando así otros parámetros como eficiencia y rendimiento.

4) Se calcula el potencial de mejoramiento de todos los bloques y el potencial del proceso.

5) Se propone cuales deben ser las mejoras en base al potencial de los bloques.

6) Se evalúan técnicamente las propuestas de manera que observamos el impacto al medio ambiente, ahorros de energía primaria (combustible) tanto sus ventajas como sus desventajas al operar.

7) Si las propuestas son aprobadas se llevan a cabo estas, con la consiguiente modificación de los DFP's del proceso.

8) Al ejecutar las mejoras debe volverse a evaluar el proceso, comprobando que las mejoras fueron las correctas.

2.3 GLOSARIO DE TERMINOS

E	Flujo Exergético
Δ	Diferencial
ω	Velocidad Angular
μ	Potencial Químico
η	Eficiencia Exergética
ε	Efectividad
ξ	Rendimiento
τ	Torque
η_c	Eficiencia de Carnot
A	Área de Transferencia
C	Concentración
Efl	Efluentes
g	Constante de la Gravedad
h	Entalpía específica
H	Entalpía
Irr	Irreversibilidades
k	Coefficiente de Transferencia de Masa
n	Número de moles
Per	Pérdidas
Q	Flujo Calorífico
r	Rapidez de reacción
s	Entropía específica
T	Temperatura
U	Numero de Transferencia
v	Velocidad
W	Trabajo
z	Altura

2.3.1 Subíndices.

0	Referencia
CORR	Corrientes
Ex	Exergéticas
F	Formación
STD	Standard

2.3.2 Superíndices.

I...n	Referencias
-------	-------------

3. APLICACION DE LA EXERGIA Y OPTIMIZACION TÉCNICA

3.1 SECUENCIA DE CALCULO

Para realizar los cálculos del Balance de Exergía en vista de la optimización de los procesos, se requiere la siguiente secuencia de cálculo:

- (1) Identificar el proceso objetivo.
- (2) Traducir el DFP del proceso objetivo a un diagrama de bloques (DB).
- (3) Realizar el balance de materia, entalpía y entropía.
- (4) Clasificar los tipos de exergía que hay en las corrientes del proceso objetivo:

- a) Exergía Física (Ef)
- b) Exergía Química (Eq)
- c) Exergía Cinética (Ec)
- d) Exergía Térmica (Et)
- e) Exergía Potencial (Ep)

- (5) Calcular los tipos de exergía por cada una de sus fórmulas:

$$a) E_f = (h-h_0) - T_0 * (s-s_0) \quad (1.2)$$

$$b) E_q = \mu_0 * (n-n_0) \quad (1.3)$$

$$c) E_c = V^2 / 2 \quad (1.5)$$

$$d) E_t = \Delta H * \eta_c \quad (1.6)$$

$$e) E_p = g * (z-z_0) \quad (1.4)$$

- (6) Realizar la suma total de todos los tipos de exergía que hay en las corrientes del proceso objetivo:

$$E = E_f + E_q + E_c + E_p + E_t \quad (1.1)$$

- (7) Calcular la eficiencia, efectividad y rendimiento de cada uno de los bloques que conforman el proceso objetivo:

$$\eta = \Sigma E_{\text{SALIDA}} / \Sigma E_{\text{ENTRADA}} \quad (2.14)$$

$$e = \Sigma E_{\text{CORR SALIDA}} / (\Sigma E_{\text{CORR ENTRADA}} + E_{\text{EJE}}) \quad (2.16)$$

$$\xi = E_{\text{UTIL}} / \Sigma E_{\text{ENTRADA}} \quad (2.17)$$

- (8) Calcular la eficiencia, efectividad y rendimiento totales del proceso objetivo.
- (9) Calcular los potenciales interno, externo y relativo del sistema.
- (10) Analizar la eficiencia, efectividad y rendimiento conjuntamente con los potenciales del sistema.
- (11) De acuerdo al análisis anterior, proponer mejoras al sistema.

3.2 DESARROLLO DE UN BALANCE DE EXERGÍA

(1) Identificación del Proceso.

Para ilustrar el balance de Exergía para optimizar un proceso, se hará mediante la aplicación de la metodología antes vista, de acuerdo a la secuencia de cálculo, al proceso de obtención de Metil-Terbutil-Eter (MTBE), por medio de la tecnología de IFP modificado¹⁶. La aplicación de esta secuencia de cálculo solo se enfocará a las secciones de separación y purificación. El diagrama de flujo de proceso y lista de Equipo correspondiente a esta sección se ilustra en el anexo, el cual fue tomado de la tesis "Ingeniería Básica para una planta de Metil-Terbutil-Eter (MTBE) con capacidad de 300,000 toneladas métricas por año." (16), el cual servirá de base para el desarrollo de la aplicación y optimización exergética.

(2) Diagrama de Bloques, a partir del Diagrama de Flujo de Proceso se construye el Diagrama de Bloques siguiente, en donde están identificados los bloques de acuerdo a la lista de Equipo.

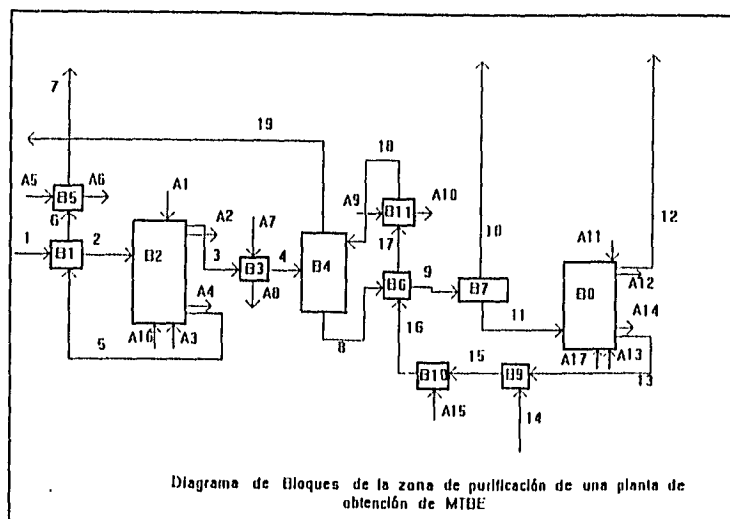


Figura 3.1

De donde debemos definir la función de cada bloque en la siguiente tabla:

Tabla 3.1

BLOQUE	FUNCIÓN
1	Intercambiador proceso-proceso
2	Sistema de destilación de MTBE
3	Intercambiador con servicio
4	Torre de extracción de compuestos oxigenados
5	Intercambiador con servicio
6	Intercambiador proceso-proceso
7	Tanque separador flash
8	Sistema de destilación de Metanol
9	Mezclador de fondos de B8 con agua de proceso
10	Bomba de recirculación
11	Intercambiador con servicio

De la figura 3.1 también debemos especificar aquellas corrientes que llevan antepuesta la letra A, las cuales son las corrientes de servicios auxiliares que se observan en la siguiente tabla

Tabla 3.2

Corriente	Servicio
	Agua de enfriamiento
	Salida de Agua de enfriamiento
	Vapor de Baja Presión
	Condensado de Vapor de Baja Presión
	Agua de enfriamiento
	Salida de Agua de enfriamiento
	Agua de enfriamiento
	Salida de Agua de enfriamiento
	Agua de enfriamiento
	Salida de Agua de enfriamiento
	Vapor de baja presión
	Condensado de Vapor de Baja Presión
	Potencia eléctrica
	Potencia eléctrica
	Potencia eléctrica

(3) Balance de Materia, Entalpía y Entropía

El balance de materia, entalpía y entropía de la zona de separación y purificación de la planta de MTBE se obtuvo de los cálculos realizados por medio del Simulador de proceso ASPEN versión 8.5, para realizar la Ingeniería Básica de una planta de MTBE en la referencia 16.

Tabla 3.3

Corriente	Temperatura (K)	Flujo (kmol/hr)	Entalpía (Kcal/Kmol*K)
1	319.75	1044.789	120.0967
2	350.45	1044.789	116.2779
3	325.25	666.7894	150.7738
4	311.15	666.7894	130.2119
5	404.32	428.0135	138.3831
6	343.4936	428.0135	146.3462
7	314.15	428.0135	150.2043
8	311.15	225.3847	28.347
9	335.35	225.3847	38.5765
10	367.15	14776	47.426
11	367.15	223.9071	36.6180
12	353.15	25.9071	53.5522
13	395.05	198.0	33.781
14	298.15	2.0	38.1456
15	394.15	200.0	24.5062
16	394.15	200.0	24.511
17	367.15	200.0	26.009
18	311.15	200.0	38.1456
19	311.15	641.4045	105.2602

Para efectos de conocer la composición de cada una de las corrientes, agregamos la siguiente tabla:

Tabla 3.4

Composición	Corrientes	1,2	3,4	5,6,7	8,9
Propano		0.0220	0.0938	0.0	1.331E-4
Propano		0.220	0.362	0.0	3.106E-4
n-Butano		2.5	3.866	0.0	1.2866E-3
n-Butano		4.8	86.7626	0.0	0.296
n-Buteno		0.5818	0.88477	0.0	4.48122E-3
n-Buteno		0.939	1.62	0.0	8.8293E-3
terbutanol		0.0	0.0	0.0	0.0
Dimetil éter		0.0	0.01814	0.0	7.2764E-3
Agua		90.0	0.0	0.0	88.105
Metanol		3.074	3.89979	0.0	11.5372
MTBE		3.8871	0.60294	0.0	0.01286
Cis-2-Buteno		0.6391	1.0658	0.0	5.8122E-3
Trans-2-Buteno		0.50209	0.82436	0.0	4.4812E-2

(Continuación)

Composición	Corrientes	10	11	12	13	14	15,16,17,18	19
Propano		0.15565	2.6796E-4	2.51E-3	0.0	0.0	0.0	0.00974
Propano		0.13313	5.3593E-4	5.31E-3	0.0	0.0	0.0	0.0207
n-Butano		0.746	1.7418E-3	1.65E-2	0.0	0.0	0.0	0.0213
n-Butano		0.214	3.2647E-2	3.03E-2	0.0	0.0	0.0	0.0022
n-Buteno		0.57523	7.1458E-4	7.13E-3	0.0	0.0	0.0	0.0167E
n-Buteno		1.166	1.5184E-3	1.48E-2	0.0	0.0	0.0	0.0033
terbutanol		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dimetil éter		0.2368	5.7613E-3	5.69E-3	0.0	0.0	0.0	0.01834
Agua		99.9998	88.4891	88.105	99.9998	0.0	99.99985	0.00073
Metanol		23.6938	11.45698	23.0193	1.0101E-4	0.0	1E-4	0.00973
MTBE		0.65047	8.6196E-3	8.61E-3	0.0	0.0	0.0	0.00229
Cis-2-Buteno		0.70384	1.1611E-3	1.16E-3	0.0	0.0	0.0	0.0059
Trans-2-Buteno		0.55495	8.4856E-4	8.48E-4	0.0	0.0	0.0	0.00410

* La composición de las corrientes esta en % en mol

(4) Tipos de Exergía

En vista de que en la sección de separación y purificación de la planta de MTBE se encuentra al nivel del suelo y se mueve a la velocidad de la tierra, utilizamos la ecuación 1.6' ($E = E_f + E_q$), pero en esta zona no hay reacción química, de manera que la única exergía que hay es la exergía física, siendo los únicos cambios existentes en el sistema los de presión y temperatura. Realizándose únicamente con la exergía física ($E_f = (h - h_0) - T_0 * (s - s_0)$) todo el balance de la sección de separación y purificación de la planta de MTBE, además de que se calcula la entalpía (h_0) y la entropía (s_0) a las condiciones de referencia para cada una de las corrientes mediante la utilización del programa de cálculo de Propiedades Termodinámicas EQFASES Versión 2.0 (21).

(5) Calculo de tipos de exergía y (6) su integración.

Al aplicar la ecuación 1.1 y 1.2 se obtiene el balance de exergía como se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 3.5

Comentarios	Exergía(Kcal/hr)
1	-15,856,130.3
2	-15,926,607.6
3	-3,283,727.8
4	-3,259,894.4
5	-11,765,669.6
6	70,338.2
7	-13,006,280.1
8	2,565
9	-11,843,591.9
10	-39,830.5
11	-11,782,798.7
12	-952,114.1
13	-10,728,970.9
14	-108,860.1
15	53,795.6
16	54,604.6
17	29,878.7
18	-10,885,110.6
19	-2,595,454.8

De la misma manera se calculan las exergía de los Servicios Auxiliares, como se muestran en la siguiente tabla, de los resultados mostrados se puede intuir el efecto que se tendrá en el balance de exergía.

Tabla 3.6.

Servicios Auxiliares	Exergía(Kcal/hr)
A1	-194290,101.3
A2	908,985.6
A3	51,607,588.4
A4	3,979,889.6
A5	9,395.6
A6	92,855.5
A7	5,677.1
A8	56,104.4
A9	1,205.6
A10	11,914.5
A11	25,424.9
A12	251,264
A13	2,424,128
A14	219,093.5
A15	1,336
A16	4,547.5
A17	103.2

El cálculo de los consumos de Exergía que se dan dentro del sistema (bloque) se obtiene utilizando la Ec. 2.9, resultados que se ilustran en la tabla comparativa del consumo de exergía bloque por bloque.

Tabla 3.7

Bloque	Exergía consumida(Kcal/hr)	% de exergía consumida
B1	11,765,530.5	5.5
B2	148,444,050.8	69.5
B3	3,008,260.6	1.4
B4	1,755,516.2	0.822
B5	12,993,128.7	6.08
B6	11,870,882.7	5.56
B7	20,962.6	9.817E-3
B8	1,877,584.9	0.87929
B9	10,891,626.7	5.1
B10	527.1	2.4681E-4
B11	10,904,280.5	5.1
BT	213,532,351.3	100

El cálculo de la exergía perdida por el sistema (bloque) se determina mediante la ecuación 2.10, tal como se ilustra en la siguiente tabla también llamados efluentes exergéticos del sistema.

Tabla 3.8

Bloque	Exergía perdida (Kcal/hr)	% de exergía perdida
B1	0.0	0.0
B2	908,985.6	95.8
B3	0.0	0.0
B4	0.0	0.0
B5	0.0	0.0
B6	0.0	0.0
B7	39,830.5	4.2
B8	0.0	0.0
B9	0.0	0.0
B10	0.0	0.0
B11	0.0	0.0
BT	948,816.1	100

Notando que los valores de las tablas anteriores (Tabla 3.6 y Tabla 3.7) son valores absolutos de los resultados.

(7) Determinación de la Eficiencia, Efectividad y Rendimiento y (8) su totalización

El cálculo de la eficiencia, efectividad, y rendimiento de cada uno de los bloques y del sistema integrándolo como un solo bloque.

Tabla 3.9

Bloque	$\eta(\%)$	$\epsilon(\%)$	$\xi(\%)$
B1	57.6	57.6	57.6
B2	11.1	99.5	11.2
B3	97.8	99	97.8
B4	18.4	99	18.4
B5	50.2	99	50.2
B6	50	99	50
B7	99.5	99.5	99.2
B8	86.6	99.4	86.6
B9	0.5	99	0.5
B10	99	96.7	99
B11	50	99	50
B12	8.4	96.2	9

3.3 OBSERVACIONES DEL BALANCE DE EXERGIA DEL EJEMPLO

- Notamos que la eficiencia exergética ($\eta=8.3642\%$) en donde se toman las aportaciones de exergía de los servicios auxiliares.
- Ahora bien al ver la efectividad en donde se toma en cuenta solamente las corrientes de proceso, este nos da un resultado muy interesante ($\epsilon = 61.88\%$), dándonos a entender que la exergía consumida por las corrientes de proceso es mucho menor que la exergía consumida por los servicios auxiliares.
- Con un rendimiento prácticamente igual a la eficiencia de la exergía ($\xi = 8.9445\%$).

Los puntos anteriores nos revelan que las corrientes de proceso cumplen bien su tarea en lo relativo en que se aproveche la exergía del proceso, pero no así de los servicios auxiliares donde hay un gran consumo de exergía, ya sea como efluentes o como irreversibilidades que se dan en el proceso.

Con base en lo anterior se concluye que una de las opciones más viables de optimización son los servicios auxiliares, en donde la gran mayoría de estos servicios

sirven para la red de intercambio de calor, haciéndonos llegar a la única opción viable de optimizar la red de intercambio de calor: **La tecnología Pinch.**

Esta, junto con otros análisis serán tratados en el subcapítulo referente al análisis de la relación entre la exergía y la optimización técnica y económica.

3.4 ANÁLISIS DEL BALANCE DE EXERGÍA EN LA OPTIMIZACIÓN TÉCNICA

3.4.1 ANÁLISIS DE LOS BLOQUES

Como se observo en el punto relacionado a la realización de un Balance de Exergía, los resultados del sistema global (esto es del proceso objetivo como un solo bloque) referentes a la eficiencia, efectividad y rendimiento del mismo, no son del mismo orden de magnitud.

Ahora bien, hay ciertos análisis que debemos puntualizar perfectamente, y son los siguientes:

- La mayor parte de la exergía consumida por cada uno de los bloques, con respecto a la exergía total, es debido por el bloque B2, correspondiente del sistema de destilación de MTBE. Este mayor consumo de Exergía es debido a que el sistema de destilación de MTBE es el equipo con un mayor desequilibrio con su estado de referencia el cual es de 1 atmósfera de presión y 25 °C de Temperatura, pues su perfil de presión y temperatura de operación es la siguiente:

Tabla 3.10

Plato	Presión (Atm)	Temperatura(°C)
	6.9	
	7.	
	7.1	
	7.15	
	7.2	
	7.3	
	7.35	
	7.4	
	7.5	

Al estar este sistema en un desequilibrio con el estado de referencia consume una mayor cantidad de exergía para alcanzar sus condiciones de operación (P, T), de manera que los resultados de la eficiencia, efectividad y rendimiento del mencionado bloque son congruentes con esta afirmación.

- Otro resultado significativo del balance de exergía, es el mezclador (Bloque B9), que tiene una exergía consumida que equivale al 5.1% del total, pero una eficiencia del orden del 0.5%. Esto se podría deber a que las dos corrientes que se mezclan (13 y 14) a la misma presión, pero, no a las mismas temperaturas, además de que su composición también es diferente, ya que la corriente 14 contiene Agua y Metanol que afecta los cálculos de la entalpía y entropía y como consecuencia a la exergía, así como en la corriente resultante del mezclador (corriente 15).
- En orden de importancia existen 4 bloques adicionales que estimulan nuestro interés en su análisis y son bloques Torre Extractora de compuestos oxigenados (Bloque B4), Tanque Separador Flash (Bloque B7), Sistema de destilación de Metanol (Bloque B8) y Bomba de recirculación (Bloque B10).
- * En lo que respecta al bloque de la Torre Extractora de compuestos oxigenados (Bloque B4) tiene un consumo de exergía equivalente al 0.822% de la exergía total, pero una eficiencia de 18.36%.

Lo antes mencionado se debe a dos factores, uno es el de una exergía muy baja debido a que todas las corrientes que entran y salen a la misma presión y temperatura (38 °C, 8.1 Atm), resultando que el único consumo de exergía sea debido a la transferencia de masa y no a diferenciales de presión y temperatura; el otro factor es debido a que la composición de todas las corrientes es diferente, teniendo repercusión en la entalpía, entropía y por lo tanto en la exergía, y en última instancia en la eficiencia.

- * El bloque B7, correspondiente al tanque de separación flash, consume el 9.81E-3% del total de exergía y tiene una eficiencia aproximada del 99.5%. La explicación de estos resultados es la cantidad de materia de la corriente 10, la cual es ínfima comparada con la cantidad que entra al bloque, por lo que la exergía consumida solo es la necesaria para obtener la corriente mayor (corriente 11), de esta misma manera la exergía consumida en el bloque es pequeña, por lo que la exergía de los productos es casi igual a la de la alimentación al bloque.

- * El sistema de destilación de Metanol (Bloque B8), es un caso interesante de análisis, puesto que es otro sistema de destilación parecido al bloque B2, en la que se obtiene Agua y Metanol.

La importancia de su análisis se basa en su consumo de exergía 0.879% del total, una eficiencia del 86.62% y una efectividad del 99.135%.

El bajo consumo de exergía se debe a que el perfil de presión y temperatura de la torre no está tan alejado del estado de referencia.

Tabla 3.11

Plato No.	Presión (Atm)	Temperatura (°C)
7	1.7	75.0
8	1.8	74.0
9	1.81	72.2
10	1.82	70.3
25	1.87	68.5
26	1.88	68.0
27	1.89	67.0
55	2.0	61.7
56	2.1	61.8

Los requerimientos de vapor de calentamiento y agua de enfriamiento (A11 y A13), no son tan grandes como en el bloque B2, a esto se debe que la eficiencia sea tan alta; en lo correspondiente a la efectividad es debido a que el consumo de exergía es bajo e igual a la suma de la exergía de las corrientes 12 y 13 equivalen a la exergía de la corriente 11.

- * El último bloque que nos interesa de analizar es el correspondiente al sistema de bombeo (Bloque B10), porque es el que tiene el consumo de exergía más bajo 2.468E-4%, y una de las eficiencias más altas 99.04%.

El consumo tan bajo de exergía es debido a que solo consume la exergía necesaria para impulsar el fluido, además de que la ΔP es baja, la exergía consumida también lo es.

Esa es la razón por la que al tener un consumo tan bajo se tiene una eficiencia tan alta.

3.5 OPCIONES DE OPTIMIZACION

Continuando con la secuencia de calculo establecida se determina el punto (9) correspondiente al calculo de tres potenciales de mejoramiento:

- Potencial Interno
- Potencial Externo
- Potencial Relativo

estamos en posibilidad de encontrar los equipos y metodologías de optimización.

- **Potencial Interno del Sistema**

Como se hemos explicado anteriormente el potencial interno se representa por las irreversibilidades, las cuales también representan el consumo de exergía del sistema que ascienden a $2.135E08$ Kcal / hr, por lo que el potencial interno de mejoramiento del sistema es alto al tener una irreversibilidad de tal magnitud. En caso contrario tendríamos un consumo de exergía demasiado bajo, y esto resulta en un mejoramiento bajo; no siendo factible hacer una mejoría exergéticas al proceso.

- **Potencial Externo del Sistema**

En el mismo tenor especificamos que el potencial externo es representado por aquella exergía que es desechada al medio ambiente. En el caso de nuestro sistema el potencial externo es bajo, puesto que los únicos efluentes son las corrientes 9 y A2, y su exergía asciende a 948816.09 Kcal / hr, la cual es una cantidad sensiblemente menor al potencial interno, por lo que el optimizar la emisión de efluentes tendría que relacionarse con la transferencia de una mayor exergía de los efluentes al sistema, por medio de la transferencia de calor.

- **Potencial Relativo del Sistema**

Al igual que los otros dos potenciales, este potencial esta relacionado a la efectividad ($Pot\ Rel = 1 - \epsilon$).

En donde menor sea ϵ , mayor es el potencial relativo de mejoramiento, en nuestro caso, la efectividad es del 61.88%, por lo que el potencial relativo es bajo ($Pot\ Rel = 38.12\%$), pero aun se puede optimizar el sistema sin demasiadas modificaciones.

3.5.1 PERSPECTIVAS DE OPTIMIZACION

Retomando la secuencia de calculo en sus puntos (10) y (11) se plantean las perspectivas de optimización al presente proceso de MTBE son:

- Optimizar el sistema de destilación de MTBE (Bloque B2)
 - Optimizar los servicios auxiliares del proceso de MTBE
 - Optimizar los efluentes del proceso de MTBE
-
- Optimización del sistema de destilación de MTBE

El bloque B2 es donde se tiene el mayor consumo de exergía, el cual es de alrededor del 69.51% de la exergía consumida por el total del sistema, teniendo una eficiencia y rendimientos bajos, de alrededor del 11.06%, con una efectividad del 94.46%.

La optimización en este caso consistiría de acercar las condiciones de operación del sistema de destilación de MTBE a las condiciones del estado de referencia, sin modificar las concentraciones, flujos, de manera que modifcamos el numero de etapas de transferencia de masa, para así suplir en cierta forma las condiciones de proceso. Así mismo se modifica el reflujo del domo y el rehervidor, sin dejar de tener en cuenta el costo que esta optimización implica.

- Optimización de los servicios auxiliares

Como observamos la eficiencia y la efectividad ($\epsilon = 61.88\%$, $\eta = 8.364\%$) del sistema nos permite intuir que el optimizar los servicios auxiliares puede ser una opción viable.

Como hemos manifestado en los puntos anteriores. La eficiencia esta en función de todas las corrientes de entrada y salida. Por otra parte la efectividad esta en función de las corrientes de proceso de entrada y salida, así como, la exergía de eje, la cual es igual al trabajo de eje, aplicándose a las bombas del sistema.

Como ya observamos la eficiencia y la efectividad tienen valores muy diferentes esto quiere decir que los servicios auxiliares producen una gran cantidad de irreversibilidades en el sistema, ya que utilizan agua de enfriamiento y vapor de calentamiento, los cuales son servicios extraños al proceso que se tienen que disminuir, utilizando las corrientes calientes que se deben enfriar calentando las corrientes frías, determinando esta optimización por medio de la Tecnología Pinch.

Al aplicar la Tecnología Pinch se puede crear un esquema de optimización energética tal como se muestra en la relación de H , Temperatura y Factor de Carnot (Fig. 3.2), llamada la gran Curva Compuesta Exergética^{10,11}.

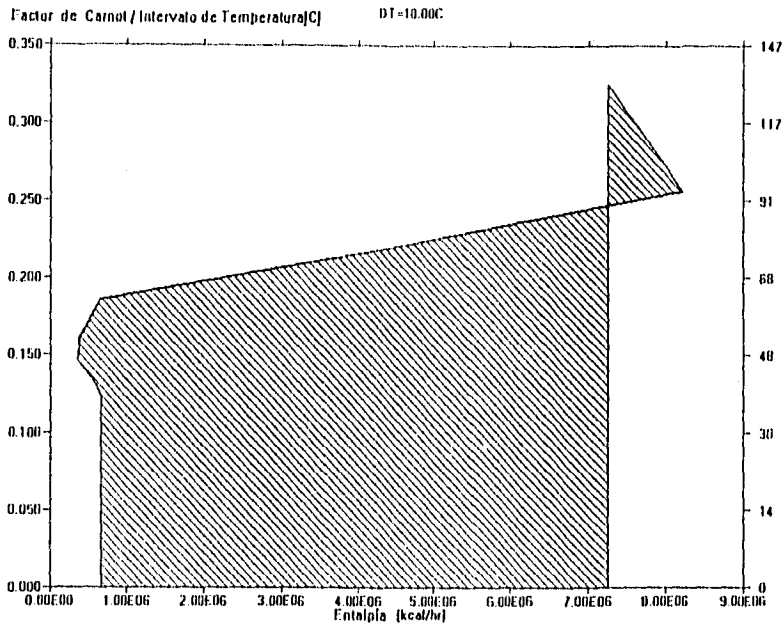


Figura 3.2

De manera que realizando la metodología de la Tecnología Pinch, a la red original del sistema se le agregan cinco intercambiadores de calor proceso-proceso.

- Optimizar los efluentes.

Los efluentes contienen exergía que se desecha a la atmósfera, si esta se compara con la exergía consumida que en buena parte son los servicios auxiliares, la exergía de los efluentes es sensiblemente menor, pero no por eso se debe despreciar.

La optimización a efectuar en los efluentes consistiría en emitir la menor cantidad de exergía a la atmósfera, integrando estas corrientes de efluentes (10 y A2) a la optimización de energía de las corrientes mediante la Tecnología Pinch. Integrando la optimización de los efluentes en un contexto global de exergía optimizada del sistema.

3.6 GLOSARIO DE TÉRMINOS.

E	Flujo Exergético
A	Servicio Auxiliar
Atm.	Atmósferas
B	Bloque
No.	Numero

3.6.1 Superíndices.

L...n	Referencias
-------	-------------

**4. RELACIÓN ENTRE EXERGÍA Y OPTIMIZACIÓN
ECONÓMICA.**

ESTA TESIS NO DEBE
SER DE LA BIBLIOTECA

4.1 LA EXERGIA DENTRO DE LA OPTIMIZACION ECONÓMICA

La exergía tiene una importancia económica que se basa en cuatro principios que se expusieron en el primer capítulo⁶:

- Todos los procesos industriales ocurren en las condiciones de la atmósfera terrestre, la cual para términos prácticos es una fuente inagotable de energía, trabajo y materia.

Viéndose por separado como es que la atmósfera terrestre se considera una fuente inagotable tanto de energía, trabajo y materia.

- ◆ La energía que se encuentra en la atmósfera terrestre puede incrementarse o disminuirse por un intercambio de calor.
- ◆ La atmósfera terrestre desempeña una cantidad ilimitada de trabajo o recibir una cantidad ilimitada de trabajo desempeñado, por medio de la expansión o contracción del volumen contra la presión.
- ◆ Así mismo ciertas especies químicas pueden ser depositadas o retiradas de la atmósfera terrestre.

Al tomarse como inagotables la energía, trabajo y materia de la atmósfera terrestre, estos no representan costo alguno, en el sentido económico.

- En los procesos industriales existen ciertas sustancias naturales que no están en equilibrio con la atmósfera. Estas sustancias son llamadas "recursos naturales".

Al contrario que en la atmósfera, en el sistema económico en que vivimos se le asigna un valor económico a los recursos naturales, así mismo se descubrió que los recursos naturales no son inagotables.

Al forzar tales recursos naturales a cambiar su estado termodinámico en una instalación industrial, se produce trabajo, considerándose este trabajo valioso en un sentido puramente económico.

- Lo que se realiza aun es un cambio en el estado termodinámico de un recurso natural para estar en equilibrio con la atmósfera. Al suceder esto ningún proceso útil es posible, por esta razón al estar un sistema en equilibrio con la atmósfera, se le llama que esta en su "estado muerto" o "estado de referencia".

Se asume que la cantidad correspondiente de trabajo transferido afuera del sistema será la cantidad óptima.

- El trabajo disponible de un sistema es producido a expensas de un recurso natural. Este trabajo es utilizado para transformar el estado actual de las sustancias de otro sistema con la atmósfera terrestre, esto le confiere un valor económico.

En todos los casos, el concepto de un cambio en el estado termodinámico incluye el cambio de la naturaleza de las sustancias a través de reacciones químicas.

Son estos cuatro principios en los que se fundamenta lo que se llama el análisis termoeconómico.

4.1.1 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO

El análisis termoeconómico toma las medidas termodinámicas y los gastos de capital. Un hecho económico, es el que se puede aplicar tanto para una planta completa considerándola como un solo sistema, como para cada una de sus zonas que componen el sistema.

Esto hace que fenómenos físicos sean viables en la base de una medida termodinámica unificada, como la eficiencia exergetica. Lo anterior sin violar la disciplina matemática que rige a la optimización en general.

4.1.2 LA OPTIMIZACIÓN POR ANÁLISIS TERMoeCONÓMICO

La optimización termoeconómica de un sistema, depende de lo siguiente:

1) La minimización del costo unitario del producto, la maximización de la utilidad del sistema o algún otro objetivo al cual queramos optimizar.

2) La función objetivo, esta formula estará en función de ciertas variables independientes del sistema a optimizar, para así poder alcanzar el objetivo planteado.

3) El número de variables y su clasificación:

- a) Dependientes o Independientes
- b) Local o común para una o más zonas
- c) Restringida por una igualdad o desigualdad

Con respecto al primer punto hay dos métodos para encontrar el costo unitario mínimo del producto o la maximización de la utilidad del sistema, El primer método esta basado en una fórmula genérica establecida por Szargut⁶ que postula una función objetivo de aplicación general en instalaciones térmicas la cual es:

$$J = J_0 + j_0 * (\eta_E / 1 - \eta_E) * E_n \quad (4.1)$$

donde:

Tabla 4.1

Concepto
Gasto de capital de una instalación térmica
Componente constante del gasto de capital
Coefficiente del tipo de instalación térmica
Capacidad exergética nominal
Eficiencia exergética

El segundo método referido, es el que crearon Tribus y Evans⁴, en donde han postulado otras funciones objetivo mediante una serie de ecuaciones para fines diversos como se explica a continuación:

Este método de optimización divide el sistema en subsistemas o zonas, para poder optimizar una o todas las zonas al mismo tiempo.

La ecuación general del método de optimización termoeconómica esta basado en la ecuación (4.2), pero esta ecuación se puede adaptar dependiendo de lo que se optimize.

$$\min_{\{X\}} C = C_T / \Sigma E_0 = (\Sigma C e_i E_i + \Sigma Z_n) / \Sigma E_0 \quad (4.2)$$

Para minimizar el costo unitario de un único producto en el sistema se utiliza la ecuación (4.3).

$$\min_{\{X\}} c_p = C_T / p = (\Sigma C e_i E_i + \Sigma Z_n) / p \quad (4.3)$$

Cuando existen dos o más productos se puede minimizar el costo total de un sistema mediante la ecuación (4.4)

$$\min_{\{X\}} C_T = \Sigma C e_i E_i + \Sigma Z_n \quad (4.4)$$

En el caso de que la exergía de entrada es cero se puede minimizar el costo del producto con la ecuación (4.5)

$$\min_{\{X\}} C_p = \Sigma Z_n / p \quad (4.5)$$

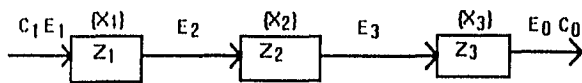


Figura 4.1

De las ecuaciones anteriormente mencionadas se desprende que:

Tabla 4.2

Concepto
Costo unitario exergético del producto
Costo total anual
Flujo exergético anual de los productos
Costo unitario de las entradas externas de energía
Flujo exergético anual de entrada
Flujo másico del producto
Costos zonales anuales de gastos de capital asociados a la zona
Juego de decisiones de la zona tales como I, P, n , etc.

De las anteriores ecuaciones se selecciona una de ellas para el fin que se persigue en la optimización, derivándola con respecto a la variable seleccionada de cada una de las zonas de manera que las variables independientes en cada una de las zonas sean los flujos de exergía. Para costos zonales se utiliza la ecuación (4.5).

Una vez identificadas las variables independientes se obtiene su derivada parcial con respecto a $\{X_i\}_{i=1, \dots, n}$ y se introducen en una ecuación de Lagrange para la variable a optimizar.

La ecuación de Lagrange se deriva parcialmente de cada $\{X_i\}$ y de sus "n" variables independientes de donde surgen n-1 multiplicadores de Lagrange (λ), de donde $\lambda_1 = cte.$ y es un costo unitario y $\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{n-2}, \lambda_{n-1}$ son funciones de los costos zonales (Z) y la exergía (ϵ). El multiplicador λ_{n-1} esta en función del multiplicador de zona anterior.

Las derivadas parciales de las variables independientes del la ecuación de Lagrange, nos generan n' ecuaciones con n' incógnitas que es posible resolver por medio de métodos numéricos.

Es necesario definir que z es la función de los costos zonales (Z) que dependen de E y $\{X\}$ por lo tanto $Z_i = z_i(E_i, \{X_i\})$ y ϵ es la función de la exergía que depende de E_{i+1} y $\{X_i\}$ por lo tanto $E_i = \epsilon_i(E_{i+1}, \{X_i\})$.

Para los costos zonales se deben tomar en cuenta alguna de las siguientes consideraciones:

a) Costos zonales insensibles al flujo de exergía.

Los costos zonales son insensibles a los flujos de exergía de salida reduciéndose Z a lo siguiente $Z_i = z_i(\{X_i\})$ y si $\{X_i\}$ son las eficiencias termodinámicas que son la selección más segura para optimizar entonces:

$$\epsilon_i = E_{i+1}/\eta_i \quad (4.6)$$

por lo que:

$$\lambda_1 = c_1$$

$$\lambda_n = \frac{c_{n-1}}{\eta_{n-1}} \quad (4.7)$$

donde n es cualquier numero excepto 1.

Esto puede indicar que mientras la corriente exergética de entrada a una zona es reducida debido a la disipación en las zonas precedentes, el costo unitario se incrementa con un penalización de la disipación.

b) Costos zonales sensibles al flujo de exergía.

Los costos zonales tiene un incremento lineal con respecto a los flujos exergéticos de salida. De tal manera que los costos zonales (Z_i) se modifican de la siguiente forma:

$$Z_i = E_{\text{SALIDA}} * z(\{X_i\}) \quad (4.8)$$

Si X representa la eficiencia exergética entonces:

$$\begin{aligned} \lambda_n = z_{n-1}(X_{n-1}) + \frac{c_{n-1}}{\eta_{n-1}} &= \frac{E_{\text{SALIDA}} * z_{n-1}(X_{n-1}) + C_{n-1} * E_{\text{ENTRADA}}}{E_{\text{SALIDA}}} \\ &= \frac{Z_{n-1} + c_{n-1} * E_{\text{SALIDA}}}{E_{\text{SALIDA}}} \end{aligned}$$

La clasificación de variables pueden ser de los más diversos tipos:

◆ Independientes:

- * Los flujos exergéticos.
- * Los costos unitarios exergéticos de las materias primas.

◆ Dependientes:

- * Los costos relativos a toda la planta o a una zona de la planta.
- * Los costos unitarios exergéticos de el o los productos.

◆ Locales o comunes para una o más zonas:

* Los parámetros de la planta:

- La eficiencia de la Primera Ley de la Termodinámica.
- La eficiencia de la Exergía.
- La efectividad de las corrientes de proceso de la planta.

◆ Restringida por una igualdad o desigualdad

Esta restricción se aplica a las variables dependientes, y por lo tanto esta en función de la ecuación que describa el comportamiento de la variable.

De los métodos de optimización termoeconómica para encontrar la minimización del costo del producto y la maximización de la utilidad del sistema, el método de Tribus y Evans es el más conveniente y completo ya que involucra una optimización económica conjuntamente con la optimización técnica, el cual se utilizara para determinar el análisis termoeconómico de la planta de MTBE, misma a la cual se le realizo el balance de exergía.

El método de optimización termoeconómica de Tribus y Evans considera lo siguiente:

- a) Que el flujo del producto o productos están fijos.
- b) Que los costos zonales se pueden no incrementar con el flujo de exergía de salida
- c) Los costos zonales se incrementan linealmente con el flujo exergético de salida, siendo este último una consideración más real.
- d) El juego de opciones Presión, Temperatura, Flujo Molar o la eficiencia exergética, siendo este último el más apropiado para una optimización económica.

e) Disipación exergética:

I. Disipación paralela.

II. Disipación en serie, fijando el flujo de producto.

III. Retroalimentación.

IV. Corrientes de exergía multivariables.

V. Disipación en serie fijando el costo total.

VI. Disipación en serie fijando la exergía de entrada y considerando el costo de exergía tan bajo que es cero. (Este caso es en donde la exergía de alimentación al bloque se debe a gases de chimenea)

Al tomar en cuenta estas consideraciones, se restringe de alguna manera el campo de maniobra del método, haciéndolo solo útil para los casos donde exista una gran cantidad de exergía consumida.

4.2 OPTIMIZACIÓN TERMOECONÓMICA DE LA PLANTA DE MTBE.

Siguiendo la misma tónica del capítulo 3, se calculara el costo de la zona de purificación de MTBE.

Conforme al método termoeconómico de Tribus y Evans y tomando en cuenta que existen dos o más productos y utilizando la ecuación (4.3) se obtiene:

- a) Las exergías anuales.
 - b) Se calculan los costos unitarios exergéticos.
 - c) Se obtiene el costo zonal.
 - d) Se calcula el costo total de la sección de separación y purificación de la planta de MTBE.
- El calculo de los flujos exergéticos anuales en Millones de Kcal / año de la sección de separación y purificación de MTBE son:

Tabla 4.3

	Flujo exergético (MMkcal / año)
	129,000
	888
	106,000
	21,100
	7,700

provenientes de los cálculos realizados en el Balance de Exergía del capítulo 3.

- Para obtener los costos unitarios exergéticos se toman los valores del MTBE en miles de pesos por tonelada que para 1996 se reporta como: 1.714 Miles de pesos por tonelada⁶. A partir de este valor se determina el costo unitario exergético considerando el costo del producto \$1714 / Ton y la exergía específica 0.348 kcal / Ton, obteniéndose un costo unitario exergético de \$ 4.92E-6 / kcal.

siendo los costos unitarios exergéticos los siguientes:

Tabla 4.4

C_1, C_2, C_3	Costo Unitario Exergetico (\$/MMKcal)
	74.9
	1150.12
	419
	2416
	672

- Para determinar el costo zonal se toma en cuenta el costo del vapor de Baja Presión equivalente a \$ 99,630 y el costo de agua de enfriamiento equivalente a \$ 213,475, obteniéndose un costo zonal de \$ 313,105.
- Aplicando la ecuación (4.3) del método de Tribus y Evans se obtiene el costo total.

$$\diamond C_T = c_1 * E_1 + c_{14} * E_{14} + Z$$

El costo total de la sección de separación y purificación de una planta de MTBE, asciende a \$ 10'316,557.

Para una mayor facilidad del Método de Lagrange se toma la sección de separación y purificación de MTBE como un solo bloque.

La representación de la zona de separación y purificación de MTBE como un solo bloque presenta como alimentaciones a E_1 y E_{14} , y los productos son E_7 , E_{19} y E_{12} . Tal como se muestra en la figura.

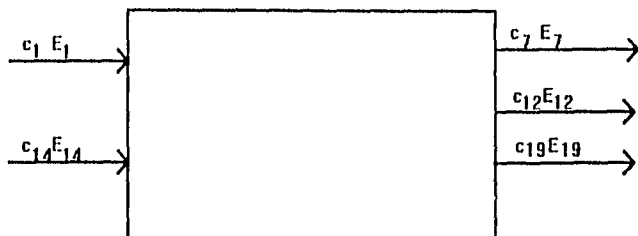


Figura 4.2.

donde

Tabla 4.5

Concepto	
Alimentación	
Alimentación	
Producto	
Producto	
Producto	

Para la optimización de la variable de costo total se aplica la ecuación de Lagrange:

$$L_T = c_1 * E_1 + c_2 * E_{14} + z_1(E_p, X_1) + \lambda_1(\varepsilon_1(E_p, X_1) - E_1) + \lambda_2(\varepsilon_1(E_p, X_1) - E_{14}) + \lambda_3(E_0 - E_p)$$

Las derivadas de la ecuación de Lagrange son:

$$\frac{\delta L_T}{\delta X_1} = \frac{\delta}{\delta X_1} (z_1 + \lambda_1 e_1) = 0$$

$$\frac{\delta L_T}{\delta E_1} = \frac{\delta}{\delta E_1} (c_1 E_1 - \lambda_1 E_1) = 0 \quad \therefore \lambda_1 = c_1$$

$$\frac{\delta L_T}{\delta E_{14}} = \frac{\delta}{\delta E_{14}} (c_{14} E_{14} - \lambda_2 E_{14}) = 0 \quad \therefore \lambda_2 = c_{14}$$

$$\frac{\delta L_T}{\delta E_p} = \frac{\delta}{\delta E_p} (z_1(X_1) + \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_1 - \lambda_3 E_p) = 0$$

donde

$$\lambda_3 = \frac{\delta}{\delta E_p} (z_1(X_1) + \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_1) = z_1(X_1) + \lambda_1 \frac{\delta E_p}{\delta E_1} + \lambda_2 \frac{\delta E_p}{\delta E_{14}}$$

$$E_1 = e_1(E_p, X_1)$$

De estos se obtienen los multiplicadores:

Tabla 4.6

	74.8
	70.2
	74.8

Se obtiene el costo mínimo que se aplica a la Ecuación (4.3) del método de Tribus y Evans, obteniéndose con esto un costo optimizado de \$ 9'699,403.

El valor de la sección de separación y purificación de MTBE mediante el proceso original antes de aplicarle la optimización técnica mediante el análisis exergético tiene un costo de \$ 10'316,557.

Para la misma sección optimizada técnicamente mediante el análisis exergético y la metodología de la Tecnología Pinch al aplicarle el método de Tribus y Evans se comprueba que también se obtiene un menor consumo energético que se refleja en una disminución del 5.98% del Costo Total equivalente a \$ 617,154.

Como se puede observar esta metodología incluye ecuaciones de las llamadas de silla, las cuales permiten minimizar o maximizar según sea el requerimiento.

4.4 GLOSARIO DE TÉRMINOS.

C	Costos Anuales.
Σ	Suma de...
λ	Multiplicador de Lagrange.
η	Eficiencia Exergética.
ϵ	Función de la Exergía.
c	Costos Unitarios Anuales.
E	Flujo Exergético Anual.
L_T	Ecuación de Lagrange.
p	Flujo másico del Producto.
X	Juego de Opciones.
Z	Costos Zonales Anuales
z	Función de los Costos Zonales

4.5.1 Subíndices.

i	i-ésima
l	Zona l
l...n	Número de corrientes
n	enésima
p	Producto
T	Total

4.5.2 Superíndices.

l...n	Referencias.
-------	--------------

4.3 ANÁLISIS DEL PROCESO TERMoeCONÓMICO.

- * Analizando la sección de separación y purificación de MTBE, desde el punto de vista económico, el costo total es alto, dado a que la exergía anual de alimentación es muy alta.
- * La eficiencia es, en este caso muy baja, siendo considerado un parámetro excelente para la optimización económica, lo que hace al costo unitario exergético alto con respecto al promedio.
- * Como hemos discutido anteriormente la eficiencia del ejemplo antes mencionado (Sección de separación y purificación de MTBE), es debido al gran consumo de exergía por los servicios auxiliares.
- * La optimización económica realizada por el método de Tribus y Evans, calcula el valor óptimo, pero no indica en donde y que variable tiene que optimizar, por lo que es necesario complementarlo con un análisis Técnico-Económico de cada uno de los equipos involucrados.

Esto es una desventaja puesto, que en la optimización bajo criterios técnicos obtienen resultados que nos conducen a propuestas concretas de como mejorar la eficiencia exergética del problema.

5. CONCLUSIONES.

5.1 CONCLUSIONES DE LA OPTIMIZACIÓN TÉCNICA.

Al analizar la optimización exergética desde el punto de vista de términos técnicos, se obtienen aspectos interesantes, tales como:

- * Los valores cuantitativos de los parámetros del balance de exergía tales como, eficiencia (η), efectividad (ϵ) y rendimiento (ξ) son muy altos, con los valores de los parámetros de eficiencia, efectividad y rendimiento, se puede localizar realmente las áreas susceptibles de optimización, puesto que los parámetros del balance de exergía son absolutos al tomar en cuenta la entropía.
- * Los valores absolutos de los parámetros del Balance de Exergía, nos dan un panorama real de el o los equipos a optimizar, lo cual, requiere efectuar un análisis del balance de exergía que nos proporcione las áreas posibles de optimización, tal como se realizó en los capítulos anteriores.
- * La utilidad del análisis del balance de exergía es que nos ofrece como resultado una visión más completa de lo "que", y "como" optimizarlo. El Balance de Exergía por sí mismo no optimiza, sin embargo sí nos indica que optimizar y que herramientas se pueden utilizar.

5.2 CONCLUSIONES DE LA OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA.

De la relación entre los balances de exergía y la optimización económica se puede concluir:

- * El método usado en el trabajo relaciona los costos de la zona exergética, los costos unitarios exergéticos y los flujos de exergías de las corrientes de alimentación y productos, así como uno de los parámetros del balance de exergía que en este caso es la eficiencia (η), o puede ser también la presión a la que trabaja el sistema (P), la temperatura del sistema (T) o alguna otra variable de la cual dependa el sistema, es decir este tipo de métodos producen consumos mínimos de energía, lo que se traduce en ahorros de tipo económico.
- * El método propuesto de optimización económica por si solo no responde a la siguiente pregunta:

¿Como técnicamente se lleva a cabo esta optimización económica?

Esto último representa una desventaja de la optimización económica por medio del balance de exergía, aun con esta desventaja el método responde eficazmente al objetivo planteado, que es el de minimizar el costo total de planta o maximizar la utilidad de esta.

- * En relación a la sección de separación y purificación de una planta de MTBE, mediante el proceso IFP modificado, al aplicarle la optimización económica solamente se obtiene un ahorro de 5.98% (\$620,000) del Costo Total Original, ya que la estructura exergética utilizada en este proceso esta muy cercano al Costo Óptimo, por lo que resulta no atractivo el realizar optimizaciones de tipo técnico adicionales.

5.3 CONCLUSIONES GENERALES.

Analizando la optimización de tipo técnico y económico por medio del balance de exergía, se obtiene una propuesta concreta de como debemos optimizar la sección de Purificación y Separación de la planta de MTBE, la cual se debe realizar por la Metodología Pinch, para poder minimizar los servicios auxiliares de la zona, lo que resulta en una reducción del costo total, que ascendería a 620,000 Pesos*

Para este caso específico de Sección de Separación y Purificación, los resultados no son espectaculares, sin embargo esta metodología Técnico-Económica a través de la Exergía nos permite obtener el costo mínimo de cualquier otro proceso que se analice, esto, nos lleva a concluir que el papel del balance técnico-económico de exergía para la optimización de procesos, es muy importante, debido a nuestro panorama económico actual en donde hay un alto índice de desempleo y una alza de costos tanto en la materia prima como en los costos de producción.

El papel del Balance Técnico-Económico de la Exergía, se vuelve relevante porque este es un medio de como podemos hacer mas competitiva nuestra industria aun, en tiempos de crisis, debido a que se obtienen costos de Producción bajos, y de esta maera se puede enfrentar mejor a la competencia en el marco de una economía globalizada.

Los Balances Técnicos-Económicos, así como también los análisis exergéticos son de una gran utilidad, por lo que se les debe de dar una mayor aplicación en la

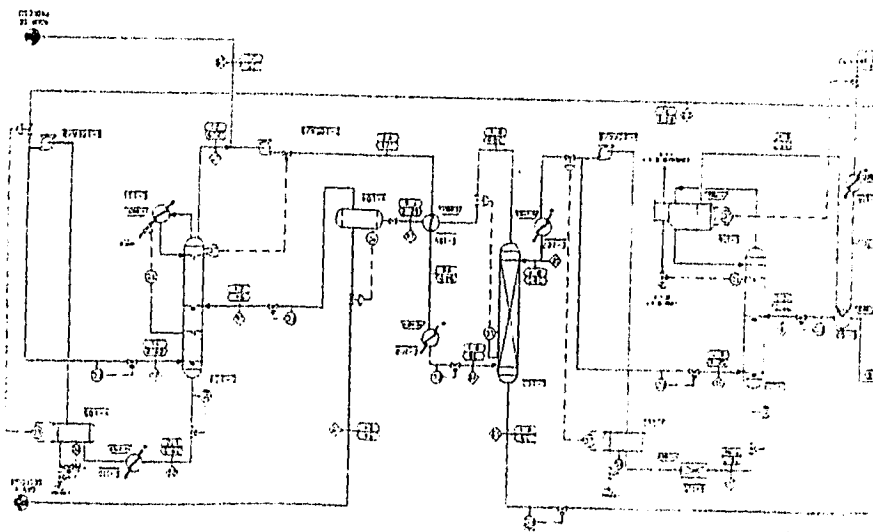
A nivel de conocimientos de estas técnicas se sugiere el propiciar un mayor interes de este tipo de análisis, incluyendolo en el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Química

* Pesos en Mayo de 1996.

6. ANEXO

6.1 DFP

Diagrama de Flujo de Proceso de la Sección de Separación y Purificación de una planta de Metil-Terbutil-Eter (MTBE), por medio del proceso IFP modificado.



6.2 LISTA DE EQUIPO

Lista de Equipo de la Sección de Separación y Purificación de MTBE

BOMBAS

CLAVE	DESCRIPCION	BLOQUE
B-104	Bomba de (Spare) de 104	B2
B-105	Bomba de (Spare) de 105	B10
B-106	Bomba de (Spare) de 106	B8

CAMBIADORES DE CALOR

CLAVE	DESCRIPCION	BLOQUE
E-103	Intercambiador de proceso de C-101	B1
E-104	Enfriador de MTBE producto	B5
E-105	Condensador de C-102	B7
E-106	Rehervidor de C-102	B9
E-107	Enfriador de alimentación de C-103	B3
E-108	Enfriador de agua de recirculación	B11
E-109	Intercambiador de proceso de C-104	B6
E-110	Condensador de C-104	B4
E-111	Rehervidor de C-104	B8

COLUMNAS

CLAVE	DESCRIPCION	BLOQUE
C-102	Columna de MTBE	B1
C-103	Columna de Extracción	B1
C-104	Columna de Metanol	B1

RECIPIENTES

CLAVE	DESCRIPCION	BLOQUE
V-103	Acumulador de la columna de MTBE	B1
V-104	Tanque estabilizador de C-104	B1
V-105	Acumulador de la Columna de Metanol	B1

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1 REVISTAS

1. Gaggioli, R.A.; Petit, P.J., "Use the Second Law, first", *Chemtech*, Vol. 7, August 1977, Pp.496 - 506.

2. De Nevers, Noel, "The Second Way to use the Second Law", *Chemtech*, May 1982, Pp.306 - 317.

3. Chiu, Chen-hwa, "Evaluate separation for LNG plants", *Hydrocarbon Processing*, Vol. 57, No. 9, September 1978, Pp.266 - 272.

4. El-Sayed, Y.M.; Evans, R.B., "Thermoeconomics and the Design of Heat Systems", *Journal of Engineering for Power*(Translations for ASME), Vol. 92, January 1970, Pp.27 - 35.

5. Kestin, J., "Availability: The concept and associated terminology", *Energy- The International Journal*, Vol. 5, 1980, Pp.679 - 692.

6. Szargut, J., "International progress in Second Law Analysis", *Energy- The International Journal*, Vol. 5, 1980, Pp.709 - 718.

7. Nishida, N.; Liu, Y.A.; Lapidus, L., "Studies in Chemical Process Design and Synthesis: III. A simple and practical approach to the Optimal Synthesis of Heat Exchanger Networks", *AIChE Journal*, Vol. 23, No. 1, January 1977, Pp.77 - 93.

8. Linhoff, B.; Flower, J.R., "Synthesis of Heat Exchanger Networks: I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks, II. Evolutionary Generation of Networks with Various Criteria of Optimality", *AIChE Journal*, Vol. 24, No. 4, July 1978, Pp.633 - 654.

9. Samdani, G.; Moore, S., "Pinch Technology: Doing more with Less", Chemical Engineering, Vol. 100, No. 7, July 1993, Pp.43 - 48.

10. Linnhoff, B., "Use Pinch Analysis to Knock Down Capital Costs and Emissions", Chemical Engineering Progress, Vol. 90, No. 8, August 1994, Pp.32 - 57.

11. Lee, K.I.; Morabito, M.; Wood, R.M., "Refinery Heat Integration using Pinch Technology", Hydrocarbon Processing, Vol. 68, No. 4, April 1989, Pp.49 - 53.

12. Linnhoff, B.; Vredevelt, D.R., "Pinch Technology has come of age", Chemical Engineering Progress, Vol. 80, No. 7, July 1984, Pp.33 - 40.

13. Morgan, S.W., "Use Process Integration to Improve Process Design and the Design Process", Chemical Engineering Progress, Vol. 88, No. 9, September 1992, Pp.62 - 68.

14. Rodriguez Toral, M.A.; Rangel Davalos, H., "Análisis Combinado de Energía y Tecnología Pinch Aplicado a Sistemas de Turbinas de Gas", Revista IMIQ, Vol. 26, No. 4, Noviembre 1994, Pp.3 - 8.

15. Rivero Rodríguez, R., "El Análisis de Exergía", Revista IMIQ, Vol. 26, No. 4, Noviembre 1994, Pp.14 - 27.

7.2 TESIS.

16. Hernandez Estrada, J.C.; Olvera Romo, M.; Romero Pérez, A., "Ingeniería Básica para una planta de Metil-Terbutil-Eter(MTBE) con capacidad de 300,000 toneladas métricas por año". Química, 1995.

7.3 LIBROS.

17. Gaggioli, R.A., "Thermodynamics: Second Law Analysis", ACS Symposium Service 122, American Chemical Society, Washington, D.C., 1980.

18. Edgar, T.F.; Himmelblau, D.M., "Optimization of Chemical Processes", McGraw-Hill Book Company, 1989.

19. Douglas, J.M., "Conceptual Design of Chemical Processes", McGraw-Hill Book Company, 1988.

20. Mandoki, W.J., "Manual de Exergía y Cogeneración", Celanese Mexicana S.A., 1990.

7.4 SOFTWARE.

21. Bazua, E., "EQFASES 2.0", F.Q. U.N.A.M.

22. Linhoff March, "Supertarget 1.0", Linhoff March.