



MX9500086

MX9500086

INIS-mf--14926

---

**FUNDAMENTOS DEL ANALISIS COMBINADO DE EXERGIA Y TECNOLOGIA PINCH  
Y SU APLICACION A LA INDUSTRIA ENERGETICA EN MEXICO**<sup>1</sup>

• Miguel Angel Rodríguez Toral<sup>2</sup>

• Humberto Rangel Dávalos

**INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO. Eje Central Lázaro Cárdenas No.152, C.P.  
07730, México, D.F. Tel: 368-59-11 Ext. 20451. Fax: 368-45-37.**

**RESUMEN**

*La planta instalada de la industria energética en México posee un potencial enorme para hacer readaptaciones con la finalidad de incrementar la eficiencia en el uso de la energía. Una de las herramientas de ingeniería más modernas para realizar tales readaptaciones consiste en una apropiada combinación de análisis de Exergía y Tecnología Pinch. En este trabajo se presentan los fundamentos de esta nueva metodología, además se mencionan las áreas potenciales de aplicación dentro de nuestra industria energética.*

*Así pues, se muestra que el Análisis Combinado de Exergía y Tecnología Pinch (ACETP) sirve para analizar sistemas que involucran calor y potencia de una manera conceptual y sencilla de entender y aplicar.*

*Los sistemas en los que se menciona la aplicabilidad de esta nueva metodología involucran Procesos Criogénicos, Sistemas de Generación de Potencia y Sistemas de Cogeneración.*

---

<sup>1</sup> Trabajo preparado para el " VII SEMINARIO SOBRE ESPECIALIDADES TECNOLOGICAS IIE-IMP-ININ ". Septiembre 7, 1994. IMP, D. F., México.

<sup>2</sup> Autor a quien deberá dirigirse la correspondencia motivo de este trabajo.

## CURRICULUM VITAE

El Ing. Miguel Angel Rodríguez Toral, obtuvo el grado de Licenciatura en Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM y el de Maestría en Ciencias en el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester (UMIST), Inglaterra.

En el Instituto Mexicano del Petróleo, desde 1988, se ha desarrollado profesionalmente realizando actividades de Ingeniería y Desarrollo Tecnológico en las áreas de Transferencia de Calor, uso eficiente de la Energía y Cogeneración.

El Ing. Rodríguez Toral ha presentado ponencias y participado en un sinnúmero de Convenciones Nacionales e Internacionales sobre su especialidad en México e Inglaterra.

Por su experiencia y a su reciente reingreso al Instituto Mexicano del Petróleo, después de haber terminado sus estudios de Maestría, sus intereses Profesionales y de Desarrollo Tecnológico están enfocados a la Integración Energética de Procesos, o Tecnología Pinch; Síntesis de Redes de Intercambiadores de Calor (Incluyendo el diseño detallado del equipo); Optimización de Servicios Auxiliares; Cogeneración; Potabilización de Agua de Mar vía Recuperación de Calor, Análisis de Exergía y Análisis Termodinámico de Sistemas de Turbinas de Gas.

## **CURRICULUM VITAE**

— **Ing. Humberto Rangel Dávalos**

*Obtuvo la Licenciatura en Ingeniería Química en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (1969 - 1973).*

*Profesionalmente desde 1974 ha colaborado en el Instituto Mexicano del Petróleo en el área de Transferencia de Calor, ocupando en la actualidad la Jefatura del Departamento de Diseño de Equipo de Proceso de la Subdirección de Ingeniería de Proyectos de Explotación, siendo responsable además de la implementación y actualización de programas de computadora de su departamento.*

*Ha preparado diversos trabajos y participado como asistente en diferentes Congresos Nacionales y Extranjeros. Por parte del Instituto Mexicano del Petróleo ha sido expositor de cursos internos regionales, nacionales e internacionales sobre Transferencia de Calor. Asimismo, es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 1988.*

*Es Profesor de la Facultad de Química de la U.N.A.M. desde 1989.*

## **1. INTRODUCCION**

*La manera apropiada de identificar ahorros de energía y capital consiste en utilizar Integración Energética de Procesos -o Tecnología Pinch- y Análisis de Exergía. La Tecnología Pinch (1), ha demostrado ser una poderosa herramienta de ahorro de energía, capital y disminución de emisiones contaminantes de procesos industriales. Distintas compañías han manifestado haber obtenido ventajas al aplicar dicha tecnología (2). Para sistemas de Calor y Potencia la Tecnología Pinch tradicional no puede proporcionar los objetivos energéticos completos, por lo tanto se requiere establecer un nuevo enfoque que considere una combinación de dicha Tecnología con Análisis de Exergía. Por otra parte, los estudios tradicionales de Análisis de Exergía (3-5) han alcanzado buena reputación tanto en el área académica como en aplicaciones industriales, sin embargo, no han conseguido hasta ahora el tremendo éxito logrado por la Tecnología Pinch.*

*Recientemente (6-8) se ha propuesto un nuevo enfoque para analizar sistemas de calor y potencia. Esta nueva herramienta de ingeniería se denomina Análisis Combinado de Exergía y Tecnología Pinch (ACETP), y esta enfocada a la obtención de objetivos energéticos en potencia.*

*En este trabajo, se presentan los fundamentos del ACETP, su aplicación directa a la construcción de los diagramas de distribución global de Exergía para Sistemas de Turbinas de Gas y adicionalmente, se mencionan las áreas potenciales de aplicación de dicha nueva herramienta de Ingeniería.*

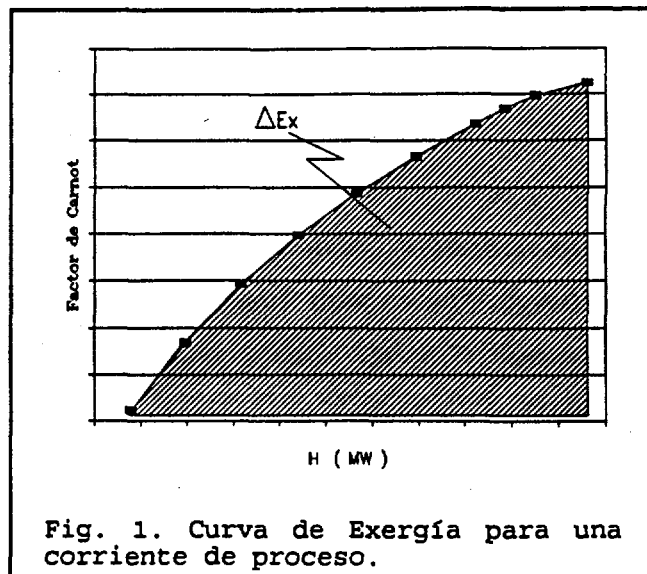
## **2. ANALISIS COMBINADO DE EXERGIA Y TECNOLOGIA PINCH**

*Uno de los fundamentos del ACETP es la construcción de las curvas de Exergía, las cuales se representan en un diagrama Factor de Carnot ( $\eta_c$ )-Entalpía (H).*

*Para una corriente de proceso que sufre un cambio de entalpía en un cierto intervalo de temperatura, la curva de exergía correspondiente puede ilustrarse como se indica en la Fig. 1. La exergía es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener de cualquier*

cantidad de energía.

Ahora, se mencionan las definiciones de factor de carnot ( $\eta_c$ ) y cambio de Exergía ( $\Delta Ex$ ). Se consideraron fórmulas simplificadas para el cálculo de exergía (3) las cuales requieren conocer únicamente los perfiles de temperatura y entalpía.



Para cualquier cambio de exergía:

$$\Delta Ex = \Delta H * \eta_c \quad (1)$$

A temperatura y presión constante:

$$\Delta Ex = \Delta H \left[ 1 - \frac{T_0}{T} \right] \quad (2)$$

A presión constante, pero con variación de temperatura:

$$\Delta Ex = \Delta H \left[ 1 - \frac{T_0}{T_{LM}} \right] \quad (3)$$

Donde:

$$T_{LM} = \frac{T_f - T_i}{\ln \left[ \frac{T_f}{T_i} \right]} \quad (4)$$

Las pérdidas de Exergía ( $\Delta Ex_{loss} = \sigma T_{0he}$ ) para un proceso de transferencia de calor (3,8) se obtienen de:

$$\Delta Ex_{loss} = \sigma T_{0he} = \Delta Ex_{fc} - \Delta Ex_{rc} \quad (5)$$

Donde 'fc' y 'rc' se refieren a la fuente y al receptor de calor respectivamente.

El concepto de curva de exergía se amplía cuando se utilizan en una misma gráfica escalas de entalpía (H), temperatura (T) y factor de Carnot ( $\eta_c$ ) para obtener la representación básica de la curva Exergía-Pinch para una corriente de proceso (7,8) tal como se muestra en la Fig.2.

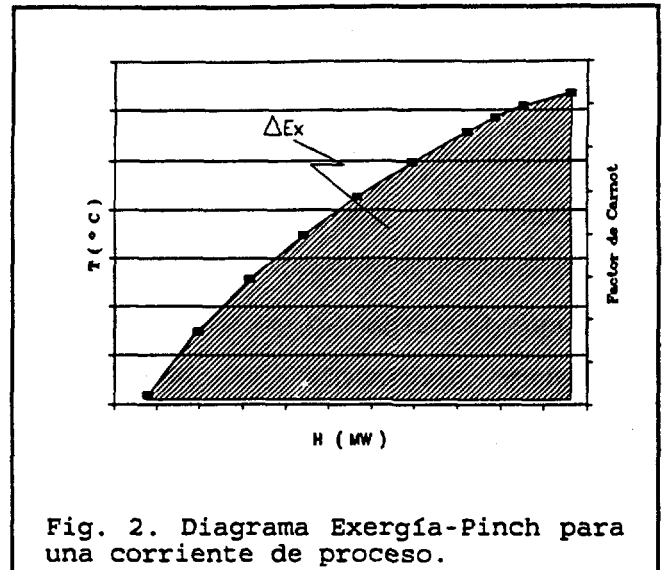


Fig. 2. Diagrama Exergía-Pinch para una corriente de proceso.

En las siguientes secciones se mencionan los demás fundamentos del ACETP.

### 3. OBJETIVOS ENERGETICOS EN POTENCIA

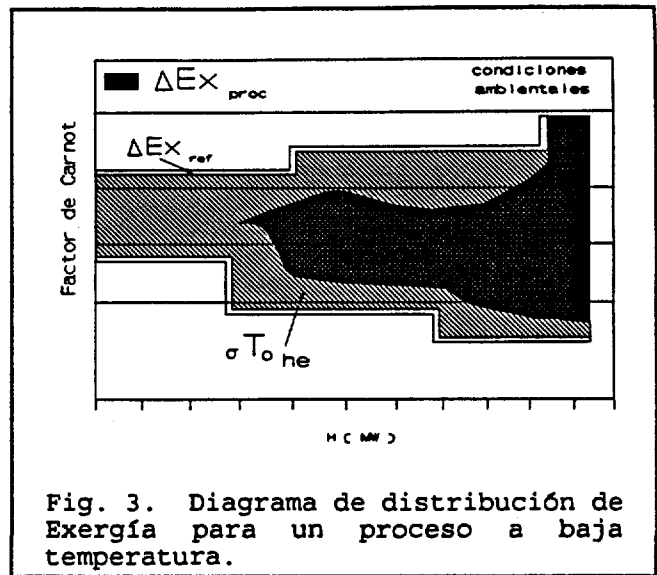
De acuerdo con la filosofía de la Tecnología Pinch, en Ingeniería existen dos etapas: Determinación de Objetivos Energéticos y Diseño del Sistema.

Para ilustrar el concepto de objetivos energéticos en potencia, se puede considerar, como ejemplo, un proceso a baja temperatura (7). La exergía -o trabajo- requerido por el sistema de refrigeración  $\Delta Ex_{ref}$ , mostrado en la Fig.3, se distribuye en: exergía perdida en intercambio de calor ( $\sigma T_{o,hc}$ ) y exergía suministrada al proceso ( $\Delta Ex_{proc}$ ).

Mediante la aplicación del ACETP, se establece que las modificaciones en áreas de exergía están relacionadas directamente con cambios en potencia, creando así objetivos energéticos en potencia (6-8). Esto es aplicable para cualquier sistema de Calor y Potencia que opere por arriba o por debajo de las condiciones ambientales (6). La distribución global de exergía mostrada en la Fig. 3 sirve para identificar objetivos energéticos en potencia, o ahorros en potencia, simplemente mediante la modificación de las áreas de exergía.

#### 4. ANALISIS COMBINADO DE EXERGIA Y TECNOLOGIA PINCH APLICADO A SISTEMAS DE TURBINAS DE GAS

*Los Sistemas de Turbinas de Gas poseen muchas ventajas tecnológicas y comerciales sobre los sistemas convencionales de generación de potencia. Con esa visión en mente y considerando las aplicaciones actuales y potenciales de las Turbinas de Gas, se presentan aquí los fundamentos del ACETP para éstos sistemas.*



#### 4.1 BALANCE GLOBAL DE EXERGIA PARA UNA TURBINA DE GAS

*Este tipo de balance global ha sido aplicado a distintos procesos (6,7) y es de aplicación rigurosa para cualquier sistema de calor y potencia. Como ejemplo de aplicación del balance global de exergía, se considera la Turbina de Gas en Ciclo Simple.*

*En una Turbina de Gas en Ciclo Simple, el fluido de trabajo (aire) se comprime, luego pasa a través de la cámara de combustión donde con el uso de combustible incrementa su temperatura. El fluido de trabajo pasa entonces a la sección de expansión donde se produce trabajo para el funcionamiento del compresor y para una carga externa, por ejemplo para producción de potencia. Después de pasar por la sección de expansión, el fluido de trabajo se convierte en una corriente de gases exhaustos que salen por el escape de la máquina (ver Fig. 5).*

*En la cámara de combustión, el combustible proporciona exergía de calor al fluido de trabajo (9). En este estudio, el cambio de exergía del fluido de trabajo, que pasa a través de la sección de combustión, se define como  $\Delta Ex_{fuel}$ , mientras que la corriente de gases exhaustos sufre un cambio de exergía desde las condiciones del escape de la turbina hasta las condiciones*

ambientales, a este cambio de exergía se le denomina  $\Delta Ex_{exht}$

El balance global de exergía para una Turbina de Gas en Ciclo Simple se ilustra en la Fig.4 y puede expresarse como sigue:

El combustible proporciona exergía de calor al fluido de trabajo,  $\Delta Ex_{fuel}$ , esta exergía hace que la turbina de gas trabaje. Una porción de  $\Delta Ex_{fuel}$  se va a la atmósfera en la corriente de gases exhaustos  $\Delta Ex_{exht}$ . La exergía restante es la exergía para la generación de potencia,  $\Delta Ex_{power}$ .

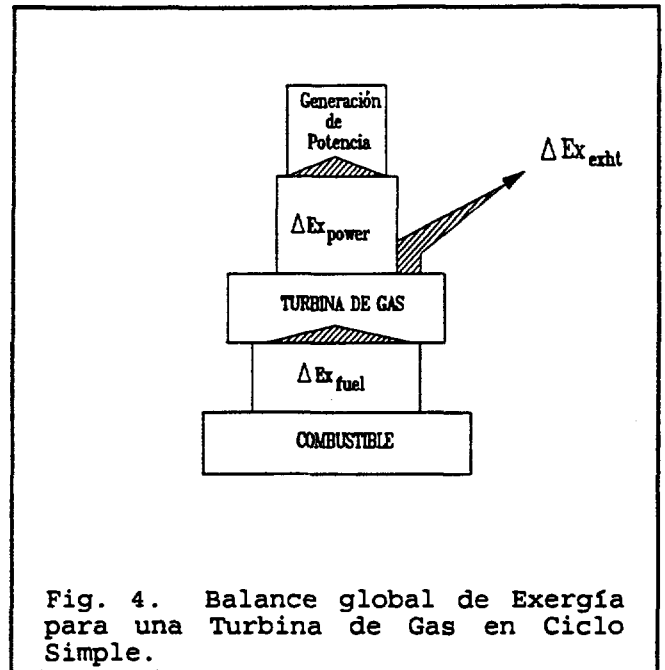


Fig. 4. Balance global de Exergía para una Turbina de Gas en Ciclo Simple.

Es importante mencionar que  $\Delta Ex_{power}$  se utiliza para la generación de potencia e intrínsecamente se utiliza para cubrir las irreversibilidades termodinámicas internas de la Turbina de Gas ( $\sigma T_{0,gt}$ ), este último término incluye las ineficiencias exergéticas producidas en cada segmento de la Turbina de Gas, e.g. el compresor, la sección de expansión, efectos por fricción, etc.

Es pertinente ahora, indicar como se hace el balance global de exergía para cualquier sistema de turbina de gas.

Para la turbina de gas mostrada en la Fig. 5, de manera general, el balance global de exergía puede expresarse como:

$$Ex_1 + Eq_{fuel} = Ex_{exht} + W_{out} + \sigma T_{0,gt} \quad (6)$$

Donde:

$Ex_1$  = Exergía del aire que entra -es igual a cero-.

$Eq_{fuel}$  = Exergía proporcionada por el combustible.

$Ex_{exht}$  = Exergía de la corriente de gases exhaustos.

$W_{out}$  = Potencia de salida.



$\sigma T_{0\text{ gr}}$  = Pérdida de exergía en la Turbina de Gas.

El efecto neto de  $Eq_{\text{fuel}}$  es la adición de exergía de calor al fluido de trabajo cuando pasa del punto 2 al 3 -ver Fig. 5-, por lo tanto:

$$Eq_{\text{fuel}} = \Delta Ex_{\text{fuel}}$$

Ahora, si:

$$\Delta Ex_{\text{power}} = W_{\text{out}} + \sigma T_{0\text{ gr}} \quad (7)$$

Por lo tanto, de la ecuación (6):

$$\Delta Ex_{\text{power}} = \Delta Ex_{\text{fuel}} - \Delta Ex_{\text{exht}} \quad (8)$$

Donde  $Ex_{\text{exht}}$  de la ecuación (6) se convierte en  $\Delta Ex_{\text{exht}}$  al seleccionar las condiciones ambientales adecuadas. Este término de exergía representa las pérdidas de exergía externas.

Así, el balance de exergía de la ecuación (8) puede expresarse como:

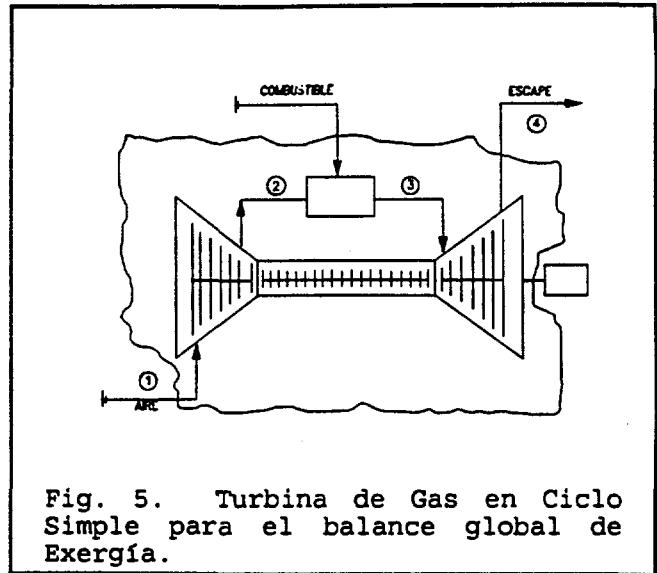
{ Exergía para Generación de Potencia } igual a  
 { Exergía de calor proporcionada por el combustible } menos { Pérdidas de exergía externas }

Ello implica que el balance global de Exergía para cualquier sistema de Turbina de Gas está dado por:

$$\Delta Ex_{\text{power}} = \Delta Ex_{\text{fuel}} - \Sigma \Delta Ex_{\text{eloss}} \quad (9)$$

Donde:  $\Delta Ex_{\text{eloss}} =$  Pérdidas de Exergía externas

La relación dada por la ecuación (9) es particularmente útil para sistemas complejos de Turbinas de Gas para los que adicionalmente al término ( $\Delta Ex_{\text{exht}}$ ) existen otras pérdidas de exergía, por ejemplo, en recuperación de calor ( $\sigma T_{0\text{ he}}$ ).



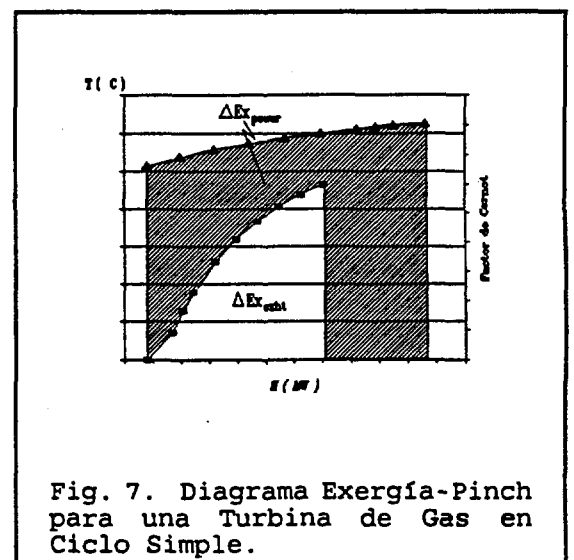
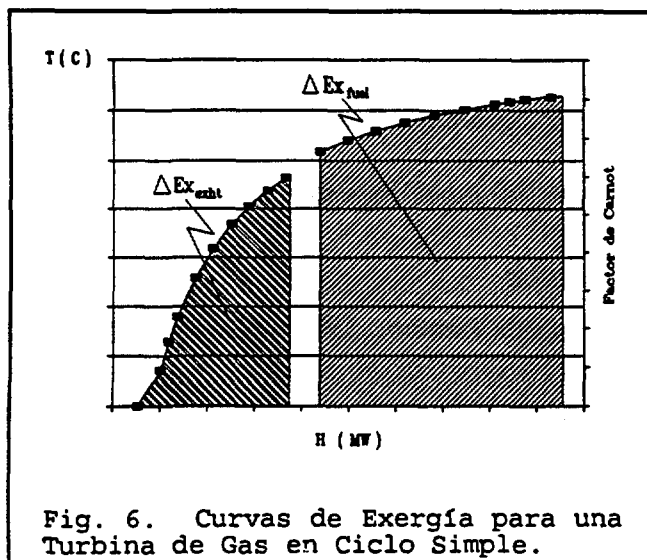
## 4.2. DIAGRAMAS EXERGIA-PINCH PARA SISTEMAS DE TURBINAS DE GAS

Para el desarrollo de éstos diagramas es necesario considerar las curvas de exergía para las corrientes involucradas. Como ejemplo ilustrativo, se considera una Turbina de Gas en Ciclo Simple. Conceptualmente, en este caso existen dos corrientes para las cuales debe representarse la curva de exergía:

- (i) El fluido de trabajo pasando a través de la cámara de combustión.
- (ii) La corriente de gases de escape.

Así, las curvas mostradas en la Fig. 6, son:  $\Delta Ex_{fuel}$ , la exergía de calor proporcionada por el combustible y  $\Delta Ex_{exht}$ , exergía de los gases exhaustos.

Mediante la aplicación de los conceptos del ACETP y de acuerdo con el balance global de exergía, se pueden combinar las áreas de exergía  $\Delta Ex_{fuel}$  y  $\Delta Ex_{exht}$  mostradas en la Fig. 6. El resultado es la obtención del Diagrama Exergía-Pinch mostrado en la Fig. 7. En dicha figura se aprecia claramente el término  $\Delta Ex_{power}$  y  $\Delta Ex_{exht}$



Con los diagramas de Exergía-Pinch propuestos, se puede visualizar fácilmente el balance global de Exergía, la distribución de temperatura, Entalpía y Exergía en Sistemas de Turbinas de Gas.

Conceptualmente, la combinación de las áreas de exergía mostrada en la Fig. 7 puede

expresarse mediante la ecuación (8). El área de Exergía resultante en la Fig. 7,  $\Delta Ex_{power}$  llamada Exergía para Generación de Potencia, representa la Exergía utilizada en la Turbina de gas e incluye la potencia generada así como las irreversibilidades internas. Por lo tanto, dicha área de Exergía es proporcional a la potencia generada.

#### 4.3. EFICIENCIAS CONSIDERADAS

Cabe mencionar que los términos de eficiencia que deben considerarse para el análisis termodinámico de Sistemas de Turbinas de Gas, de acuerdo a la metodología aquí presentada son:

Eficiencia Térmica:  $\eta_{th}$  obtenida al dividir la potencia de salida  $W_{out}$ , entre la energía suministrada por el combustible  $\Delta H_{fuel}$ :

$$\eta_{th} = \frac{W_{out}}{\Delta H_{fuel}} \quad (10)$$

Por otro lado, se propone el uso de una eficiencia en el uso de la exergía denominada:

Eficiencia Exergética Neta:  $\eta_{exs}$  obtenida al dividir  $W_{out}$  entre la Exergía para la Generación de Potencia  $\Delta Ex_{power}$ :

$$\eta_{exs} = \frac{W_{out}}{\Delta Ex_{power}} \quad (11)$$

Estos términos de eficiencia han sido ampliamente analizados para diversos ciclos modernos de Turbinas de Gas (8).

#### 5. EJEMPLOS DE DIAGRAMAS DE EXERGIA PARA CICLOS COMPLEJOS

La aplicación de los conceptos del ACETP permitió la creación de los diagramas de Exergía para distintos Sistemas de Turbinas de Gas (8).

En este trabajo, se presentan tales diagramas exclusivamente para la Turbina de Gas

con Regeneración y para la Planta de Turbina de gas en Ciclo Combinado, ver Fig. 8 - 11.

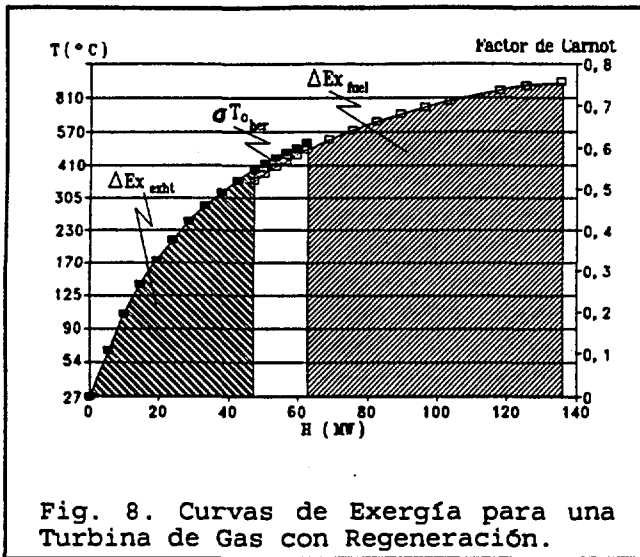


Fig. 8. Curvas de Exergía para una Turbina de Gas con Regeneración.

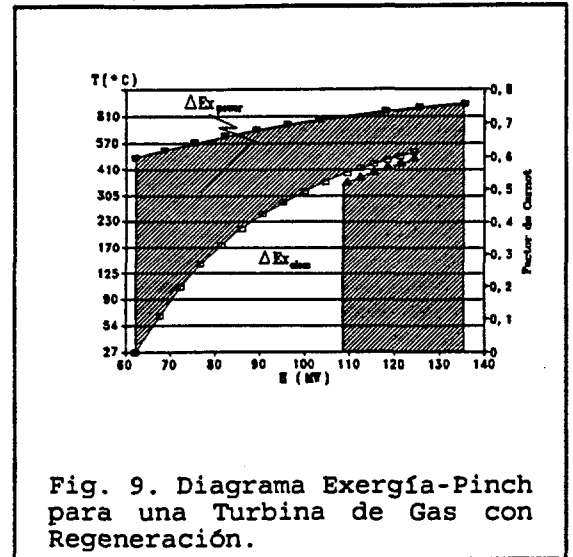


Fig. 9. Diagrama Exergía-Pinch para una Turbina de Gas con Regeneración.

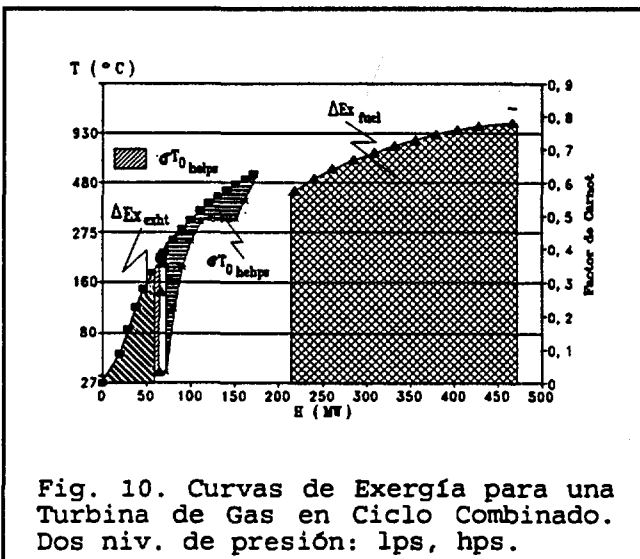


Fig. 10. Curvas de Exergía para una Turbina de Gas en Ciclo Combinado. Dos niv. de presión: lps, hps.

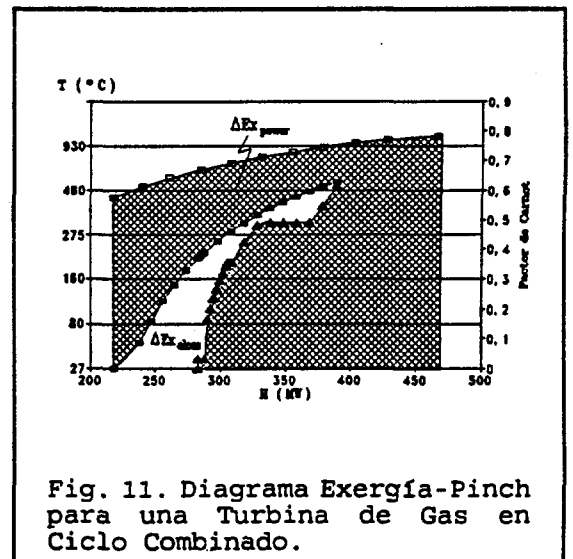


Fig. 11. Diagrama Exergía-Pinch para una Turbina de Gas en Ciclo Combinado.

*Este tipo de diagramas representan una novedosa herramienta para visualizar y entender la distribución de temperatura, Exergía y Entalpía en cualquier Sistema de turbinas de Gas, situación que potencialmente, permite identificar opciones de ahorro de energía.*

## 6. APLICACIONES POTENCIALES PARA LA INDUSTRIA ENERGETICA EN MEXICO

*Una vez presentados los fundamentos del ACETP, es pertinente indicar las aplicaciones*

*potenciales de esta nueva metodología a la industria energética en México, estas es:*

*- ANALISIS TERMODINAMICO DE SISTEMAS DE TURBINAS DE GAS. Para equipo operando o por instalar, por ejemplo, en las plantas de compresión y bombeo de gas y petróleo crudo. Aquí, es posible analizar, visualizar y proponer distintas opciones de recuperación de calor (8).*

*- PLANTAS EN CICLO COMBINADO O SISTEMAS DE COGENERACION. La conversión de plantas convencionales de generación de electricidad a plantas en Ciclo Combinado, así como los nuevos diseños se facilitan al utilizar el ACETP.*

*- AUDITORIAS ENERGETICAS. Dado que nuestros procesos industriales fueron diseñados sin considerar los fundamentos de Uso Eficiente de la Energía, existe en México un campo bastante fértil para aplicar tanto Integración Energética como ACETP.*

## **7. CONCLUSIONES**

*Se presentó una nueva metodología para el análisis de sistemas de calor y potencia. En este trabajo, tal herramienta de ingeniería denominada Análisis Combinado de Exergía y Tecnología Pinch, ACETP se aplicó a sistemas de Turbinas de Gas.*

*Los fundamentos del ACETP mostrados, permiten desarrollar los diagramas de distribución de exergía para cualquier sistema de Turbinas de Gas. Los diagramas, denominados Curvas de Exergía y Diagramas Exergía-Pinch representan una demostración efectiva de la aplicabilidad del ACETP. Los diagramas son una valiosa herramienta para entender y visualizar sistemáticamente la distribución global de Exergía, Entalpía y Temperatura en Sistemas de Turbinas de Gas. Adicionalmente, se mencionó que el ACETP es una valiosa herramienta que constituye la base para identificar modificaciones en los procesos mediante el cálculo de objetivos energéticos en potencia.*

*La difusión y aplicaciones del ACETP en México son muy necesarios puesto que pueden abarcarse áreas de incipiente necesidad en nuestra industria nacional, tales como Generación de Potencia Mecánica, Ciclos Combinados, Sistemas de Cogeneración y Auditorias Energéticas.*

## **REFERENCIAS**

- 1.- **Linnhoff B et al. (1982). "User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy". Institution of Chemical Engineers, Rugby, U.K.**
- 2.- **Butcher, Ch (1993). "Probing the Pinch". The Chemical Engineer, No. 546/547, pp 25-26, July 15.**
- 3.- **Linnhoff B and Carpenter K J (1981). "Energy Conservation by Exergy Analysis -The quick and simple way". Paper presented at the Second World Congress of Chemical Engineering, Canada, October 4-9.**
- 4.- **Kenney W F (1984). "Energy Conservation in the Process Industries". Academic Press, U.S.A.**
- 5.- **Munsch M, Mohr T and Futterer E (1993). "Analysis of exergy and evaluation of process plants with a flowsheeting system". International Chemical Engineering Vol. 39, No. 2, pp 197-206.**
- 6.- **Linnhoff B and Dhole V R (1992). "Shaftwork Targets for Subambient Proc. Design". Chem. Eng. Sci., Vol. 47, No. 8, pp 2081-2091.**
- 7.- **Dhole V R and Zheng J P (1993). "Applying Combined Pinch and Exergy Analysis to Closed Cycle Gas Turbine System Design". Paper presented at ASME COGEN-TURBO Conference, Bornemouth, U.K. September 21-23.**
- 8.- **Rodríguez Toral, M A (1993). "Shaftwork Targeting for Gas Turbine Systems Using Exergy Analysis". MSc Dissertation, UMIST, Manchester, ENGLAND.**