



**Universidad de Matanzas
"Camilo Cienfuegos"**

MONOGRAFIA

**METODOS DE INTEGRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE
PLANTAS QUÍMICAS. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO**

Autores:

Ing. Leiby Montes de Oca Rodríguez

Ing. Pedro Romero Carmenate

Dr. Félix Juan Domínguez Alonso

Dpto. de Química e Ingeniería Química

Facultad de Ingenierías Química y Mecánica

Matanzas

2005

INTRODUCCIÓN

Los problemas relacionados con la transformación recíproca de calor y trabajo llevaron al surgimiento de la Termodinámica como ciencia, especialmente a finales del siglo XVIII con el surgimiento y desarrollo de las máquinas de vapor. El desarrollo posterior de esta ciencia ha demostrado que el núcleo original de la disciplina, formado por la relación entre calor, trabajo y temperatura, contenía los principios de los cuales se derivaban las leyes rectoras de otros fenómenos. Esto conllevó a que ampliara su campo de aplicación tecnológica a todos aquellos procesos en los que se presentaban intercambios energéticos, ya fuera en máquinas térmicas, en la ingeniería química o en la transformación de materiales, constituyendo la base para la comprensión de la variación de las propiedades físicas de las sustancias con la temperatura. Lo que implica, que a la hora de analizar procesos como la síntesis de un producto químico, la producción de electricidad en una central térmica o la refrigeración y licuación de gas natural, entre otros, se debe plantear en primer lugar la interrogante de cómo discernir su eficiencia.

Para dar respuesta a esta interrogante surgió la Integración Energética de procesos, la cual tiene su fundamento en la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica y constituye una etapa fundamental en el diseño de una nueva planta o en la optimización de una ya existente, haciendo énfasis en el uso eficiente de la Energía y la Reducción de los Efectos Medioambientales.

La Integración Energética de procesos hasta la década de los 70 del pasado siglo, sólo se realizaba usando heurísticas que se habían definido a partir de la propia experiencia obtenida en el diseño de procesos y en el desarrollo de esta especialidad dentro de la propia ingeniería química, sin embargo, con el continuo desarrollo industrial y el encarecimiento de las fuentes de energía convencionales, se ha hecho necesaria la introducción de técnicas de análisis y control que lleven a instalar tecnologías cada vez más eficientes.

En la actualidad se reportan en la literatura científica varios métodos de integración energética para lograr este objetivo, entre los que se destacan: métodos heurísticos, métodos basados en el conocimiento, y métodos termodinámicos. Estos últimos han sido los más estudiados debido a que implican un poco más a la ingeniería, aunque no dejan de presentar limitaciones en cuanto a su aplicación. Los métodos termodinámicos pueden ser clasificados en:

- Métodos basados en el análisis de la Primera Ley (Tecnología Pinch, Métodos basados en la Programación Matemática).
- Métodos basados en el análisis de la Segunda Ley (Análisis Exergético).
- Métodos basados en la combinación del análisis Económicos y la segunda ley (Análisis Exergoeconómico).

En la aplicación de estos métodos se hace primordial la selección de un proceso en el cual sea posible la integración de calor, es decir, en el cual existan corrientes energéticas que estén siendo desaprovechadas.

DESARROLLO

1.1. Antecedentes Históricos de la Optimización de Sistemas Energéticos.

Los procesos térmicos han existido desde las fases más tempranas de formación de la tierra. Sin embargo, cuando los humanos alcanzaron las primeras nociones del concepto de calor, y su conexión con la habilidad de realizar trabajo, surgió la idea de hacer uso de los sistemas térmicos.

Las máquinas de vapor fueron los primeros sistemas térmicos que utilizaron el calor para producir trabajo, y aunque se desarrollaron algunos estudios anteriores no es hasta 1700 que se comienza a trabajar más en serio con estas máquinas. Aproximadamente al mismo tiempo, el fenómeno de transferencia de calor fue totalmente comprendido, de esta manera a finales de 1700 se entendieron mejor los procesos de combustión, el calor latente, el calor específico, el gas ideal, y la transferencia de calor por conducción y convección.

Los sistemas térmicos han jugado un papel importante en el proceso de producción desde el inicio de la revolución industrial. Algunas de las aplicaciones iniciales para estos sistemas tomaron la forma de máquinas simples en procesos industriales. Dos de las grandes industrias en que estos desarrollos tuvieron impacto fueron las plantas de energía térmica y las industrias químicas. (Bohem, 1997)

Una típica industria química consiste en varios procesos de producción que se dividen en secciones de producción específicas. Estas secciones consumen calor, frío y energía para satisfacer las demandas de producción. El calentamiento y el enfriamiento se necesitan en las corrientes de producción que tienen que ser calentadas o enfriadas hasta las temperaturas designadas. Por lo general, el calor y alguna o toda la electricidad necesitada en el proceso se produce por un sistema central de utilidad, quemando el combustible para obtener vapor vivo, que generalmente se expanden en turbinas de vapor antes de llevarse a los consumidores de vapor en el proceso de producción. El sistema central de utilidad también proporciona el enfriamiento necesario para el proceso. Si existe exceso de calor, puede conducirse hacia un condensador, o puede venderse a una zona del sistema calorífico. Muy pocos combustibles se obtienen en los procesos de producción, generalmente se compran fuera. También la electricidad puede ser vendida o comprada en el mercado. (Laukkanen, 2003)

La producción y el consumo de energía se interrelacionan estrechamente y contribuyen significativamente en los costos operacionales del sistema general de energía. El calor involucrado en el proceso de producción puede recuperarse instalando intercambiadores de calor. En estos intercambiadores de calor una corriente caliente, que tiene que ser enfriada, intercambia calor con una corriente fría, que tiene que ser calentada, disminuyendo de esta manera la necesidad de utilidades, es decir de calor y de combustible. El potencial para la producción de electricidad también disminuye, a menos que el calor ahorrado pueda ser transferido a otra parte. (Laukkanen, 2003)

De esta manera el potencial de utilidad economizada en los procesos de producción debe compararse con los efectos que este ahorro tiene en la ganancia total. Si puede lograrse una mayor ganancia transfiriendo el calor a otra parte del proceso, el vapor ahorrado puede aprovecharse, de lo contrario no. (Laukkanen, 2003)

El embargo de los aceites a partir de 1970, enfoca la atención en el uso eficaz de la energía, dando énfasis a este aspecto en el diseño de planta, cosa que no ocurría con anterioridad. Hasta este punto, se había visto generalmente la energía como un aspecto pequeño y casi insignificante en el funcionamiento de las industrias. (Bohem, 1997)

Hoy en día, muchas industrias tienen en práctica diseños de procesos que se realizaron en tiempos cuando la conservación de la energía y la prevención de la contaminación no eran todavía los problemas importantes. Tales industrias se construyeron con pocas consideraciones sobre el reaprovechamiento de utilidades tales como el calor y el agua, debido a que éstas tenían un bajo costo y eran de fácil acceso. Recientemente, sin embargo, las políticas de protección del medio ambiente y el conocimiento de que recursos como el calor y el agua están limitados han llevado a esfuerzos considerables en el campo del Diseño de Procesos y de la Integración Energética. De aquí la importancia de desarrollar sistemas térmicos que utilicen eficazmente recursos como el petróleo, el gas natural, el carbón, entre otros.

El uso eficiente de la energía en un sistema térmico está determinado tanto por la Primera Ley como por la Segunda Ley de la Termodinámica, considerando energía que entra a un sistema térmico los combustibles, electricidad, flujos de materiales y de igual manera son considerados los productos y derivados. (Bohem, 1997)

Se han presentado, en la literatura actual, muchos acercamientos al análisis y optimización de sistemas energéticos industriales de gran potencia, considerándose que todos estos métodos forman parte de métodos de integración de procesos.

Una de las clasificaciones, para los métodos de integración de procesos, que se reportan son las planteadas por Gundersen (2000), dividiéndolos en: reglas heurísticas, sistemas basados en el conocimiento, métodos termodinámicos y métodos de optimización. (Figura 1.1.1)

El enfoque de las reglas heurísticas está dado por la experiencia del ingeniero y su intuición, mientras que los sistemas basados en el conocimiento intentan formalizar las reglas heurísticas dentro de las pautas de la automatización. Los métodos termodinámicos usan visiones físicas del proceso o sistema y los métodos de optimización usan modelos de optimización y algoritmos implementados a las computadoras. (Gundersen, 2000)

Otra forma en que se pueden clasificar las metodologías es usando la representación bidimensional (automático vs. interactivo y cuantitativo vs. cualitativo). En esta clasificación el Análisis Jerárquico está en el centro porque todo método de diseño razonable está (o debe estar) basado en esta idea para hacer fácil el problema del diseño completo por métodos sistemáticos. (Gundersen, 2000)

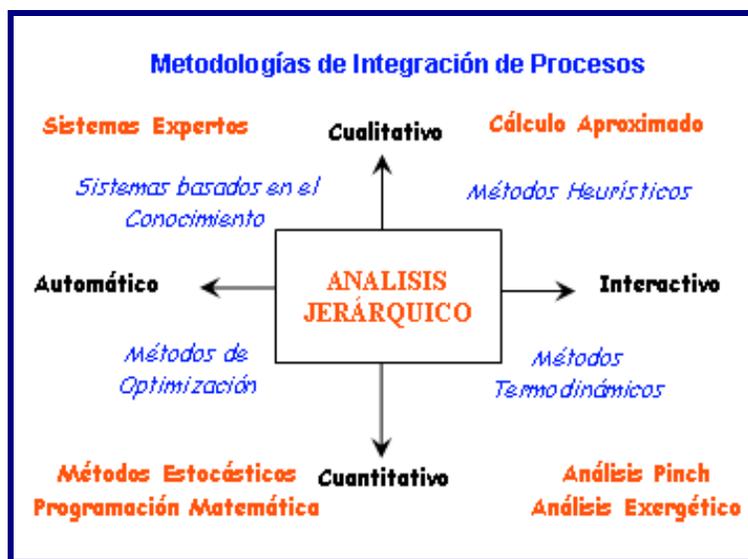


Figura 1.1.1: Clasificación de los métodos de integración de procesos según Gundersen (2000).

1.2. Metodologías de Integración de procesos.

1.2.1. Análisis Pinch o Pliege Energético.

El término “Tecnología Pinch” fue introducido por Linnhoff y Vredeveld con el objetivo de representar un nuevo conjunto de métodos basados en los principios termodinámicos que garantizaran el nivel de energía mínima en el diseño de redes de intercambiadores de calor. El uso del término “Análisis Pinch” representa, a menudo, la aplicación de las herramientas y algoritmos de la Tecnología Pinch para estudiar los procesos industriales. Durante las últimas dos décadas esta metodología ha surgido como un desarrollo original en el diseño de procesos y en la conservación de la energía. (Douglas, 1998; Cheresources, 2004)

La Tecnología Pinch presenta una metodología simple para analizar sistemáticamente procesos químicos y sistemas de utilidades circundantes, con la ayuda de la Primera y Segunda Ley de la

Termodinámica. La Primera Ley proporciona la ecuación de energía para el cálculo de la variación de entalpía de las corrientes que atraviesan el intercambiador de calor, mientras que la Segunda Ley determina la dirección del flujo de calor. Esto implica que la energía calorífica sólo puede fluir en la dirección de la corriente caliente a la corriente fría, lo que prohíbe el cruce de temperaturas entre las corrientes, calientes y frías, a través de la unidad de intercambio. Haciendo uso de esta metodología es posible identificar los cambios necesarios en las condiciones del proceso que puedan tener un impacto en el ahorro energético, considerando que estos cambios pueden lograrse con el diseño óptimo de la red de intercambiadores de calor. ([Cheresources, 2004](#))

Como ya se ha planteado, el Análisis Pinch es una herramienta del análisis termodinámico basada en la Primera Ley de la Termodinámica. Su filosofía principal es disponer de los puntos o áreas de potencia antes del diseño. En la metodología básica de Pinch, Pliegue de Recuperación de Calor, los objetivos son los consumos mínimos de utilidades, el número mínimo de unidades de intercambio, el área mínima del intercambiador de calor y el costo total mínimo. ([Douglas, 1998](#))

Hohmann (1971) fue la primera persona en descubrir que el consumo de utilidad mínimo de una red de intercambiadores de calor puede calcularse directamente de la información de las corrientes, aunque independientemente de él, Linnhoff (1979) arribó a la misma conclusión, desarrollando esta metodología en una herramienta industrial. ([Laukkanen, 2003](#))

Los datos necesarios en el Análisis Pinch son los de las corrientes en el proceso que va a ser analizado, es decir las corrientes que necesitan ser calentadas o enfriadas. Los datos de estas corrientes que se necesitan son las temperaturas de entrada y salida y la capacidad de flujo de calor de la corriente (flujo másico por el calor específico de la corriente). Cuando estos datos se han obtenido se puede empezar el cálculo para el consumo mínimo de utilidad. ([Laukkanen, 2003](#))

Las reglas básicas planteadas por Laukkanen ([2003](#)) para diseñar el área de consumo mínimo de utilidades según el Análisis Pinch son:

- No se transfiere calor a través del punto de Pinch.
- No se usan utilidades frías sobre el punto de Pinch.
- No se usan utilidades calientes por debajo del punto de Pinch. ([Laukkanen, 2003](#))

De igual manera, Ginusss ([2005](#)) plantea que la Tecnología Pinch proporciona herramientas para acometer el diseño de una red de intercambio de calor, obteniendo en un diseño preliminar de la red los valores mínimos para varios parámetros del proceso como son: las utilidades mínimas y nivel de dichas utilidades (proporcionando los costos de operación), y el número mínimo de unidades de intercambio de calor, así como el área de dichas unidades (proporcionando una estimación de los costos de adquisición).

Estos valores mínimos se pueden obtener sin realizar un diseño detallado de la topología de la red de intercambio, o de los cambiadores que la forman, sino únicamente a partir de los datos térmicos de las corrientes que constituyen el proceso. Por este motivo, la tecnología Pinch es muy útil para realizar una estimación rápida del rendimiento de una alternativa de diseño; para obtener información que permita proponer modificaciones y mejoras en esta alternativa de diseño; o para comparar varias alternativas sin tener que completar el diseño de cada una de ellas.

Una vez realizado el diseño preliminar de la red de intercambio de calor, dicho método proporciona herramientas para diseñar una red de intercambio de calor que alcance los valores mínimos de costo de inmovilizado y consumo energético. (Ginuss, 2005)

En una amplia gama de industrias, el Análisis Pinch se acepta como el método para identificar las oportunidades de conservación de la energía. Este método atrajo el interés industrial a principios de los años setenta, en contraste con el aumento del precio de los aceites. En un acercamiento de la ingeniería, pero con un rigor científico incorporado, el Análisis Pinch cuantificó el potencial para reducir el consumo de energía a través de la integración de calor en el diseño mejorado de redes de intercambiadores de calor. Desde entonces, el análisis Pinch ha ampliado su alcance para incluir sistemas de separación y reacción en procesos individuales así como, en procesos complejos íntegros.

Las técnicas más actuales evalúan rápidamente la inversión y los costos de la operación, implicados en las opciones del diseño, que reducen el consumo interno de la energía, mejoran la flexibilidad de operación, y, los más recientes cuantifican el alcance para reducir las emisiones relacionadas con la combustión. Además los conceptos básicos de estas técnicas, se han extendido a los problemas de transferencia de masa para dar visiones similares en los consumos mínimos con implicaciones medioambientales significativas. (Bohem, 1997)

El Análisis Pinch comienza con los balances de materiales y energía en el proceso. Usando esta metodología es posible identificar cambios apropiados en las condiciones del proceso que permitan un impacto para el ahorro de energía. Al establecerse los balances de masa y energía puntos o áreas, para el ahorro de energía, pueden ser tenidos en cuenta para el diseño de la red de intercambiadores de calor. El método considera que estos puntos o áreas se establecen durante el diseño de la red. Las áreas o puntos pueden ser una red para las cargas de utilidades a varios niveles (por ejemplo, niveles de vapor y refrigeración). Los niveles de utilidades suministrados a un proceso pueden ser parte de un sistema de utilidades centralizado (por ejemplo, sistemas de vapor en sitios), usado cuando cargas apropiadas, de varias fuentes de vapor, pueden ser identificadas con el objetivo de minimizar el consumo de energía en el mismo.

La Tecnología Pinch, por tanto, provee una metodología consistente para ahorrar energía, desde el balance de materiales y energía básico hasta el sistema de utilidades completo de un sitio. (Linnhoff, 1996)

La metodología del Análisis Pinch, ampliamente difundida, se ha venido aplicando a redes de intercambiadores de calor en diferentes procesos industriales. Esta tecnología ha producido mejoras significativas en la eficiencia de la energía y del capital en diferentes industrias a nivel mundial. Ha sido sustancialmente aplicado en procesos petroquímicos, en industrias de química básica, de alimentos y de papel. En nuestro país los principales estudios se han realizado en la producción de azúcar y sus derivados. (Cheresources, 2004)

Recientemente se verificó, utilizando Análisis Pinch, un sistema de calentamiento para una red de intercambiadores de calor en una destilería de alcohol, dando un ahorro de más del 10% del vapor y una inversión que puede ser recuperada en poco tiempo. Durante la aplicación de esta metodología se identificaron las principales deficiencias energéticas del proceso, como son el desaprovechamiento del calor del mosto; calentamiento deficiente de la batición; alto consumo de vapor de la columna por baja temperatura del alimento; serios problemas de contaminación por el mosto caliente. Además de los beneficios económicos se obtuvieron mejoras en el medio ambiente y en la posibilidad de cogenerar. Con este estudio se logró comprobar que el análisis Pinch es una herramienta potente para la integración de procesos. (Cheresources, 2004)

Se han realizado, además, estudios energéticos en ingenios productores de azúcar crudo, no sólo aplicando los balances energéticos convencionales sino utilizando la Tecnología Pinch, obteniendo mejoras apreciables en el esquema energético de la planta. Se logró detectar el gran desbalance que existe en cuanto a vapor generado por los equipos primarios y el vapor utilizado en el proceso tecnológico, lo que causa un déficit de bagazo apreciable. Con la aplicación de esta metodología se tiene una amplia información sobre la magnitud de las pérdidas, así como su nivel de jerarquización y la forma de solución de los problemas encontrados. (Ponce, Silva and Nebra, 2000)

1.2.2. Métodos de Optimización Matemáticos para la Integración Energética.

El diseño apropiado de redes de intercambiadores de calor [*Heat Exchanger Networks*, (HENs)] lleva a ahorros considerables en el consumo de energía en las industrias de procesos. Durante las últimas tres décadas, se han extendido las investigaciones en esta área. Los mayores acercamientos para el diseño de HENs fueron la Tecnología Pinch (abordado con anterioridad), y los Métodos de Optimización Matemáticos.

Estos últimos involucran la formulación de un problema de optimización con restricciones, las principales investigaciones desarrolladas en esta área han sido publicadas por Gundersen y Naess (1988), Jezowski (1994), Shenoy (1995). Los Métodos de Optimización Matemáticos para la síntesis de redes de intercambiadores de calor han sido clasificados como optimizaciones secuenciales y simultáneas. (Floudas, 1995)

En la optimización simultánea, el problema de optimización se formula haciendo uso de la superestructura de la red de intercambiadores de calor. La idea básica de una superestructura es encajar todas las configuraciones posibles de la red y hacerlas coincidir con las corrientes del proceso. Yee, Grossmann, y Kravanja (1990) propusieron una superestructura basada en la programación no lineal de enteros mixtos [*Mixed Integer non-linear Program*, (MINLP)] para el diseño de las redes de intercambiadores de calor. Si los costos fijos para el intercambiador de calor no se conocen, entonces puede ser formulado un modelo de programación no lineal [*Non-Linear Program*, (NLP)], como el desarrollado por Yee et al. (1990). Debido a esto y otras limitaciones, se usan generalmente, modelos MINLP para el diseño de redes de intercambiadores de calor por optimización simultánea. (Shivakumar and Narasimhan, 2002)

En la optimización secuencial el diseño procede secuencialmente, determinando primero los requerimientos mínimos de utilidades, seguido del número mínimo de intercambiadores y finalmente el costo mínimo de inversión de la red de intercambiadores de calor. La limitación fundamental de esta optimización es que el intercambio entre la energía y el costo capital no es considerado simultáneamente y pueden obtenerse otras redes subalternas óptimas. Sin embargo, la optimización simultánea provee el intercambio apropiado, ya que la estructura de la red, los costos y áreas de los intercambiadores así como los requerimientos de utilidades son determinados simultáneamente. (Shivakumar and Narasimhan, 2002)

Para proponer el problema de optimización en la superestructura de la red de intercambio, se requiere que encajen varias alternativas del diseño de la red. La superestructura de la red está compuesta por las superestructuras de las corrientes individuales que abarcan todas las combinaciones posibles que se asocian a esa corriente.

Los problemas de optimización que se formulan usando las superestructuras son modelos típicos de MINLP. En estos modelos, se usan las variables de enteros binarias para denotar la existencia o ausencia de intercambiadores, y proporciones de flujo, las temperaturas y cargas de calor de los intercambiadores son escogidas como variables continuas del problema de optimización. (Shivakumar and Narasimhan, 2002)

Coincidiendo con lo expuesto anteriormente, Biegler (1997) plantea que existen dos estrategias mayores para la síntesis de una red de intercambiadores: optimización secuencial y optimización

simultánea. En la optimización simultánea se presenta un modelo MINLP en el cual la recuperación de energía y el cálculo de las áreas se optimizan simultáneamente. Mientras que la optimización secuencial provee procedimientos sistemáticos que permiten la automatización de los problemas de síntesis en una computadora. Los modelos, tales como programación lineal [*Linear Program*, (LP)], programación no lineal (NLP) y programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) permiten ampliar los tipos de problemas a tener en cuenta (utilidades múltiples, bifurcación de corrientes, entre otros). Para desarrollar los métodos secuenciales se asume que la red de intercambio es óptima o cercana al óptimo cuando cumple con las siguientes reglas heurísticas: (Biegler, Grossma and Westerberg, 1997)

- Costo mínimo de utilidad.
- Número mínimo de unidades de intercambiadores.
- Costo mínimo de inversión.

Las metodologías basadas en la Programación Matemática para el diseño, integración, problemas de operación, o para problemas de síntesis de procesos, consisten en tres pasos principales. El primero de los pasos es el desarrollo de las alternativas, para la selección de la solución óptima. El segundo es la formulación de un programa matemático que involucra variables discretas y continuas, para la selección de la configuración y los niveles de operación respectivamente. El tercer paso es la solución del modelo de optimización que arroja la solución óptima.

Durante la última década adelantos significativos han tenido lugar en las técnicas de la Programación Matemática las cuales ofrecen la posibilidad de desarrollar herramientas automatizadas para apoyar la explotación de alternativas y optimización por los ingenieros de procesos. Por ejemplo, la solución de problemas de programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) y la optimización rigurosa por programación no lineal (NLP) se han hecho realidad. Además se han obtenido avances en la capacidad para resolver problemas complejos, principalmente por técnicas de programación lineal (LP) y no lineal de enteros mixtos. También, la disponibilidad de sistemas modulados que pueden facilitar la formulación de problemas de optimización ha hecho un gran progreso, así como el desarrollo de estrategias para la solución de alternativas. En la aplicación de las técnicas de programación matemática para el diseño y síntesis de procesos, siempre es necesario proponer las alternativas de la superestructura. (IQ, 2005)

La Programación Matemática es una herramienta eficaz en el análisis y optimización de sistemas de energía debido a que generalmente se requieren a la misma vez la optimización estructural y la continua para la síntesis de un diagrama de flujo. El mayor esfuerzo debe ponerse en la formulación

y modelación de estos problemas, si no los mismos no podrán ser resueltos por las computadoras en un tiempo práctico o los resultados generados serán pobres. (Laukkanen, 2003)

1.2.3. Métodos de Optimización Energética basados en la Segunda Ley.

Típicamente, los sistemas térmicos de energía se analizan usando análisis energético que sólo se basa en la Primera Ley de la Termodinámica. La razón para esto es que normalmente un análisis de energía puede llevarse a cabo fácilmente. La principal dificultad del análisis energético radica en que no considera la calidad de la energía, es decir la Segunda Ley de la Termodinámica. Con el objetivo de superar esta limitación, fue desarrollado el Análisis Exergético que se basa en la Segunda Ley de la Termodinámica.

Según Kotas (1985), la exergía es una medida universal del trabajo potencial o de la calidad de las diferentes formas de energía respecto a un ambiente dado. La pérdida exergética proporciona una medida cuantitativa, generalmente aplicable, del proceso o la ineficacia de un sistema. Por lo que el análisis exergético se ajusta bien para el análisis de las ineficacias de una unidad, proceso o planta total. (Laukkanen, 2003)

En otras investigaciones se plantea que la exergía es la cantidad de trabajo que puede ser extraído por un consumidor de energía externo durante una interacción reversible entre el sistema y sus alrededores hasta que un completo equilibrio es alcanzado. La exergía depende de los estados relativos de un sistema y sus alrededores, al ser definidos por cualquier conjunto relevante de parámetros. Bajo completo equilibrio, la exergía es cero. Además la exergía se encuentra sujeta a la ley de conservación solamente en procesos reversibles; en todos los otros casos puede desaparecer parcial o completamente como resultado de la disipación de energía, la cual es consecuencia de irreversibilidades. Cuanto menor sea la pérdida de exergía más perfecto es el proceso. Entre las irreversibilidades que pueden presentarse en un proceso se encuentran: fricción, libre expansión, mezcla de dos gases, transferencias de calor a través de diferencias finitas de temperaturas, resistencias eléctricas, deformaciones inelásticas de sólidos y reacciones químicas, con lo que se demuestra que es casi imposible la eliminación de éstas, sólo es posible su minimización en el proceso. (Mateos, 2004)

Por otra parte se dice que la exergía de un portador de energía es una propiedad termodinámica que depende del estado del portador considerado y el estado del medio o estado de referencia, como también se le conoce. El concepto de exergía resulta ser muy cómodo para analizar el grado de perfeccionamiento termodinámico de cualquier aparato térmico y tiene la ventaja de poder aplicarse a procesos químicos, de combustión, bioquímicos, físicos, etc. (Valero, 1997; Bejan, et al, 1996)

Como se conoce la exergía es la parte de la energía transformable en trabajo útil. Por lo que se puede plantear que la energía mecánica y la eléctrica son totalmente exergía, puesto que no existen limitaciones teóricas para su transformación total en trabajo útil. Sin embargo, la energía térmica sólo es transformable en trabajo útil con un rendimiento limitado, que depende, fundamentalmente de las temperaturas del foco caliente y del ambiente, siendo, en la mayoría de los casos, más interesante conocer la exergía disponible que la energía. Si se representara el balance exergético en un diagrama T-S, quedaría como el que se muestra en la **Figura 1.2.1.** (Espinosa, Ezquerria and Castellenos, 2004)

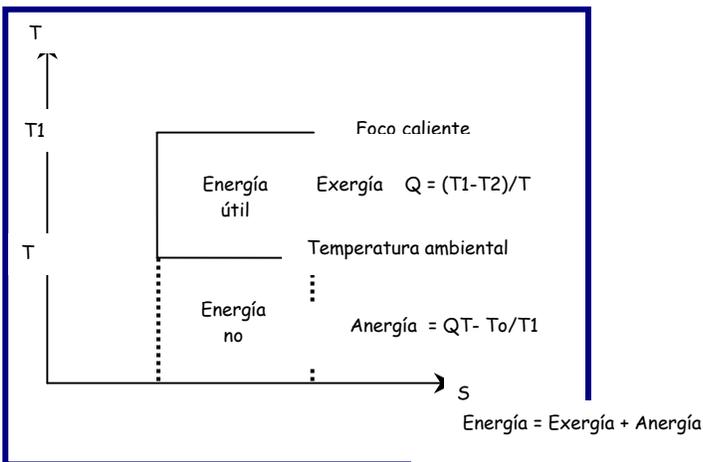


Figura 1.2.1. Representación del balance exergético en un diagrama T-S.

Aunque el Análisis Exergético es considerado a menudo un nuevo método para analizar sistemas de energía, el análisis fue introducido en el siglo pasado con la formulación matemática del Segundo Principio de la Termodinámica. Las contribuciones hacia el concepto de exergía son debidas a R. Clausius en 1865, P.G. Tait en 1868, W. Thomson y principalmente a J.W. Gibbs en 1873 y J.C. Maxwell en 1875. El desarrollo moderno del análisis de exergía fue iniciado por F. Bosnjakovic en Europa y J.H. Keenan en los Estados Unidos. El lema clásico "lucha contra la irreversibilidad" por F. Bosnjakovic marcó el inicio de este desarrollo. (Tsatsaronis, 1993)

Otros autores agregan que el Balance Exergético y la noción de exergía perdida es el instrumento capaz de cuantificar la irreversibilidad de un proceso y la pérdida de trabajo útil a que ésta da lugar, así mismo permite analizar los mecanismos básicos de la ineficiencia en la ingeniería, cosa que no es posible realizar exclusivamente con el balance energético. El balance exergético nace para unificar los diferentes flujos energéticos implicados en un proceso con el grado de irreversibilidad existente en el mismo. Por todo esto el análisis exergético es una metodología para aplicar las consecuencias de las leyes de la termodinámica al análisis y diseño de sistemas relacionados de cualquier manera con la energía y sus flujos. Su generalidad le permite además tratar tanto procesos

cíclicos como no cíclicos; procesos en máquinas térmicas y procesos de la ingeniería química; considerar en su totalidad una instalación, así como cada uno de los procesos que en ella tienen lugar por separado. (Gómez, Monleón and Ribes, 1990)

En publicaciones recientes se plantea por Hsuan Chang (2004) que el Análisis Exergético además de combinar la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica, es una herramienta poderosa por analizar la calidad y la cantidad de utilización de la energía, definiendo a la exergía como el trabajo máximo obtenible cuando el sistema se comunica reversiblemente con el ambiente. Debido a esto la definición para el ambiente más estable, que se conoce como estado muerto, se hace esencial en el análisis exergético. (Chang, 2004)

La Segunda Ley de la Termodinámica, complementa y mejora los balances de energía al permitir tanto el cálculo del valor termodinámico verdadero de un portador energético como las ineficiencias termodinámicas y las pérdidas reales de un proceso, basado en ello el concepto de exergía es extremadamente útil. (Ponce, Silva and Nebra, 2000)

La mayor desventaja del Análisis Exergético es que se necesitan los valores de la entropía para los diferentes flujos y obtenerlos puede hacerse muy difícil. Esto se hace realmente importante en la determinación de la exergía química, donde es muy difícil o incluso imposible obtener estos valores. Otra desventaja es que la ineficacia obtenida del análisis exergético no dice nada sobre cómo evitar esa ineficacia o si estas ineficacias son en absoluto evitables. (Laukkanen, 2003)

En diversas partes del mundo a finales de la década pasada se incrementaron las investigaciones sobre la aplicación de los métodos exergéticos y su implementación a los métodos basados en la primera ley de la termodinámica.

En China se realizó un estudio comparativo de un ciclo de refrigeración con dióxido de carbono con el objetivo de comparar su eficiencia utilizando una válvula de estrangulación y una de expansión, el cual se basó en la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica. En el mismo se determinaron los efectos de la temperatura de evaporación, la temperatura de salida del gas frío a la presión óptima del evaporador, los coeficientes de rendimiento, las pérdidas exergéticas en cada componente y la eficiencia exergética del proceso, demostrando que estos parámetros complementan la base teórica de la optimización y el funcionamiento de estos procesos. (Yang, et al, 2003)

El análisis exergético fue aplicado, también, en un proceso de producción de etileno en Taiwan, y a su sistema de refrigeración auxiliar. Los resultados arrojados indican que las eficiencias exergéticas de las zonas de demetanización y debutanización son las más bajas, planteándose que estas secciones son muy ineficientes, con una eficiencia exergética por debajo del 7%. (Chang, 2004)

En un estudio reciente se aplica esta metodología al proceso de hidrodealquilación de tolueno (caso de estudio de esta tesis) y a la síntesis simplificada de amoníaco. En el mismo se calculan, en ambos casos, las eficiencias globales del proceso, eficiencias individuales, cargas primarias y transformadas de cada uno de los equipos que intervienen. (Mateos, 2004)

La termodinámica clásica proporciona, entre otros, los conceptos de energía, transferencia de energía por calor y trabajo, el balance de energía, la entropía, y el balance de entropía, así como las relaciones para calcular las propiedades termodinámicas en el equilibrio. La Segunda Ley de la Termodinámica complementa y refuerza el balance de energía habilitando el cálculo del verdadero valor termodinámico de un portador de energía, y las ineficacias termodinámicas reales así como las pérdidas de los sistemas del proceso. El concepto de exergía es sumamente útil para este propósito. (Tsatsaronis, 1993)

Así, la exergía es considerada no sólo una medida objetiva de un portador termodinámico; sino que está estrechamente interrelacionada con el valor económico del portador. Cuando el costo de los portadores de energía se asigna a la exergía, esta sirve como base en la formación de los costos del proceso. (Tsatsaronis, 1993)

Aunque el análisis exergético minimiza las ineficacias de un sistema o proceso, no considera la economía de las alternativas evaluadas, por lo que existe la posibilidad de obtener soluciones que son termodinámicamente eficaces pero económicamente impracticables.

La Termoeconomía intenta superar esta desventaja del análisis exergético básico. Basada en proporcionar un valor monetario a las ineficacias termodinámicas. Un análisis termoeconómico combina los análisis termodinámicos y económicos al nivel del componente. Una comparación entre los costos de operación y la inversión, y los costos asociados a la destrucción de exergía puede ser útil en el desarrollo de diseños que mejoren la efectividad del costo en el sistema completo. Este método se publicó por El-Sayed y Evans (1970). (Laukkanen, 2003)

El objetivo del análisis Termoeconómico puede ser: (a) calcular, separadamente, el costo de cada producto generado por un sistema que tenga más de un producto; (b) entender la formación de los costos en un proceso y el costo de cada corriente en el sistema; (c) optimizar variables específicas en un solo componente del sistema; o (d) optimizar el sistema en su totalidad. (Tsatsaronis and Morán, 1997)

El término Termoeconomía se usa para indicar una combinación apropiada del análisis exergético y el análisis económico. El elemento más característico de este análisis es que se asignan costos a la exergía (no la energía) contenida en un portador energético (el costo exergético).

En 1983 el término Exergoeconomía fue introducido por Tsatsaronis para dar una caracterización más precisa e inequívoca de la combinación del análisis exergético con el análisis económico usando como variable principal el costo exergético.

Los análisis termodinámicos y económicos no tienen que ser combinados en el campo más general de la termoeconomía, pero sí se considera que en la exergoeconomía ellos se integran a través del costo exergético. En la termoeconomía se considera cualquier análisis que incluya tanto variables termodinámicas como económicas, no necesariamente combinadas. Por consiguiente, la exergoeconomía es una parte, la más significativa, de la termoeconomía. (Ponce, Silva and Nebra, 2000)

La exergoeconomía es la rama de la ingeniería que combina el análisis exergético y las consideraciones económicas. Este método proporciona a los diseñadores u operadores de plantas información no disponible a través del análisis de energía convencional y de las evaluaciones económicas, pero que es crucial para el diseño y operación de una planta. Así, la exergoeconomía puede definirse como la minimización de los costos ayudado por la exergía. El desarrollo de esta metodología, en los últimos doce años tiene claramente mostrado que la exergoeconomía no es precisamente una palabra nueva pero sí un área rápidamente creciente de la ingeniería térmica con interacciones directas con otras áreas. La **Figura 1.3.1** muestra esquemáticamente algunas de estas interacciones, resultados del uso de la exergoeconomía para la síntesis, el análisis de los costos y la simulación de sistemas térmicos y además, provee de información útil para el análisis, evaluación y optimización de estos sistemas así como para la aplicación de sistemas expertos al diseño y funcionamiento de tales sistemas.

La exergoeconomía es usada para mejorar la efectividad de los costos en nuevos sistemas, el desempeño y la efectividad de los costos de sistemas existentes y para ayudar en la decisión con relación al mantenimiento de estos sistemas y de esta manera asignar fondos de investigación y desarrollo. (Tsatsaronis, 1996)

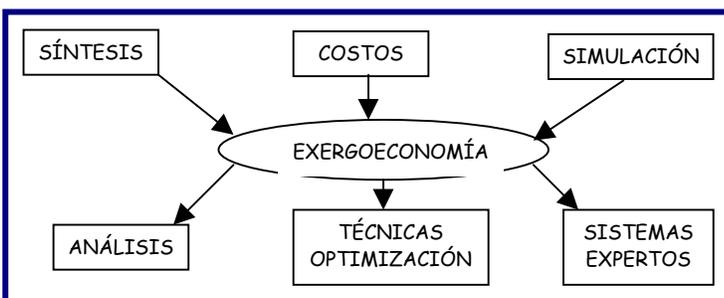


Figura 1.3.1: Interacción de la Exergoeconomía con otras áreas de la ingeniería.

En la literatura se reportan diferentes metodologías para el cálculo Exergoeconómico, pero todas tienen una característica en común: reconocen que la exergía, no la energía, es la variable de valor, y asignan costos, o precios a las variables exergéticas. Las diferencias quedan en los datos que cada metodología requiere, en el procedimiento para analizar y, eventualmente, en la optimización del sistema de energía. Pueden diferir además, en la complejidad del sistema que puede manejarse, y en la cantidad y calidad de los resultados. Los objetivos de las metodologías de exergoeconomía pueden incluir (Tsatsaronis, 1997):

1. *Optimización del diseño y/o la operación, el mantenimiento de un sistema de energía.*

En este caso, el objetivo es la minimización del costo unitario de exergía del producto, sujeto a restricciones dadas:

$$\min - c_p = \frac{c_F * \dot{\epsilon}_F + \dot{C}}{\dot{\epsilon}_p} \quad (1.1)$$

Donde: C_p = costo unitario del producto exergético

C_F = costo unitario del combustible exergético

ϵ_p = proporción de flujo exergético para el producto.

ϵ_F = proporción de flujo exergético para el combustible.

C = proporción de costos debido a gastos importantes apropiados y otros costos asociados.

La Ecuación 1.1 puede ser aplicada a la planta en su totalidad, a un subsistema, o a un componente simple de la planta. La proporción de costos C , depende de la definición del problema.

2. *Costos de las cantidades energéticas.*

2^a. Si un sistema de energía o un proceso químico entrega más de un producto, entonces la distribución apropiada de los costos energéticos a los diferentes productos requiere del uso de la exergía. Esta distribución es crítica ya que (a) los costos energéticos son mayores y (b) los costos se necesitan para establecer los precios y/o evaluar las ganancias de cada producto.

2^b. Es útil saber los costos unitarios del principal flujo de exergía, y el costo unitario de la destrucción de exergía en los principales componentes de un sistema de energía. Esta información puede ser usada (a) en posibilitar estudios en la fase preliminar de diseño de un proceso complejo, para hacer evaluaciones y seleccionar la alternativa técnica; (b) en tomar decisiones sobre los procedimientos con respecto al mantenimiento, reemplazo, y funcionamiento de componentes del sistema. En ambos casos, el intercambio entre costos de exergía destruida y otros costos de operación puede ser propiamente evaluado.

Dentro de las metodologías reportadas se encuentran las desarrolladas por Tsatsaronis (1997):

- Diagramas de Eficiencia Producto/Costo: La relación entre el costo de producción del producto principal y la eficiencia exergética global de un proceso puede ser demostrada con mucha claridad en un diagrama de costo de producto/eficiencia exergética. Estos diagramas (a) requieren una mínima cantidad de información, (b) pueden ser dibujados con facilidad, e (c) ilustran muy bien la relación entre el valor de la eficiencia, los costos de inversión y operación, y los costos de mantenimiento. Dentro de las desventajas de esta metodología se incluyen (1) que es válida para sólo un punto de operación de la planta, y (2) se necesita asumir la ecuación del costo unitario de la destrucción de exergía en cada componente del proceso.

- Análisis de Cálculos Exergoeconómicos: Esta metodología requiere la expresión de la dependencia funcional de todas las variables explícitas en el balance monetario del sistema global, esto se conoce como parámetro de diseño. Este parámetro es una variable que, dentro de un rango dado, podría seleccionarse arbitrariamente por el diseñador para obtener una alternativa realizable, pero que debe seleccionarse racionalmente para obtener el diseño óptimo. Generalmente esta metodología se usa para sistemas relativamente simples dado que tiene como dificultades (a) que se requiere el costo y los parámetros termodinámicos los cuales no siempre están disponibles, usualmente no son exactos y raramente se encuentran en la forma requerida; (b) es muy costosa la formulación y solución de estos problemas, ya que incluyen un número largo de ecuaciones (lineales y no lineales) y algunas veces, inecuaciones con un número largo de variables.

- Contabilidad Exergoeconómica: La contabilidad exergoeconomía da una buena imagen de los flujos monetarios dentro del sistema global y es actualmente la única manera para analizar y evaluar, desde el punto de vista de la exergoeconomía, las instalaciones muy complejas. (Tsatsaronis, 1997)

Desde que se propuso la idea de combinar el análisis exergético y las consideraciones económicas, se han realizado incontables estudios a nivel mundial. De igual manera en la última década, en nuestro país, se han venido publicando algunos trabajos relacionados con esta temática.

Un estudio realizado en Corea propone la combinación del análisis económico y el exergético, en el cual se deriva una ecuación para el balance de los costos que puede ser aplicada a sistemas térmicos; derivando los flujos exergéticos de una corriente en térmicos, mecánicos y químicos y en un flujo de producción de entropía. Esta metodología permite obtener un juego de ecuaciones para los costos exergéticos unitarios aplicando dicha ecuación a cada componente del sistema. Este método fue aplicado a un sistema de cogeneración con turbinas de gas de 1000 kW, proporcionando además información sobre las decisiones en el diseño y funcionamiento del mismo. (Kim, et al, 1998)

Una aplicación de la teoría de costos exergético y de la evaluación exergoeconómica fue el trabajo realizado por M. Dentice d'Accadia y M. Sasso a una bomba de calor convencional con compresión de vapor. En este trabajo se incluyen los efectos del mal funcionamiento debido a otros componentes de la planta. (d'Accadia, et al, 2002)

CONCLUSIONES

Este estudio ha permitido ampliar los conocimientos acerca de los fundamentos de la Integración Energética, así como de las metodologías más usadas, proporcionando las herramientas teóricas necesarias para darle solución a cualquier problema que se pueda presentar, concluyendo que:

- La Integración Energética constituye un paso fundamental en la síntesis y diseño de una planta, ya que puede ser considerada como una herramienta para mejorar la eficiencia económica de cualquier proceso químico.
- El método termodinámico de Análisis Pinch es una herramienta simple para la integración y optimización energética de cualquier proceso, su aplicación requiere sólo del conocimiento de algunas variables termodinámicas.
- Los métodos de Programación Matemática permiten una optimización más profunda pero su desarrollo se hace más complejo debido a la formulación y solución matemática que requieren; por lo general implican el uso de software profesionales para su aplicación.
- Los métodos basados en la Segunda Ley de la Termodinámica han tomado importancia en las últimas décadas, ya que son considerados herramientas más profundas a la hora de evaluar y optimizar cualquier proceso térmico, permitiendo cuantificar los diferentes puntos de irreversibilidad en el proceso y la pérdida de trabajo útil a que esta da lugar.
- De las metodologías reportadas en la literatura se considera que la desarrollada por Douglas (1998) para el Análisis Pinch aborda de manera más específica y concreta los pasos a seguir para lograr una integración eficiente; mientras que el método planteado por Biegler (1997) refleja la forma más simple de aplicación de los métodos de programación matemática. En la aplicación de los Métodos Basados en la Segunda Ley existe una correspondencia en casi toda la literatura consultada.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Anaya, A. and Rivero. "Application of the concept Exergy to the Optimum Utilization of Energy In: Industrial Process and Equipment." Proceedings of World Congress III of Chemical Engineering. Tokyo (1986).1: 407-410.
- 2) "Applications of Mathematical Programming for automated Design and Operation of Chemical Processes". (2005). [on line], [citado el 29 de enero del 2005]. Disponible en Internet: <http://iq.ua.es>
- 3) Bejan, A., et al. Thermal design & Optimization. (1996). John Wiley & Sons, Inc.
- 4) Biegler, L. T., Grossma, I. E. and Westerberg, A. W. Systematic Methods of Chemical Design. (1997).
- 5) Boehm, R. F. Developments in the Design of Thermal Systems. (1997). Cambridge University Press.
- 6) Chang, H. (2004). Exergy Analysis and Exergoeconomic Analysis of an Ethylene Process. Department of Chemical Engineering, Tamkang University.
- 7) d'Accadia, M. D., et al. "Determining the optimal configuration of a heat exchanger (with a two-phase refrigerant) using exergoeconomics." Applied Energy (2002). **Volume 71 March**: 191-203.
- 8) "Diseño integrado de procesos. Introducción". (2005). [on line], [citado el 29 de enero del 2005]. Disponible en Internet: <http://ginusss.eresmas.com>
- 9) Douglas, J. M. Conceptual Design of Chemical. (1998). Mc Graw-Hill Chemical Engineers Science.
- 10) Espinosa, R. and Ezquerro, Y. "Integración de potencia y proceso en un ingenio productor de azúcar crudo." (2000). *Departamento de Ingeniería Química U.C.L.V. (CUBA)*.
- 11) Espinosa, R. "Integración primaria de potencia del proceso de producción de alcohol." Centro Azúcar (2004). **No. 1 enero - marzo**: 18 - 24.
- 12) Espinosa, R., Ezquerro, Y. and Castellanos, J. (2004). "Análisis de algunos índices del trabajo energético en centrales azucareros." Centro Azúcar **No. 2 abril - junio**: 15 - 21.
- 13) Floudas, C. A. Nonlinear and mixed integer optimization. (1995). New York, Oxford University Press.
- 14) Gómez, J. L., Monleón, M. and Ribes, A. Termodinámica: Análisis Exergético. (1990). Barcelona.
- 15) Gundersen, T. IEA- a process integration primer. (2000). SINTEF Energy Research, Dept. of Thermal Energy and Hydro Power.
- 16) Kim, S.-M., et al. "Exergoeconomic analysis of thermal systems". (1998). *Mechanical Engineering Department, Chung-Ang University Seoul*. [on line], [Recibido 16 Abril 1997. Disponible online 6 Agosto 1998. Citado 2004 -12 -27]. Disponible en Internet: <http://www.sciencedirect.com>

- 17) Laukkanen, T. (2003). A Methodology for Cost-Effective Thermal Integration of Production Plant Sections and the Utility System. *Department of Mechanical Engineering, Helsinki University of Technology*. **Degree of Licentiate of Science in Technology**.
- 18) Linnhoff, B., et al. User guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. (1996).
- 19) Mateos, E. (2004). Análisis Exergético de una planta de hidrodealquilación de tolueno y una planta simplificada de síntesis de amoniaco mediante el método de distribución de cargas exergéticas. *Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Universidad de las Américas, Puebla*. México. **Licenciatura en Ingeniería Química con área en Ingeniería de Procesos**.
- 20) Peter, M. S. and Timmerhaus, K. D. Plant Design and Economics for Chemical Engineering. (1979). 3ra Edición. Mc Graw Hill
- 21) "Pinch Technology: Basics for Beginners". (2004). [on line] [citado el 29 de enero del 2005]. Disponible en Internet: <http://www.cheresources.com>
- 22) Ponce, F. R., Silva, E. and Nebra, S. A. (2000). Thermoeconomic Analysis of Big GT CC Cogeneration Plant. Brazil.
- 23) Shivakumar, K. and Narasimhan, S. "A robust and efficient NLP formulation using graph theoretic principles for synthesis of heat exchanger networks". Computers and Chemical Engineering. (2002).**No. 26**: 1517 – 1532.
- 24) Tsatsaronis, G. "Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems." Energy Combustion Science. (1993).**No. 19**: 227 – 257.
- 25) Tsatsaronis, G. "Exergoeconomics: Is It Only a New Name?" Chemical Engineering Technology (1996).**No. 19**: 163 – 169.
- 26) Tsatsaronis, G. (1997) "A Review of Exergoeconomic Methodologies". *Center for Energy Power. Tennessee Technological University*. Cookeville, Tennessee.
- 27) Tsatsaronis, G. and Morán, M. "Exergy - Aided Cost Minimization." Energy Conversion and Management (1997).**Vol. 38 No. 15-17**: 1535 – 1542.
- 28) Valero, A. "Los balances de Entropía, Exergía y Energía." Ingeniería Química (1997). **Mayo**.
- 29) Yang, J. L., et al. "Exergy analysis of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle with an expander." (2003). [on line] [Recibido 1 Junio 2003. Disponible online 5 Octubre 2004. Citado 2004-2-27]. Disponible en Internet: <http://www.sciencedirect.com>