



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

PROPUESTA PARA LA EVALUACION DE UN
INDICADOR PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA
ENERGETICA DE UNA PLANTA DE PROCESO

TESIS MANCOMUNADA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A N :
KARLA CASTAÑEDA GIL
HERIBERTO PEREZ GARCIA

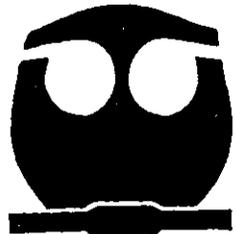


EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F.

2001

295059





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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

Presidente
Vocal
Secretario
1er Suplente
2º Suplente

Prof. José Luis Padilla de Alba
Prof. José Sabino Samano Castillo
Prof. Graciela Guadalupe Díaz Argomedeo
Prof. Baldomero Pérez Gabriel
Prof. Pedro Gómez Viveros

Sitio donde se realizo la tesis
"Fundación Roberto Medellín, S.C."

Asesor:

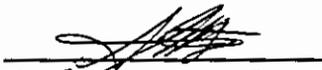


Prof.: José Luis Padilla de Alba

Sustentantes:



Karla Castañeda Gil



Heriberto Pérez García

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM y a la Facultad de Química.

Al profesor José Luis Padilla de Alba y a la Fundación Roberto Medellín, por el apoyo brindado para este trabajo.

Al M. en I. José S. Samano Castillo, muchas gracias por todo su apoyo.

A la Ing. Graciela Díaz por su paciencia y apoyo.

DEDICATORIAS

A mis padres, Claudia y Heriberto, por el apoyo incondicional que me han brindado toda mi vida y que seguramente seguiré recibiendo. Gracias.

A Karla, por hacer el trabajo mucho más divertido. Además de ser mi amiga, eres la persona con quien mejor he trabajado.

A mis amigos Pepe Llavot y Paco Torner, por ser mis amigos durante los últimos años, y vaya que nos hemos aguantado.

A todos mis cuates con los que he compartido momentos agradables en la Facultad de Química: Arturo, Chendo, Ethel, Talía, Burro, Itzé, Lourdes, Piata, Gaby, Elizabeth y todos de los que no me acuerdo ahorita.

DEDICATORIAS

A Dios, por permitirme despertar todos los días de este lado del cielo y acompañarme siempre.

A mi papá, por ser tantas cosas, el ejemplo de superación incansable, mi fuerza en los momentos difíciles, el apoyo incondicional, la sonrisa constante y, pero sobre todo porque todo lo bueno de mi vida es por ti. . Te amo.

A mi mamá, porque aunque hace tiempo que parece que ya no estás aquí, vives en la persona más hermosa que pudiste dejar en tu lugar (José L).

A José Luis, Ricardo y Mónica por ser mi inspiración y enseñarme tantas cosas. Son las personas más importantes de mi vida. Los quiero mucho.

A Heriberto, "...ante la duda, AMIGOS como tú".

A Ricardo S, una persona maravillosa con la que tuve la suerte de compartir un pedacito de esta vida y hoy llevo en el corazón.

A Viviana (piojo), esto no hubiera sido lo mismo sin ti.

A Paola, Yenny, Iliana y Jazmín, por tantos años de amistad incondicional.

A Rosalía, por regalarme a dos angelitos (Ricky y Mónica).

A mis amigos, Abraham A, Jessica M, Mariano R, Arturo, Rodrigo B, Victor, J. Antonio M (Premier), Alejandro de E, porque hicieron de la facultad un lugar inolvidable.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	8
2	DESARROLLO DE LA PROPUESTA PARA EL INDICADOR	14
2.1	Especificaciones de los servicios reportados	14
2.2	Cálculo del indicador energético.	18
2.3	Cálculo del indicador de carga	19
3	CASO EJEMPLO	21
3.1	Condiciones y características de la planta	21
3.2	Información adicional	30
4	RESULTADOS DEL CASO EJEMPLO	31
4.1	Indicador energético mensual	31
4.2	Indicador de carga mensual	33

5	ANALISIS DE RESULTADOS DEL CASO EJEMPLO	34
5.1	Comportamiento energético neto	34
5.2	Indicadores de generación y consumos individuales	35
6	RECOMENDACIONES	49
6.1	Recomendaciones para el caso ejemplo	49
6.2	Lineamientos administrativos	50
7	VENTAJAS ECONOMICAS DEL USO DEL INDICADOR ENERGETICO	52
7.1	Métodos de evaluación económica de un proyecto y su relación con los indicadores	52
7.2	Ventajas económicas del uso del indicador energético para el caso presentado.	54
8	CONCLUSIONES	57
9	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	60
	ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Consumo energético del sector industrial 1991-1998	10
Tabla 2	Factores de conversión de los insumos y generación a unidades energéticas	23
Tabla 3	Propuesta de denominación de vapor (alta, media, baja) para el caso ejemplo	25
Tabla 4	Poder calorífico del combustible para cada período	26
Tabla 5	Distribución mensual de producto y materia prima	27
Tabla 6	Información proporcionada por la planta petroquímica. Insumos	28
Tabla 7	Información proporcionada por la planta petroquímica. Generación	29

LISTA DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura 1	Comparación según las tendencias de producción energética y la demanda final en la industria.	9
Figura 2	Diagrama de entradas y salidas externas de servicios del proceso	41
Figura 3	Distribución de los consumos en la generación de servicios internos	42
Figura 4	Utilidad Neta	53
Gráfica 1	Indicador energético mensual	32
Gráfica 2	Indicador de carga mensual	33
Gráfica 3	Consumo energético neto por unidad de producto	35
Gráfica 4	Consumo y generación totales	36
Gráfica 5	Generación de vapor de baja	37
Gráfica 6	Consumo de vapor de alta	38
Gráfica 7	Consumo de vapor de media	39
Gráfica 8	Generación de condensado 1	40

Gráfica 9	Generación de condensado 2	41
Gráfica 10	Producto terminado / materia prima	43
Gráfica 11	Consumo de energía eléctrica	44
Gráfica 12	Consumo de agua de enfriamiento	45
Gráfica 13	Consumo mensual de agua de enfriamiento en m ³	46
Gráfica 14	Consumo de combustible	47

RESUMEN

La vida económica y social de cualquier país depende de la energía. Mientras su costo era relativamente bajo, fueron pocos los países que se preocupaban por su uso racional, sin embargo, es bien sabido que las reservas de hidrocarburos se terminarán en un tiempo muy próximo. Por esta razón, es necesario desarrollar nuevos mecanismos administrativos en la operación de cualquier planta de proceso, que permitan detectar las áreas donde se puedan hacer mejoras y, así, ahorrar un porcentaje considerable en el balance global de energía.

Una manera sencilla pero eficiente de encontrar las áreas de oportunidad en una planta de proceso, es mediante el cálculo de un indicador energético. Este indicador se basa en la relación que existe entre las condiciones energéticas de diseño y las reales, siempre referidas a unidades de producto terminado.

Hasta ahora, los indicadores más comunes se enfocaban en una sola área o en una sola característica, así, en este trabajo se documenta un indicador que puede ser

aplicado a todas las áreas de una planta de proceso, permitiendo detectar, de manera general, los equipos o los procesos que deben ser estudiados a fondo para lograr un mejor aprovechamiento de la energía. Para ejemplificar lo anterior, se ha estudiado el caso de una planta petroquímica, ubicada en el sureste de nuestro país.

Como resultado se tienen los datos y el análisis de todos los insumos y generaciones de la planta y el del indicador energético global. Así, al finalizar el análisis, se obtienen una serie de lineamientos, unos corresponden al caso ejemplo en específico y otros a casos generales, aplicables a cualquier planta de proceso.

INTRODUCCIÓN

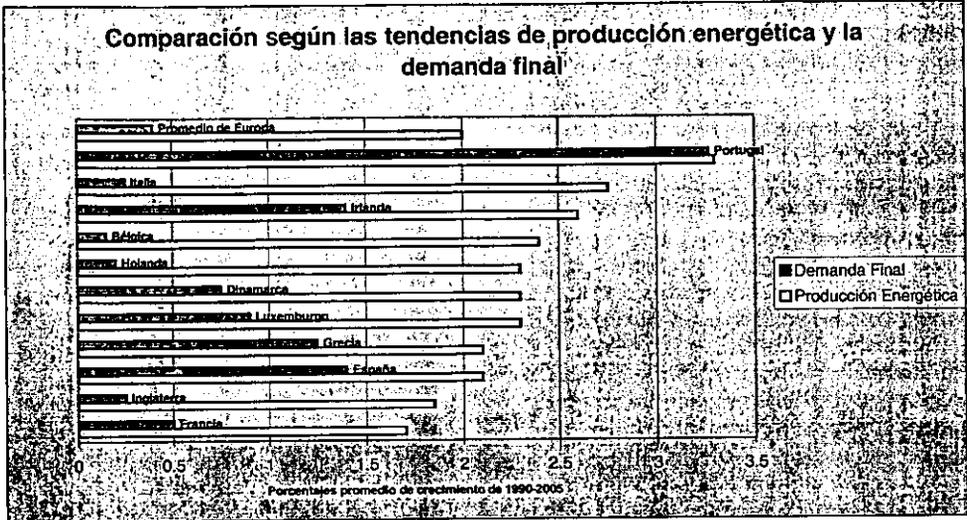
Ante la crisis energética que actualmente se vive en nuestro país y el resto del mundo, el minimizar el consumo de energía se ha convertido en una de las principales preocupaciones de los gobiernos, enfocándose principalmente en los procesos industriales, ya que este sector es el mayor consumidor de servicios energéticos.

Los análisis del uso irracional de energía indican que en varias ramas del sector industrial existe un sobreconsumo de hasta un 50% de energía. Tomando en cuenta que el sector industrial gasta una tercera parte del consumo total nacional, el uso racional de energía prolongará el tiempo de agotamiento de recursos energéticos no renovables en un 15%.

Otros estudios revelan que la relación entre la demanda final y la producción de energía no guarda una variación o tendencia lógica; así, aún en los países más desarrollados del mundo, esta relación denota un porcentaje de desperdicio de la

energía alarmante. La figura 1 muestra la tendencia comparativa entre la demanda y la producción de energía.

Figura 1 Comparación según las tendencias de producción energética y la demanda final en la industria



Wilson, C., Energy Global Prospects..

Es de esperarse que la diferencia demanda-producción energética sea aún más grande para los países tercermundistas como el nuestro. Por esto es necesario la creación de nuevas políticas energéticas a nivel mundial.

El principal objetivo de cualquier política energética debe ser el aumento del tiempo de agotamiento de las reservas de hidrocarburos, ya que estos representan la principal fuente energética, no sólo para el país, sino para el mundo, a corto y mediano plazo. A largo plazo se contempla la implementación de nuevas tecnologías que utilicen energía proveniente de fuentes renovables.

El comportamiento de consumo de energía por sectores consumidores varía de un año a otro. En la tabla 1 se presenta dicho consumo para el sector industrial en el periodo 1991 – 1998.

Tabla 1. Consumo energético del sector industrial 1991-1998

Año	Consumo 10⁶ TEP*	Participación porcentual
1991	27.98	38.4 %
1992	29.26	39 %
1993	26.4	36.6 %
1994	28.42	37.7 %
1995	26.88	36.1 %
1996	27.49	36.5 %
1997	29.24	36.3 %
1998	29.75	34.8 %

Memorias sobre el XVII Seminario Nacional sobre el uso racional de la energía

*TEP. Toneladas equivalentes de petróleo

El análisis de las posibilidades de ahorro de energía y los casos demostrativos indican claramente, que sin inversiones cuantiosas es posible ahorrar hasta un 25% del consumo de energía contando con la infraestructura humana de apoyos en asesoría, consultoría y financiamiento.

Es muy importante conocer la participación que tiene la energía en los costos de operación y/o producción, ya sea industrial, de transporte, oficina, comercio, empresa gubernamental e incluso residencial, con el propósito de establecer planes bien definidos a corto, mediano y largo plazo, para efectuar las reducciones de su uso sin afectar la productividad.

Así, el sector industrial, en el que se incluye a la petroquímica básica, ha tenido una participación en el consumo energético nacional que representa un poco más de la tercera parte. Hasta el año de 1998, la petroquímica básica y la siderurgia comprenden el 31.79% del total ¹.

En una planta de proceso la eficiencia operacional está relacionada de manera directa con el uso eficiente de energía. Teóricamente, dicha eficiencia debería ser de un 100%, en la práctica la diferencia entre la eficiencia operacional teórica y real, representa el porcentaje de pérdida de energía con su consecuente efecto económico negativo.

El precio de los combustibles tiende a elevarse, lo que está fuera de control directo de cualquier industria, pero lo que sí es posible, es controlar los consumos internos y para ello deben establecerse indicadores, mismos en los que se reflejarán las mejoras logradas. La base de cuantificación de los indicadores más utilizados en la industria de la transformación, e incluso, en la de servicios, son las unidades de producto terminado (tonelada, kg, pieza, lote, litro, etc).

Los indicadores más comunes para el control de la energía son¹:

- kWh/ unidad
- m³ de agua / unidad
- Toneladas de vapor / unidad
- m³ de gas / unidad
- Toneladas de combustible / unidad

Este trabajo pretende desarrollar un mecanismo para detectar las áreas de oportunidad de optimización de los recursos energéticos mediante el uso de un indicador.

¹ Apuntes sobre el curso de formación en diagnósticos energéticos de segundo nivel en la Ind. Química

En el indicador energético permite evaluar y detectar de manera general las áreas dentro de la planta que deberán ser estudiadas a detalle para determinar la posibilidad de reducir los consumos energéticos y en su caso, el procedimiento para lograrlo.

Este indicador engloba los indicadores que se han utilizado de manera específica en algunos estudios y tiene como finalidad dar un punto de vista más general de la utilización de energía. El uso de este indicador en la industria es prácticamente nuevo, pues solo se usa incipientemente en algunas plantas de proceso, con resultados satisfactorios. Por esta razón su uso aún no está generalizado y, por lo tanto, no ha sido documentado.

La tarea de la implementación de este procedimiento no es fácil ya que es necesario cambiar las políticas y los protocolos de operación, así como el registro de los equipos y los procesos, por lo que no pueden esperarse grandes resultados de inmediato, sin embargo, si se trata de mejorar día con día, a mediano y a largo plazo y, en algunos casos, a corto plazo, las mejoras serán evidentes.

Para la evaluación del indicador es necesario contar con la siguiente información:

- Insumos energéticos (energía eléctrica, combustible, vapor, agua de enfriamiento, condensados, etc.).
- Generación de energéticos (gas residual, vapor, condensados, etc.).
- Cantidad de producto terminado.
- Cantidad de materia prima.

Toda esta información debe ser referida a las condiciones de operación y estándar. Se entiende como condiciones estándar, aquellas que son definidas en el diseño de los equipos involucrados en el proceso de la planta en cuestión, o en su defecto, como el promedio de los datos de operación considerados como normales, durante cierto período.

En caso de que la información estándar esté referida a las condiciones de diseño, ésta deberá actualizarse de acuerdo a las modificaciones que sufran el proceso o los equipos involucrados en él.

Este trabajo se enfocará principalmente al análisis energético correspondiente a un año de operación sin profundizar en cuestiones económicas.

DESARROLLO DE LA PROPUESTA PARA EL INDICADOR ENERGÉTICO Y DE CARGA

2.1 Especificaciones de los servicios reportados

Para llevar a cabo el cálculo del indicador energético, se requiere información del balance de energía general del proceso, es decir, es necesario contar con los datos de los insumos energéticos existentes, así como los datos correspondientes a la generación, en caso de existir. Además se solicitan datos de carga total suministrada a la planta y de cantidad total de producto terminado.

Para realizar un cálculo correcto del indicador energético es indispensable contar con un punto de referencia, que es establecido por las condiciones estándar del sistema en estudio. Dichas condiciones deberán ser proporcionadas junto con los datos operacionales.

En el caso de los insumos energéticos se requieren solo los valores globales, es decir, no son necesarios los datos específicos de cada sección o equipo del proceso, sin embargo, dicha información global debe ser manejada en unidades energéticas, aunque no siempre es proporcionada así. Si este es el caso se tendrán que solicitar las condiciones termodinámicas de los valores reportados.

Como ejemplo de la información requerida como insumo energético tenemos:

- Combustible.

El consumo de combustible generalmente se reporta en unidades volumétricas (ft^3 o m^3), pero de acuerdo con el procedimiento del cálculo, es necesario expresarlo en unidades energéticas, por lo tanto, se requiere contar con el poder calorífico el cual se reporta en BTU/ft^3 , de esta manera, el consumo de combustible podrá expresarse en BTU.

Ejemplo:

Consumo de combustible = 8 MMft^3

Poder calorífico = 850 BTU/ft^3

Consumo de combustible = 6800 MMBTU

En caso de no contar con el poder calorífico del combustible, ver anexo 1.

- Energía Eléctrica

La energía eléctrica se reporta usualmente en KWh, por lo cual solo se transforma a BTU.

Ejemplo:

Energía Eléctrica = 1520000 KWh

1 KWh = 0.00341 BTU

Energía Eléctrica = 5183.2 BTU

- Vapor

El consumo de vapor en una planta se reporta comúnmente en toneladas, además en ocasiones es clasificado como de baja, media o alta. Esta clasificación está dada en función de sus condiciones termodinámicas (presión y temperatura), sin embargo da cabida a imprecisiones, ya que utiliza intervalos en lugar de condiciones puntuales; además dichos intervalos dependen de los criterios de la empresa que los utiliza, lo que aumenta al riesgo de error en los cálculos. Se propone una clasificación basada en el rango de entalpías marcadas por el caso ejemplo en la tabla 3.

Para obtener la equivalencia de toneladas a unidades energéticas es necesario:

- 1.- Conocer la entalpía del vapor, o
- 2.- Conocer las condiciones de presión y temperatura para determinar la entalpía.

Tabla 3.

- 3.- Conocer la denominación del vapor (alta, baja, media).

Este último caso es el menos recomendable, ya que el grado de imprecisión puede ser muy alto ya que cada planta tiene su propia clasificación de vapor.

- Condensado

En este caso, como en el del vapor, la diferenciación de los condensados se debe a sus diferentes entalpías, y se reporta en toneladas, por lo cual se sigue el mismo procedimiento que con el vapor. Su entalpía se obtiene de las tablas de vapor, empleando la presión del vapor del cual proviene. Ver Anexo 2.

- Agua de enfriamiento

El agua de enfriamiento se expresa comúnmente en flujo volumétrico (m^3 ó ft^3), por lo cual para transformar dichas unidades a BTU es necesario emplear la ecuación 1.

$$BTU = \text{Flujo} \cdot \text{Densidad} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \quad (1)$$

donde:

Flujo = Gasto volumétrico (m^3 , ft^3)

Densidad = Peso específico del agua (kg/m^3 , lb/ft^3)

C_p = Capacidad calorífica del agua ($BTU/lb^\circ F$, $cal/g^\circ C$)

T_s = Temperatura de salida del agua de enfriamiento ($^\circ F$ ó $^\circ C$)

T_e = Temperatura de entrada del agua de enfriamiento ($^\circ F$ ó $^\circ C$)

La fórmula aplica en unidades congruentes. Ver tablas de densidades y capacidades caloríficas del agua a diferentes temperaturas en el Anexo 3.

Por generación energética se entiende a aquellos servicios energéticos derivados del proceso, que son utilizados en operaciones ajenas a la planta o a la sección de estudio y que representan un ingreso económico. Como ejemplo se tienen vapor, condensados, agua de enfriamiento, etc.

El manejo de los datos de la generación de servicios energéticos es similar al de los insumos, ya que el tratamiento dimensional es el mismo.

La información correspondiente a cantidades de carga total y producto terminado se reporta normalmente en toneladas, sin importar la naturaleza de cualquiera de los dos. En caso de que tanto el producto como la carga, sean reportados normalmente en unidades diferentes a las toneladas (litros), éstas podrán utilizarse sin ningún problema. Si las unidades del producto terminado y de la carga son distintas (litros y toneladas), éstas tendrán que homologarse.

2.2 Cálculo del indicador energético

Teniendo toda la información requerida en las unidades correspondientes y en cada período, la secuencia de cálculo es la siguiente:

- 1.- Calcular la suma de insumos energéticos para cada período y el estándar. (X)
- 2.- Calcular la suma de la generación energética para cada período y el estándar. (Y)
- 3.- A las condiciones de diseño o estándar calcular:

$$A_{\text{diseño}} = [(X-Y) / P]_{\text{diseño}} \quad (2)$$

P = Producto (ton)

$A_{\text{diseño}}$ = Consumo neto de energía por tonelada de producto a las condiciones de diseño.

- 4.- Para cada periodo calcular :

$$A = (X-Y) / P \quad (3)$$

P = Producto (ton)

A = Consumo neto de energía por tonelada de producto a las condiciones operativas.

- 5.- Calcular el indicador energético como:

$$I_e = (A_{\text{diseño}} / A) * 100 \quad (4)$$

I_e = Indicador energético.

Para el caso de las condiciones de diseño le es igual a 100 porque $A_{\text{diseño}} = A$. Este 100 representa la máxima eficiencia energética reportada para la planta, es decir, si la eficiencia de operación en las condiciones de diseño o estándar esta fijada en 87%, a este valor se le asigna el 100.

Si el indicador se encuentra por debajo de 100 implica que se está consumiendo más energía de la necesaria, y si el valor está por encima significa que se está ahorrando energía.

2.3 Cálculo del indicador de carga

1.- A las condiciones de diseño calcular:

$$B_{\text{diseño}} = [P/C]_{\text{diseño}} \quad (5)$$

$B_{\text{diseño}}$ = Tonelada de producto por tonelada de materia prima a las condiciones de diseño.

C = Toneladas de materia prima.

2.- A las condiciones operativas y para cada periodo calcular:

$$B = P/C \quad (6)$$

B = Tonelada de producto por tonelada de materia prima a las condiciones operativas.

C = Toneladas de materia prima.

3.- Indicador de Carga:

$$Ic = (B/B_{\text{diseño}}) * 100 \quad (7)$$

Ic = Indicador de Carga

Este indicador es un parámetro auxiliar que nos indica el rendimiento que tiene la materia prima al transformarse.

En condiciones de diseño $I_c = 100$ porque $B = B_{\text{diseño}}$

CASO EJEMPLO

3.1 Condiciones y características de la planta de proceso

Para hacer la evaluación del indicador propuesto se ha tomado el caso de una planta petroquímica que produce compuestos aromáticos como el tolueno, xileno, etc.

Dicha planta petroquímica se encuentra ubicada en un complejo en el Sureste de México, el cual cuenta además, con una planta procesadora de etileno, así como un centro procesador de gas²

Por razones de confidencialidad no es posible nombrar y detallar las características de la planta petroquímica utilizada en este estudio.

² Datos proporcionados por el complejo petroquímico ejemplo

La información de los consumos energéticos es la siguiente:

- Consumo de energía eléctrica,
- Vapor de alta,
- Vapor de media
- Gas combustible
- Condensado
- Agua de enfriamiento

Del mismo modo se tiene la información correspondiente a la generación energética:

- Condensados (1 y 2)
- Vapor de baja.

Los servicios generados son utilizados en las plantas del complejo y, por lo tanto, la planta que se estudia recibe un beneficio económico por la venta de dichos servicios; de esta manera, ningún servicio está fuera del control del complejo petroquímico.

La planta procesadora de aromáticos en cuestión tiene una eficiencia de operación del 85%.

Es necesario hacer énfasis que, para el caso que nos ocupa, los valores estándar se refieren a las condiciones de diseño.

Como ya se mencionó en el desarrollo del procedimiento, con el fin de desarrollar el análisis, es necesario contar con las condiciones termodinámicas de los servicios reportados, o en su defecto, los factores de conversión a unidades energéticas (MMBTU). En este caso, se proporcionaron los últimos como se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Factores de conversión de los insumos y generación a unidades energéticas

Insumos	Unidad	Factor
Vapor de alta	Ton	3.03858
Vapor de media	Ton	2.80124
Condensado	Ton	0.60617
Agua de enfriamiento	m ³	0.00106
Generación	Unidad	Factor
Vapor de baja	Ton	2.60704
Condensado 1	Ton	0.62208
Condensado 2	Ton	0.45779

Datos proporcionados por el complejo petroquímico ejemplo

En el caso del vapor reportado por la planta se deben tomar en cuenta las especificaciones de éste; en un capítulo anterior se mencionaba que era necesario conocer la entalpía del vapor, las condiciones o su denominación. En este caso, la planta reportaba la denominación del vapor, sin embargo, esta denominación parecía poco clara, pues no se conocían las condiciones del vapor que hacían que se denominara de esta manera. Para poder entender como es que estaban definidas las denominaciones del vapor se propone el siguiente planteamiento.

La denominación de vapor de baja, media y alta no depende solo de la presión como plantean algunos autores, sino de la combinación de dos condiciones termodinámicas, presión y temperatura, que resultan en una más, entalpía y, depende de ésta la clasificación. En este caso la entalpía de los tres tipos de vapor era la siguiente:

Vapor de baja 1232.7 BTU/lb

Vapor de media 1270 BTU/lb

Vapor de alta 1371.7 BTU/lb

Estos valores salen de la transformación del factor de conversión (proporcionado por la planta) con las unidades en la que se reportan los insumos y consumos de vapor, de manera que, al hacer un análisis en las tablas de vapor sobrecalentado (que corresponde a estos vapores) podemos definir las condiciones termodinámicas para las diferentes denominaciones que se presentaron.

La tabla 3 presenta los valores para el vapor sobrecalentado con las condiciones propuestas para las diferentes denominaciones de vapor señalándose también las condiciones de las tres corrientes de vapor de la planta en estudio.

En conclusión la denominación de vapor como una función única de la presión, se hace el fin de simplificar los rangos, para el caso presentado se propone de la siguiente manera:

- Vapor de baja: 1-60 psia
- Vapor de media: 60 -250 psia
- Vapor de alta: Más de 250 psia

Algunos autores coinciden de manera general con esta clasificación, ya que presentan rangos hasta de 75 psia para el vapor de baja, y de más de 300 para el vapor de alta.

La señalización para la tabla 3 es la siguiente:

Vapor de baja

Vapor de media

Vapor de alta



Tabla 3 Propuesta de denominación de vapor (alta, media, baja) para caso ejemplo

Presión absoluta (psia)	Temp. de sat. (°F)	Temperatura (°F)									
			200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1.0	101.70	v	392.5	452.3	511.9	571.5					
		H	1150.1	1195.7	1241.8	1288.5					
		s	2.0508	2.1150	2.1720	2.2235					
5.0	162.21	v	78.15	90.24	102.24	114.20					
		H	1148.6	1194.8	1241.2	1288.2					
		s	1.8715	1.9367	1.9941	2.0458					
10.0	193.91	v	38.85	44.99	51.03	57.04					
		H	1146.6	1193.7	1240.5	1287.7					
		s	1.7927	1.8592	1.9171	1.969					
14.696	211.99	v		30.52	34.67	38.77					
		H		1192.6	1239.9	1287.3					
		s		1.8157	1.8741	1.9263					
20.0	227.96	v		22.36	25.43	28.46					
		H		1191.5	1239.2	1286.8					
		s		1.7805	1.8395	1.8919					
60.0	292.73	v		7.26	8.353	9.399					
		H		1181.9		1283					
		s		1.6496	1.7134	1.7678					
100.0	327.86	v			4.934	5.587	6.216				
		H			1227.5	1279.1	1329.3				
		s			1.6517	1.7085	1.7582				
150.0	358.48	v			3.221	3.679	4.111				
		H			1219.5		1325.7				
		s			1.5997	1.6598	1.7112				
200.0	381.86	v			2.361	2.724	3.058				
		H			1210.8	1268.8	1322.1				
		s			1.56	1.6239	1.6767				
250.0	401.04	v				2.15	2.426				
		H				1263.3	1318.3				
		s				1.5948	1.6494				
300.0	417.43	v				1.766	2.004				
		H				1257.5	1314.5				
		s				1.5701	1.6266				
400.0	444.70	v				1.2843	1.476				
		H				1245.2	1306.6				

En el caso del gas combustible, este factor es variable a lo largo del año, en la tabla 4 se detallan los factores de conversión para cada mes.

Tabla 4 Poder calorífico del combustible para cada período (factor de conversión)

	Factor (BTU/ft³)
Estándar	849.07
Enero	810.4
Febrero	810.4
Marzo	810.4
Abril	810.4
Mayo	810.4
Junio	810.4
Julio	810.4
Agosto	704
Septiembre	704
Octubre	704
Noviembre	704
Diciembre	704

Datos proporcionados por el complejo petroquímico ejemplo

De la misma manera se proporcionó información acerca de los volúmenes de materia prima y de producto terminado (Tabla 5)

Tabla 5. Distribución mensual de producto y materia prima

	Materia Prima (Ton)	Producto (Ton)
Estándar	331863.3	286470.3
Enero	283371	230474
Febrero	190906	149675
Marzo	279364	229513
Abril	264884	221136
Mayo	278555	233753
Junio	249004	240716
Julio	255286	211194
Agosto	236587	199249
Septiembre	247067	205804
Octubre	162886	137064
Noviembre	285748	236867
Diciembre	280991	231683

Datos proporcionados por el complejo petroquímico ejemplo

TABLA 6
Información proporcionada por la planta petroquímica
Caso ejemplo
Consumos

INSUMOS		Estándar	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Gas combustible	MMPC	486	429	384.4	427.3	433.6	444.4	424.6
Vapor de alta	Ton	13239.4	16232	13593	14747	16931	18256	17831
Vapor de media	Ton	53280	83487	64816	61173	57827	55817	50603
Condensado	Ton	2546.6	0	0	0	0	0	0
Agua de enfriamiento	m ³	9734400	5920163	5267705	5920163	5729190	5920163	5729190
E. Eléctrica	KWh	1410000	1233290	1128260	1300600	1215330	1227850	1160650

INSUMOS		Estándar	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Gas combustible	MMPC	486	420.2	420.1	387.1	262.8	427.7	439
Vapor de alta	Ton	13239.4	26293	23248	18806	15653	25024	26769
Vapor de media	Ton	53280	53290	51651	46372	36441	48801	48626
Condensado	Ton	2546.6	0	0	0	0	0	0
Agua de enfriamiento	m ³	9734400	5816999	5920163	5460282	3649855	5729190	5920163
E. Eléctrica	KWh	1410000	749570	966830	963780	608500	904170	890890

TABLA 7
Información proporcionada por la planta petroquímica
Caso ejemplo
Generación

GENERACION		Estándar	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Vapor de baja	Ton	12708	14259	12446	4796	2858	2371	1238
Condensado 1	Ton	53280	94951.8	53043.4	58409.1	58409.1	55245.9	52094.2
Condensado 2	Ton	11551.7	20586.4	11500.3	12663.6	12663.6	11977.8	11294.5
GENERACION		Estándar	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Vapor de baja	Ton	12708	0	0	0	13822	16038	20490
Condensado 1	Ton	53280	52912.7	51532.9	45060.1	28417.2	46825.4	45331
Condensado 2	Ton	11551.7	11471.9	11172.8	9769.4	6161.1	10152.2	9828

3.2 Información adicional

Condición Climática

La planta se diseñó tomando en cuenta una temperatura ambiental entre 18 y 27 °C, la cual es una fluctuación normal, en la zona geográfica en la que se ubica el complejo, sin embargo en el primer bimestre del año del estudio, la temperatura osciló entre 7 y 12 °C, lo que alteró la operación de la planta. El resto del año no presentó diferencias climáticas significativas.

Mecanismos de Control

Se encontraron deficiencias en los sistemas de control, lo cual no permitió detectar con precisión los cambios en la cantidad de materia prima procesada, provocando así gastos energéticos innecesarios, sobre todo en el mes de febrero.

Reestructuración del proceso y cambio de equipo

En el mes de julio comenzó a realizarse un cambio de equipo con el fin de reestructurar el proceso y hacerlo más eficiente. Dichos cambios también se llevaron a cabo en los mecanismos de control y finalizaron en el mes de septiembre.

La empresa no proporcionó información específica acerca del proceso, ni de los equipos reemplazados.

RESULTADOS DEL CASO EJEMPLO

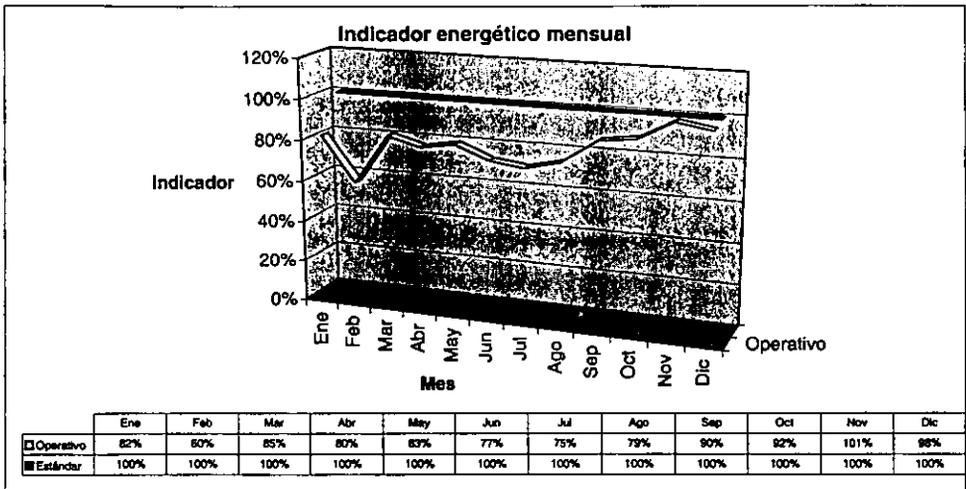
Todos los resultados expuestos a continuación se presentan de manera desglosada en el Anexo 4 (Hoja de cálculo)

4.1 Indicador energético mensual

El valor de 100 en este indicador se encuentra referido a las condiciones ideales o de diseño reportadas para la planta, tomando en cuenta la eficiencia de ésta. Por ejemplo, si la eficiencia máxima que puede alcanzar la planta es 86% todos los parámetros involucrados para el cálculo del indicador se basan en este 86% y se le asigna un valor de 100.

En el caso que nos ocupa podemos observar que sobre todo en los dos primeros meses el indicador se encuentra muy por debajo del valor ideal, como en el mes de febrero en que cae 40 puntos, lo que indica un sobreconsumo de energía en este mes como se detallara posteriormente.

Gráfica 1. Indicador energético mensual



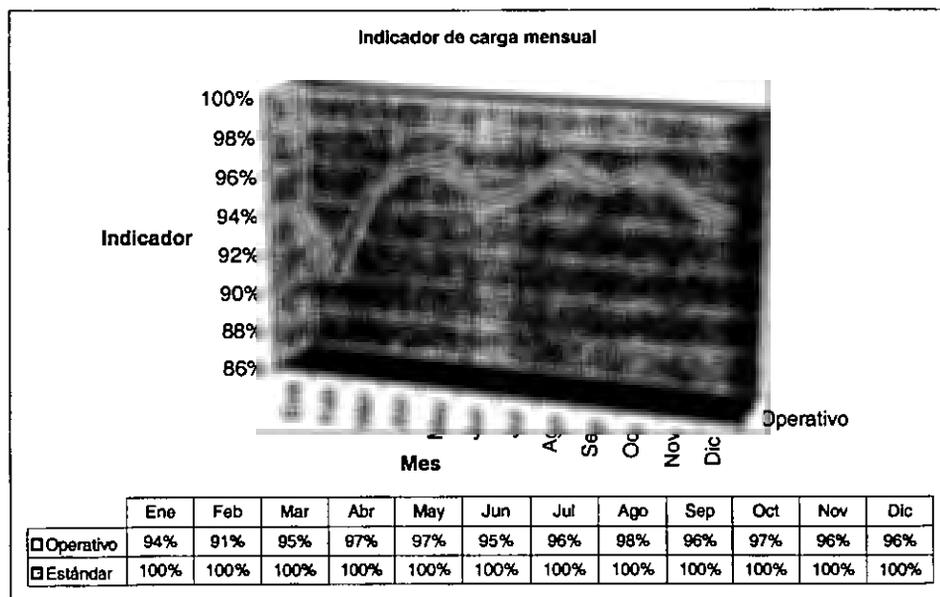
Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

4.2 Indicador de carga mensual

Al igual que lo que ocurre con el indicador energético mensual, al indicador de carga se le asigna un valor de 100, que corresponde a las condiciones normales o de diseño, las cuales fueron proporcionadas por la empresa.

En la gráfica correspondiente a dicho indicador (grafica 2), se observa una caída considerable en el mes de febrero, de aproximadamente 10%. Este porcentaje representa el mayor descenso en el indicador de carga a lo largo del año, y coincide con la mayor caída del indicador energético, esto nos da un indicio de una operación no satisfactoria en este mes. En el siguiente capítulo se profundizará más acerca de esta cuestión.

Gráfica 2. Indicador de carga mensual



Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

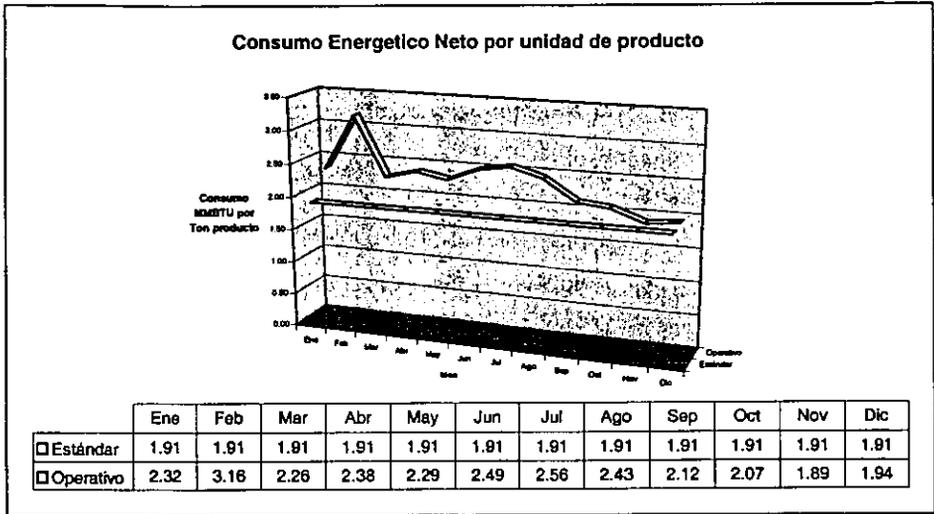
ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL CASO EJEMPLO

5.1 Comportamiento energético neto

De acuerdo a lo observado en las gráficas correspondientes a los indicadores energéticos y de carga (gráfica 1 y gráfica 2 respectivamente), estos mantienen una tendencia muy similar, sobre todo en el segundo mes, durante el cual se observa una caída considerable. Esta caída se hace más evidente en el indicador energético que desciende en un 40% de las condiciones consideradas como normales, mientras que en el indicador de carga la fluctuación no sobrepasa el 10% de diferencia de las condiciones de referencia.

Al observar el consumo neto por unidad de producto (gráfica 3), notamos que se consume mucho más energía de la establecida como necesaria, regularizándose dicha situación hasta los dos últimos meses de operación.

Gráfica 3. Consumo energético neto por unidad de producto



Fuente hoja de cálculo Anexo 4

El consumo neto se obtiene sustrayendo la generación energética total del consumo energético total.

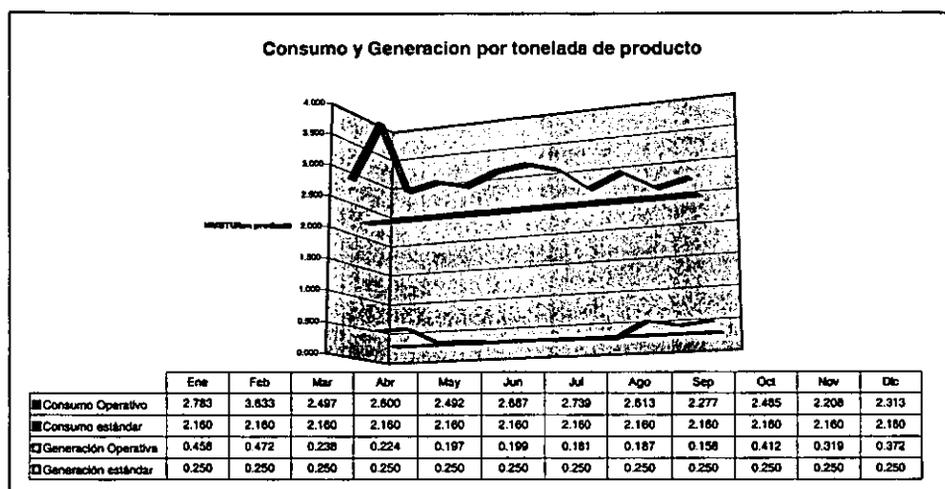
5.2 Indicadores de generación y consumos individuales

Al revisar los consumos individuales (energía eléctrica, combustible, vapor de alta, agua de enfriamiento y vapor de media), podemos observar que la mayoría de ellos coinciden con la tendencia de consumo energético global, esto es, un aumento considerable en el mes de febrero. (Gráfica 3). Esto se explica de acuerdo a varios factores ya descritos en el planteamiento del caso ejemplo:

- 1) Condiciones Climáticas
- 2) Operación ineficiente de los mecanismos de control de los equipos.

Con respecto a la generación total (gráfica 4) la tendencia no se ve afectada en gran medida, por lo cual podemos deducir que no impacta considerablemente en los resultados del indicador energético (como se observa en la gráfica 1). Así mismo, al revisar las gráficas de generación de condensado 1 y condensado 2 (gráficas 8 y 9), éstas siguen una tendencia muy similar a la generación total, lo que no ocurre con la generación de vapor de baja (gráfica 5).

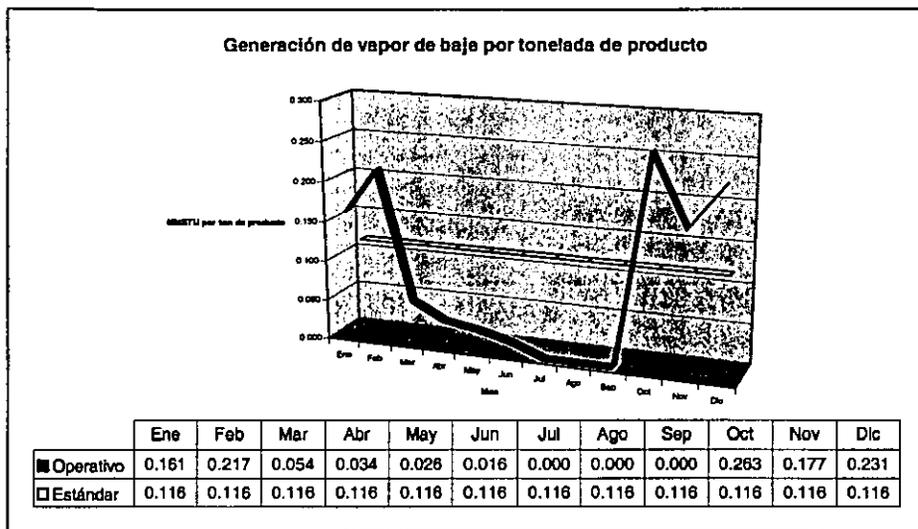
Gráfica 4 Consumo y generación totales.



Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

En el caso del vapor de baja (gráfica 5), la generación se reportó como nula durante los meses de julio, agosto y septiembre, pues durante este período se realizaron los trabajos de cambio de equipo y reestructuración del proceso; así, a partir del mes de septiembre, se cuenta con datos reportados de la generación de vapor de baja.

Gráfica 5. Generación de vapor de baja

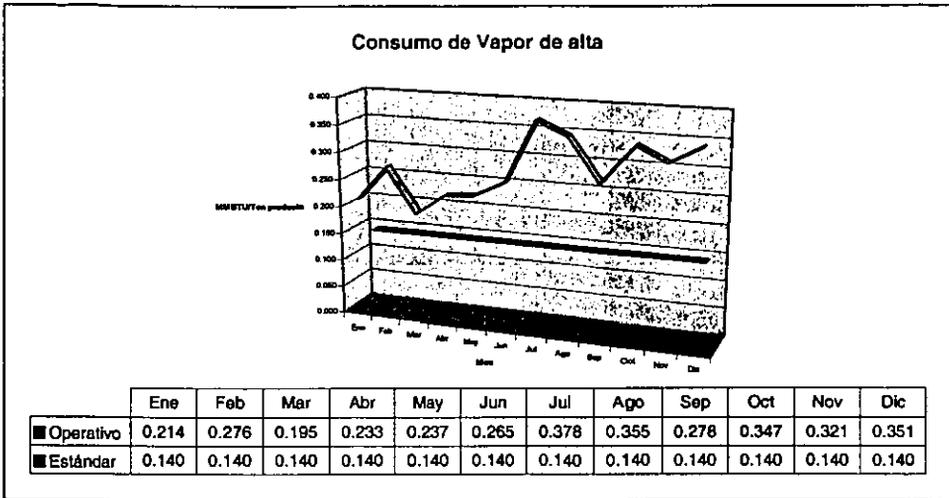


Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

Es evidente que los resultados de la generación de vapor de baja no afectan la tendencia de la generación total, aún cuando su comportamiento es muy inestable.

De acuerdo a los datos e información adicional proporcionada, se deduce que el vapor de alta consumido (gráfica 6), después de su uso, se transforma en vapor de baja, el cual se considera como generación.

Grafica 6. Consumo de vapor de alta



Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

No obstante, dichas tendencias no son similares, ya que a lo largo del año en estudio ocurrió un sobreconsumo de vapor de alta y una generación inestable de vapor de baja.

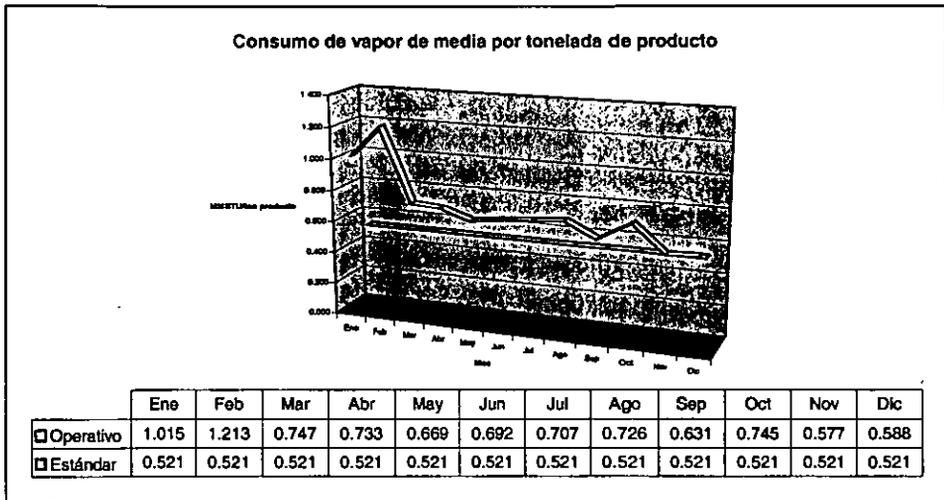
Como ejemplo de esta inestabilidad, además de la interrupción de la operación ya descrita, se tienen los datos correspondientes a la generación de vapor de baja, referente a los meses de octubre, noviembre y diciembre, durante los cuales se generó 0.2629 MMBTU/ ton producto, 0.1765 MMBTU/ ton producto y 0.2205 MMBTU/ ton producto, respectivamente; siendo el valor reportado como normal 0.1156 MMBTU/ ton producto.

Esto indica que el valor estándar ha sido superado hasta en un 120%, lo cuál se debe a que la planta ha reestructurado su proceso y reemplazado el equipo, sin reportar los cambios en las condiciones normales de operación (condiciones estándar).

Para cualquier reemplazo de equipo o reestructuración del proceso es necesario que las condiciones estándar globales se actualicen, situación que no se realizó en el período en que se lleva a cabo este estudio.

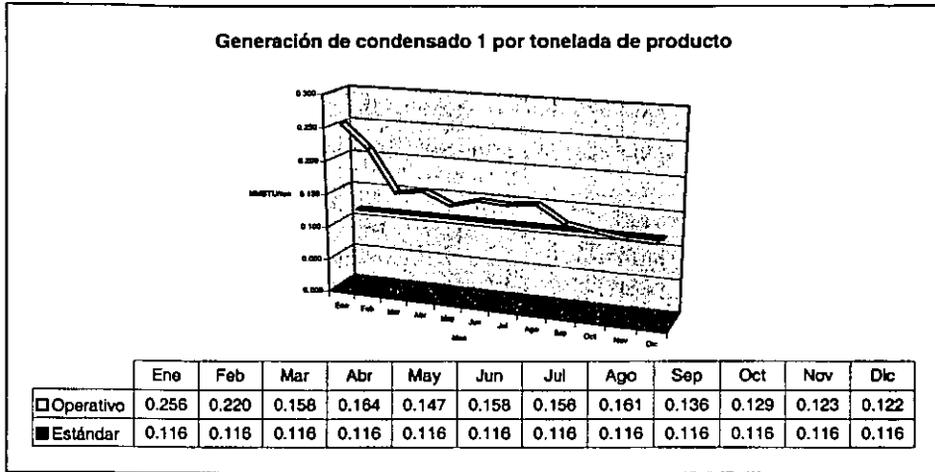
De la misma manera en que el vapor de alta se transforma en vapor de baja, el vapor de media que se consume en el proceso (gráfica 7), se utiliza posteriormente para la generación del condensado 1 (gráfica 8).

Gráfica 7. Consumo de vapor de media



Fuente: Hoja de cálculo. Anexo 4

Gráfica 8. Generación de condensado 1

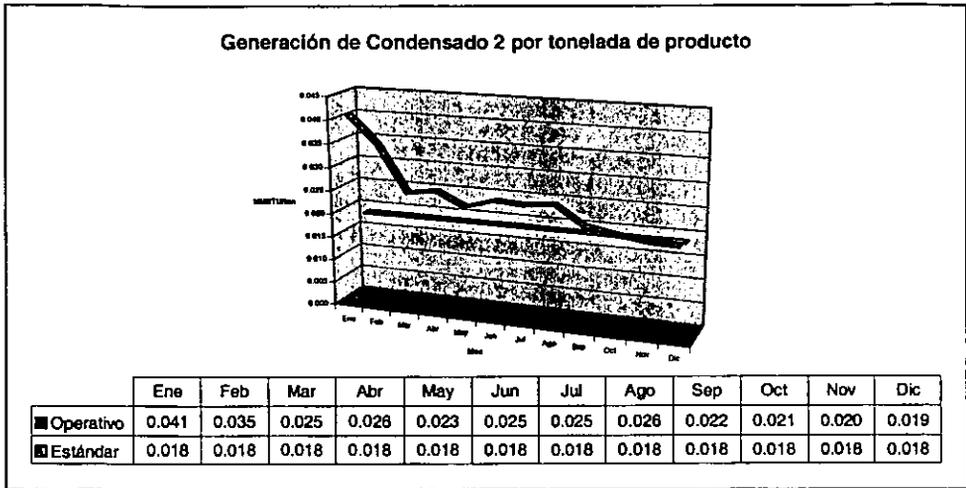


Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

La generación del condensado 2 (gráfica 9), ocurre a partir de vapor de baja utilizado en el proceso, que a su vez proviene de vapor de alta, pero no de aquel reportado como consumo, sino de otra fuente que no figura en la información proporcionada. Esto ocurre porque dicho vapor de alta es generado para su consumo dentro de la planta de proceso, empleando para ello parte del combustible reportado. No se cuenta con información acerca de la fracción de combustible empleado, ya que ésta es una operación interna del proceso, y solo se tienen datos de entradas y salidas del mismo.

La fracción de combustible empleado en el proceso, que a lo largo del mismo resultará en la generación de condensado 2, guarda una relación muy cercana con el vapor de media consumido, ya que los productos generados (condensado 1 y 2) presentan tendencias muy similares.

Gráfica 9. Generación de condensado 2



Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

Hay que recordar que solo se están reportando los consumos y los datos de generación en las entradas y salidas, aunque esto no significa que no se generen otros servicios en el proceso, los cuales son utilizados "in situ". Figuras 2 y 3

Figura 2. Diagrama de entradas y salidas externas de servicios del proceso

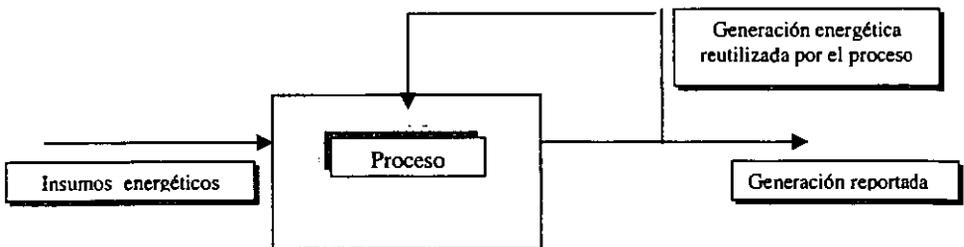


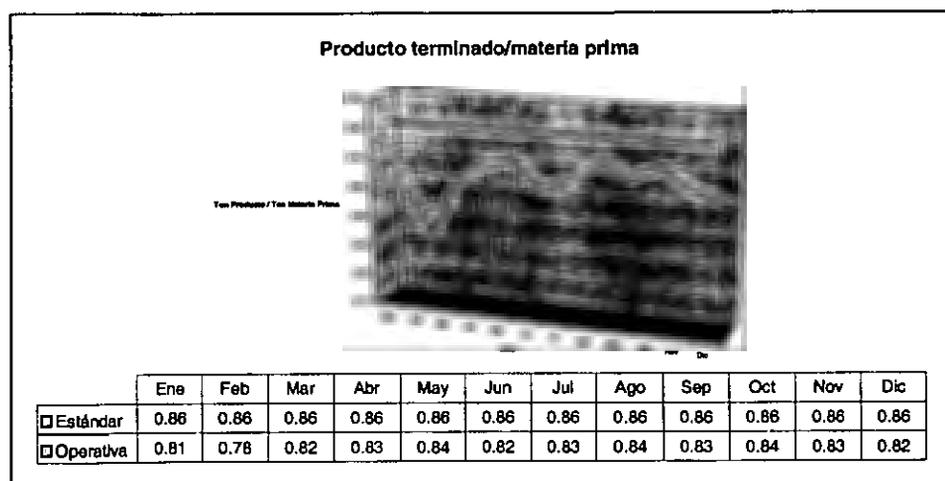
Figura 3. Distribución de los consumos en la generación de servicios internos.

Insumos reportados	Vapor de media	Combustible	Vapor de alta
Servicios generados de uso interno		Vapor de alta Vapor de baja	
Generación reportada	Condensado 1	Condensado 2	Vapor de baja

Las generaciones están relacionadas con los insumos de manera vertical.

En la gráfica de Producto terminado / Cantidad de materia prima (gráfica 10) se puede observar que el aprovechamiento de la materia prima es ineficiente, es decir, se produce menos producto por cantidad de materia prima alimentada que la establecida por el estándar (0.86), coincidiendo de nuevo el mayor descenso en el mes de febrero, en donde esta relación desciende (producto / carga) en un 10%, siendo el valor estimado de 0.8632 mientras que el valor operativo es de 0.7804. Sin embargo, no se puede comparar el desaprovechamiento de materia prima con el de energía, que asciende a un 40% de pérdida, según lo reportado como normal.

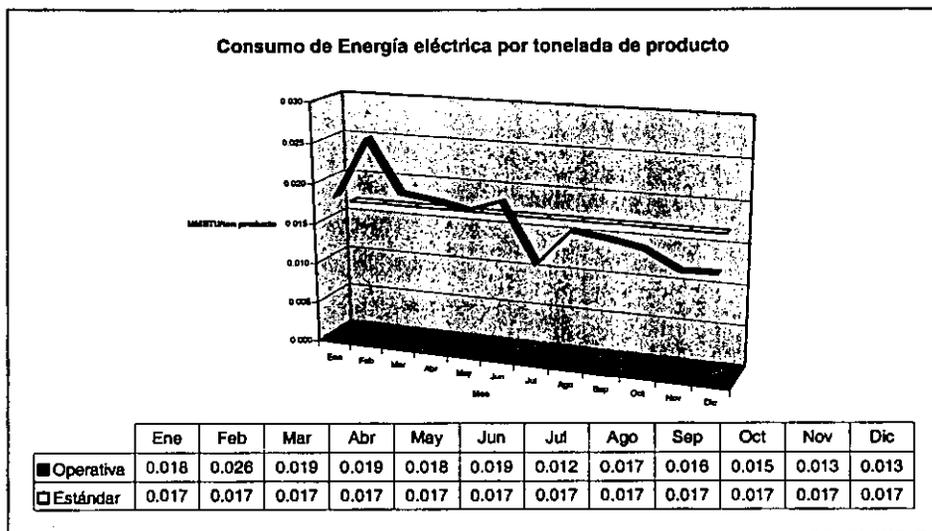
Gráfica 10. Producto terminado / materia prima.



Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

Si observamos el consumo neto de energía eléctrica (Gráfica 11) en KWh, se puede ver que éste no varía en gran medida en los primeros 6 meses, sin embargo, su consumo descendió en el siguiente semestre. Esta disminución coincide con el cambio en las condiciones de operación ya descritos.

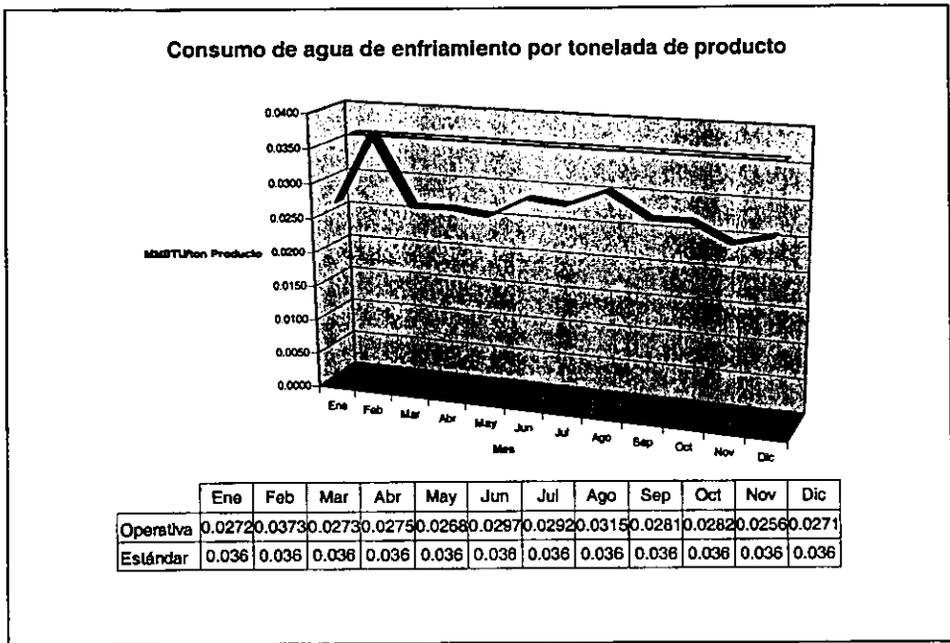
Gráfica 11. Consumo de Energía Eléctrica



Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

Tanto el consumo de agua de enfriamiento (gráfica 12), como el consumo de energía eléctrica, son independientes del resto de los consumos (vapor, combustible, etc.); por lo cual no presentan necesariamente la misma tendencia. En el caso del agua de enfriamiento, su consumo a lo largo del año, es menor que lo indicado como estándar, a excepción del mes de febrero en que el consumo por unidad de producto es ligeramente mayor. Esta condición de operación nos indica que las condiciones normales o estándar no se obtuvieron totalmente acorde con la realidad, ya que la operación es posible utilizando una cantidad menor de agua de enfriamiento.

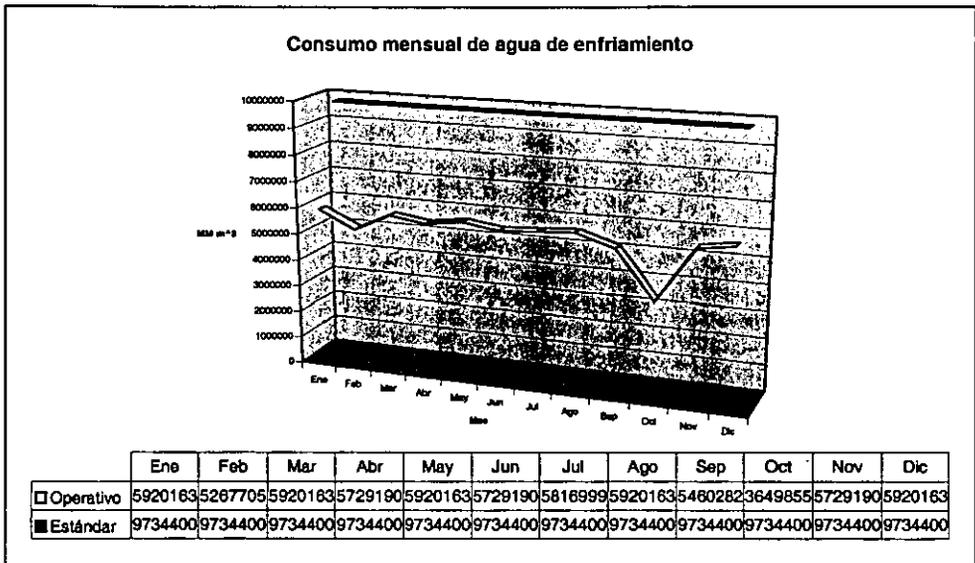
Gráfica 12. Consumo de agua de enfriamiento



Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

Según el estándar se requieren 33.98 m^3 de agua de enfriamiento por cada tonelada de producto, mientras que la operación se llevó a cabo con 26.44 m^3 por cada tonelada de producto, como promedio, lo cual indica que el estándar excede dicha operación en un 22.2%. Por esta razón es recomendable para esta planta realizar una revisión de su diagrama de servicios auxiliares (agua de enfriamiento en este caso) y verificar las condiciones óptimas para el proceso. Ver gráfica 13

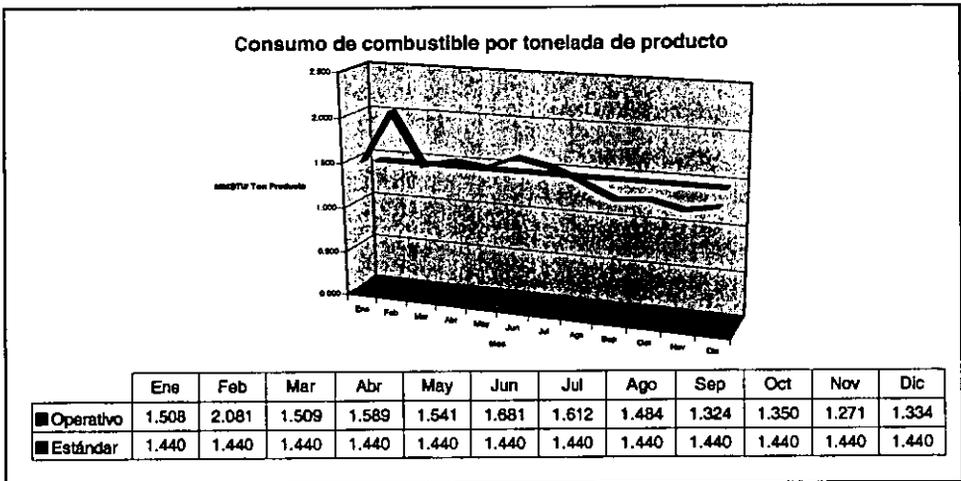
Gráfica 13. Consumo mensual de agua de enfriamiento en m^3



Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

Según las gráficas el consumo de combustible (gráfica 14) se mantiene ligeramente por arriba del consumo normal a principios de año, sin embargo, a partir del mes de agosto, el consumo baja manteniéndose por debajo de lo establecido y, al mismo tiempo el consumo de vapor de alta aumenta considerablemente en el mismo periodo. Esto nos hace pensar que los requerimientos energéticos no están balanceados y que se compensa la energía requerida en una operación con el sobreconsumo en otra.

Gráfica 14. Consumo de combustible



Fuente Hoja de cálculo Anexo 4

Al observar el consumo energético neto (gráfica 3), no se observa una variación considerable en el mes de febrero, sin embargo, la diferencia estriba en que la cantidad de producto terminado es de 149,675 toneladas, siendo la normalidad de 286,470.3 toneladas por mes, es decir, la producción de febrero es apenas el 52% de la producción considerada como normal, por esta razón los consumos por unidad de producto se disparan en el mes de febrero y por ende, el indicador energético desciende considerablemente.

Otro caso similar ocurre en el mes de octubre, en que la producción es apenas de 137,064 ton, lo que implica solo un 48% de la producción estándar, sin embargo la disminución en el consumo de servicios fue mas o menos proporcional, por lo cual no se nota una variación considerable en los consumos por unidad de producto y tampoco en el indicador energético.

A lo largo del año se observa un parámetro energético bajo sobre todo en el mes de febrero, y en cuanto la generación de vapor de baja es nula, el indicador desciende un poco más, sin embargo, al reanudarse su generación, el indicador se ubica en niveles aceptables según las condiciones normales. Esto indica que, aunque los niveles de generación no son aparentemente representativos para el indicador, la generación de un servicio puede hacer que el uso de la energía se acerque a su línea de operación ideal. Ver gráfica 1.

RECOMENDACIONES

6.1 Recomendaciones para el caso ejemplo

- 1) Se debe realizar una revisión y, en caso de ser necesario, una reestructuración de los parámetros estándares con el fin de realizar un análisis más representativo del proceso.

Los casos en que se debe aplicar la recomendación anterior puede ser:

- Intercambio de equipo.
 - Reparación de equipo.
 - Reestructuración del proceso.
- 2) Es necesario verificar la relación operacional producto / materia prima, con el fin de obtener el máximo aprovechamiento de los insumos materiales.

La relación estándar Producto / materia Prima está sujeta a la demanda del mercado, por lo cual es necesario monitorearla para un análisis más certero.

- 3) Se sugiere revisar los datos correspondientes a los estándares del agua de enfriamiento, para evitar situaciones como la ocurrida durante el período de análisis del caso ejemplo en cuál el estándar está excedido. Situaciones como esta no son recomendables, porque al acercarse el consumo al valor estándar incorrecto, se estará desperdiciando el servicio.

6.2 Lineamientos administrativos

La implantación de un programa de Ahorro de Energía es de primordial importancia para lograr con éxito los ahorros energéticos, y mantener el alto nivel de eficiencia energética a largo plazo. Así, se recomienda una serie de pasos a seguir y se presentan a continuación:³.

- 1) El compromiso de la alta gerencia de cada empresa de dar el apoyo al ahorro energético, y de exigir resultados positivos de parte de su personal.
- 2) La asignación de un responsable de energía, o coordinador de energía, quien estará a cargo de todas las actividades relacionadas con la compra, distribución, y utilización de los energéticos. Dicha persona se encargará del seguimiento de los consumos e índices energéticos, y de las medidas de ahorro de energía.
- 3) La definición y la selección de los medidores y contadores adicionales necesarios para identificar con más precisión los consumos en los diferentes departamentos y equipos.

³ García J., Administración y ahorro de energía.

4) El levantamiento y consiguiente análisis y presentación de los datos de los medidores y contadores, para mantener un buen control sobre los consumos, sus variaciones, y las razones de éstas.

5) El cálculo y la actualización regular de los costos energéticos de diferentes tipos, diferentes niveles, y en diferentes plantas, tomando como punto de partida los cálculos y métodos empleados en este diagnóstico.

VENTAJAS ECONÓMICAS DEL USO DEL INDICADOR

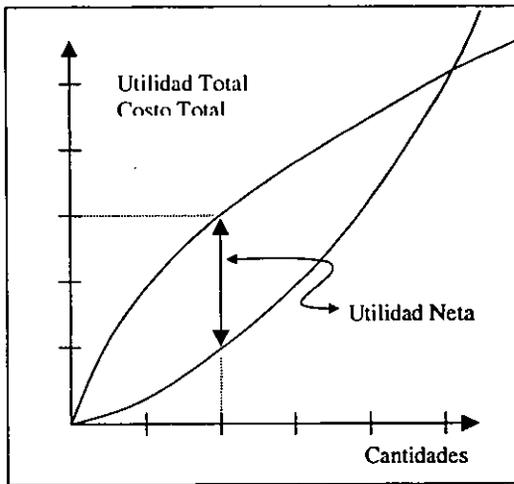
7.1 Métodos de evaluación de un proyecto y su relación con los indicadores.

El objetivo de una empresa es generar utilidades y, comúnmente, la evaluación de que ésta condición se dé, está dada por indicadores económicos y no de proceso, como lo es el indicador energético. Uno de los parámetros más comunes utilizados por las empresas es el PARÁMETRO DE UTILIDAD NETA y en éste se relaciona el dinero generado (incluyendo servicios) con el dinero gastado (incluyendo la producción de servicios)⁴

La Utilidad Neta es el diferencial que existe entre el dinero generado por la venta de productos y/o servicios, y los costos que producidos alrededor de esos productos. Dichos costos incluyen materia prima, manufactura y costos por ventas. La utilidad neta se calcula como la utilidad total menos el costo total. En la figura 4 la utilidad neta se maximiza cuando la distancia entre las dos curvas es mayor.

⁴ De Garmo, Engineering Economy

Figura 4. Utilidad neta



La utilidad neta es igual a la utilidad total menos el costo total

Otros métodos utilizados en la evaluación económica de cualquier proyecto son:

- Método del valor presente Neto .
- Método de valor futuro neto
- Retorno sobre la inversión

Todos los métodos anteriores se basan en la evaluación de los flujos de efectivos de la alternativa analizada, llevados a un tiempo determinado.

El concepto de costos como puente entre las acciones y los indicadores de resultados, como el que se presenta en este trabajo, son a veces un obstáculo en la obtención de mayor calidad en el producto o en el proceso, sin embargo. la carrera por la ventaja competitiva obliga a reducir mermas y mejorar dicha calidad. Por esta razón en la búsqueda de la reducción de dichas mermas se pueden aplicar conceptos como el

indicador energético, pues los servicios energéticos son factores que pueden resultar en altos costos para cualquier planta cuando no se manejan adecuadamente.⁵

Si se requiere lograr "Eficiencia Energética Total", es necesario invertir en equipos, herramientas y/o capacitación para alcanzar esta meta. Aunque debe de tomarse en cuenta que alcanzar "Eficiencia Energética Total" es un caso hipotético, sin embargo, la relación que existe entre lo que se consume en energía y su costo, y lo que se puede o se debe consumir por las características de la planta, se da en base a un indicador como el que se propone.

7.2 Ventajas económicas del uso del indicador energético para el caso presentado

Si la meta de la empresa es ganar dinero ahora y en el futuro, la meta de la dirección será colocar a la empresa en un proceso de mejoramiento continuo. Tradicionalmente, mejoramiento ha sido interpretado como sinónimo de ahorro en costo y, generalmente, esto significa un ahorro o recorte a los gastos de operación sin que esto signifique que el proceso se evalúe y se mejore. Y es en esta parte donde los indicadores de proceso, como el indicador energético, tienen valor al mejorar y evaluar los procesos.

El verdadero valor de un análisis como el que se propone tiene que ver con las repercusiones económicas que se tienen en el mediano y largo plazo para una planta de cualquier tipo, no solo en un complejo petroquímico. Sin embargo, en este caso, los valores netos en el ahorro de energéticos son de magnitudes superiores a los que se tienen en otro tipo de planta de proceso, tanto por los volúmenes manejados, como por la misma exigencia del proceso y, por lo tanto, es mucho más sencillo palpar los beneficios económicos.

⁵. Goldratt, E.. Un proceso de mejora continua

No se tienen datos suficientes para determinar con exactitud el monto en el ahorro económico para el caso que se presenta en este trabajo, sin embargo, si se llevaran a cabo las mejoras necesarias en el proceso de manera que éste trabajara en un rango no superior al 10% sobre el estándar (Indicador energético no menor a 90, que corresponde a 680,677 millones de BTU por mes por consumo total de energía)⁶, el ahorro económico global de la planta sería proporcional a dicho ahorro energético. Sin embargo no debe olvidarse que los estándares deben ser modificados con cualquier cambio en el proceso, lo que alteraría los valores de consumos totales, y por lo tanto el impacto económico será diferente.

Lo cierto es que cualquier cambio propuesto en el diseño, insumos, condiciones de operación y/o equipos de una planta se relaciona directamente con los ahorros económicos estimados que se recibirían si se hicieren esos cambios. Estos estimados deben definirse sobre la base de la historia del proceso de la planta, complejo industrial o área de los mismos que se estudie.

Un aproximado válido para estimar los ahorros proyectados es tomar los resultados de otras plantas similares con el fin de contar con un punto de referencia, pero esto no es muy recomendable ya que al extrapolar la situación de otro sistema productivo al caso de estudio puede desprestigiar características de importancia para el análisis.

Es recomendable para cualquier complejo industrial, mantenerse a la vanguardia en tecnología que permita minimizar la utilización de energéticos, sobre todo de combustibles fósiles que impactan de manera grave al ambiente, y la eventual sustitución de las fuentes actuales de energía por sistemas de producción de energía eléctrica por medio de fuentes alternas, como pueden ser generadores a partir de energía eólica, geotérmica o hidráulica, o celdas solares.

Para que este tipo de cambios puedan realizarse es necesario llevar a cabo un estudio de viabilidad económica, del cual dependerá la implantación de dichas

⁶ Marshall, S., Practical techniques for saving energy in the chemical, petroleum and metal industries.

tecnologías. El indicador energético puede ser de gran ayuda como parámetro de referencia para realizar el estudio económico, ya que al calcularlo con los valores de consumo del equipo a implantar y con los estándares anteriores, se obtendrá el porcentaje de ahorro que se obtendría al realizar el cambio (si el indicador resultante es 125, el porcentaje de ahorro de energía con respecto al sistema actual sería del 25%, y por ende el ahorro económico por consumo de energéticos sería el mismo).

Es necesario considerar que la implantación no sólo depende de los ahorros en los costos de operación, sino en el costo de los equipos necesarios y del tiempo de recuperación de la inversión. Esta es la razón principal por la que no se han realizado cambios significativos en el desarrollo de los procesos, ya que si bien representan grandes ventajas ambientales, no ha sido posible su implementación por los costos tan elevados que representan.

CONCLUSIONES

El caso analizado en este trabajo se realizó con el fin de ejemplificar el cálculo del indicador y sus beneficios en un sistema industrial típico de nuestro país, como lo es una planta petroquímica; como resultado fue posible identificar las áreas en las que se debe enfocar un análisis más profundo, de manera que en donde exista una deficiencia en la generación o consumo energético, ésta sea estudiada a detalle hasta encontrar las variables particulares que afectan el desempeño del área deficiente.

Dentro del estudio realizado al área que presenta problemas, deben de tomarse en cuenta los equipos involucrados y sus especificaciones, así como los balances de materia y energía correspondientes. De esta manera se localizarán los puntos que provocan la problemática que se refleja en el análisis global.

Los índices energéticos son usados para determinar la eficiencia energética de las operaciones, y subsecuentemente, el potencial de ahorro de energía. Estos índices

pueden servir también para comparar la eficiencia de diferentes plantas, pero son más valiosos en el seguimiento de la eficiencia de una misma planta a través del tiempo y bajo una variedad de condiciones.

Al inicio deben calcularse los índices con base en datos promedios mensuales y anuales de la planta recopilados durante el diagnóstico; sin embargo, el valor de los índices energéticos está en su cálculo diario, por turno, o por batch de producción, y por producto y subproducto. Cuando estos índices se desvían, o se encuentran arriba de los valores estándares para el tipo de proceso, puede haber oportunidades de mejora en la eficiencia energética.

Hay que tener en cuenta que cuando se presentan desviaciones no favorables en el indicador energético, pueden estar relacionadas, tanto con la operación de la planta, como con variables externas como son, variaciones climatológicas o calidad de la materia prima. Por esta razón es recomendable realizar un registro paralelo al indicador energético de las variables externas (por ejemplo, la temperatura ambiente a lo largo del período).

El comportamiento operativo de una planta de proceso no puede establecerse con sólo un año de análisis, sobre todo si durante este año ocurrieron problemas de operación y/o reestructuración del proceso.

El concepto de que el ahorro de energía y el uso eficiente de la misma tiene una estrecha relación con la productividad, calidad total y medio ambiente, ha sido analizado y comprobado en la industria en múltiples casos. Por lo tanto, la administración de energía implica la creación de una cultura empresarial, basada en el entendimiento de tres componentes principales:

- 1.- El aprovechamiento máximo de la capacidad instalada de una empresa en un tiempo definido, disminuye considerablemente el costo de energía por unidad de producto.

2.- Las mermas generadas durante el proceso de producción aunadas a los productos rechazados por el incumplimiento de normas de calidad, aumentan el costo unitario de energía por producto vendido.

3.- El consumo de energía por producto y vendido además de la adecuada generación, disminuye la cantidad de contaminantes emitidos y como consecuencia significa la mejora del medio ambiente.

El aprovechamiento máximo de la capacidad instalada exige de la planta industrial tener sus instalaciones y equipos en las condiciones óptimas de operación, dicho con otras palabras, tener implantados los sistemas y procedimientos de mantenimiento preventivo, así como eliminar todos los tiempos perdidos por los paros imprevistos.

Por último, es necesario recordar que el verdadero valor del indicador energético consiste en proveer de armas e información suficiente para la toma de decisión de posibles inversiones, es decir, el primer paso en la evaluación para una posible reestructuración de proceso es el estimado de los consumos en términos de unidades de proceso, para después, traducir este análisis a términos económicos, que es donde se tomaría la decisión de la reestructuración.

TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMEE. (2000), **Memorias del Tercer Congreso Nacional de la Asociación mexicana para la economía energética "El futuro energético de México"**. México.
2. Bousted, I. et al. (1979), **Handbook of industrial energy analysis**. John Wiley and Sons. USA, p. 422
3. Buatas, E. et al. (1982), **Ahorro de energía en la industria: Uso racional de los combustibles**. Catalana de gas y electricidad. España.
4. CONAE. (1992), **Memorias sobre el XVII Seminario Nacional sobre el uso racional de la energía y exposición de equipos y servicios**. México.
5. CONAE. (1995), **Bases para el ahorro de energía en la industria**. Secretaría de energía. México.
6. Considine, D. (1977), **Energy technology handbook**. McGraw-Hill. USA.
7. DeGarmo, P. (1990), **Engineering Economy**. Macmillan Publishing Company. USA.

8. García J.(1993), **Administración y ahorro de Energía**. Universidad Autónoma Metropolitana. México, p. 329
9. Geankopolis, C. (1993), **Transport processes and unit operations**, Prentice Hall. USA, p.p 858,859,862
10. Goldratt, E.(1996), **La Meta. Un Proceso de Mejora Continua**. Ediciones Castillo. México.
11. Gordon, P. (1980),**The energy managers´ handbook**. Westbury House. USA.
12. Hunt,D. (1982), **Handbook of energy: Trends and perspectives**. Van Nostrand Reinhold. USA.
13. IMP. (1986), **Seminario internacional sobre ahorro de energía**. IMP. México.
14. Instituto Nacional de Ecología. (1993), **Informe de la situación General en materia de Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente**. México, p.p 139-141.
15. Marshall, S. (1997), **Practical techniques for saving energy in the chemical, petroleum and metal industries**. Noyes Data Corporation. USA, p. 525.
16. Perry, R. (1992), **Manual del Ingeniero Químico**. McGraw Hill. México. p.p 3.280-3.283.
17. Reavy,D. (1997), **Uso eficiente de la energía en la industria (Guía para el ahorro de Energía en la industria)**. Pergamon Press. México, p.p 69-72.
18. Secretaria de energía. (1995), **Seminario de Ahorro de energía**. Canacintra. México.
19. Streicher,A. (1992), **Implicaciones económicas y tecnológicas de los programas de ahorro de energía a nivel nacional y a nivel empresa**. CONACYT. México.
20. Turner,W. (1982), **Energy management handbook**. Ed. Wiley.USA.
21. Valiente, A. (1988), **Problemas de transferencia de calor**. Limusa. México, p. 586.
22. Valiente, A. (1991), **Problemas de balances de materia y energía**. Alambra mexicana. México, p. 624.

23. Wilson, C. (1987). **Energy global prospects 1985-2000**. Mc Graw Hill. USA, p. 299
24. Apuntes sobre el curso de Formación en diagnósticos energéticos de segundo nivel en la Industria Química. México, 1994
25. [http:// www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx)
26. [http:// www.energyss.com](http://www.energyss.com)
- 27.. <http://www.energymanagement.com>
28. [http:// www.eren.doe.gov](http://www.eren.doe.gov)
29. [http:// www.pemex.com](http://www.pemex.com)
30. [http:// www.ukace.org](http://www.ukace.org)

ANEXOS

Anexo 1. Poder calorífico de algunos combustibles

Combustóleo, BTU/gal	
No.1	137,400
No.2	139,600
No.4	145,100
No.5	148,800
No.6	152,400
Propano, BTU/gal	91,500
Gas natural, BTU/ft ³	1,035
Vapor, BTU/lb	1,012
Electricidad, BTU/KWh	
Calentamiento por resistencia	3,413
Bombas de calor	Hasta 13,000

Fuente: Perry, R. Manual del Ingeniero Químico.

Nota: Para convertir unidades térmicas británicas (BTU) por galón a kilogramo por metro Cúbico, multiplíquese por 287.7.

Anexo 2. Tablas de vapor saturado

Temperatura, K	Presión, bar	Volumen, m ³ /kg		Entalpía, kJ/kg		Entropía, kJ/(kg K)		Color específico, C _p , kJ/(kg K)		Viscosidad, N/m ²		Conductividad térmica, W/(m K)		Mód. de Prandtl		Temperatura superficial, (N/m)
		Condensado		Vapor		Condensado		Vapor		Condensado		Vapor		Condensado		
		Condensado	Vapor	Condensado	Vapor	Condensado	Vapor	Condensado	Vapor	Condensado	Vapor	Condensado	Vapor	Condensado	Vapor	
6.70 - 11	1.073 - 3	9.55 + 9	-539.6	2373	-2.187	18.94	1.155									
7.72 - 10	1.071 - 3	9.42 + 8	-545.7	2391	-2.108	15.40	1.233									
7.79 - 9	1.076 - 3	1.08 + 8	-511.7	2310	-2.028	14.37	1.311									
5.36 - 8	1.077 - 3	1.55 + 7	-497.8	2329	-1.947	12.78	1.389									
3.23 - 7	1.078 - 3	1.72 + 6	-493.6	2347	-1.864	12.02	1.467									
1.64 - 6	1.079 - 3	3.08 + 5	-487.5	2364	-1.780	12.38	1.545									
7.01 - 5	1.081 - 3	1.28 + 5	-451.2	2284	-1.711	11.79	1.623									
2.65 - 5	1.083 - 3	3.82 + 4	-435.0	2403	-1.632	11.20	1.701									
0.91 - 5	1.084 - 3	1.18 + 4	-416.3	2421	-1.553	10.79	1.779									
3.72 - 4	1.085 - 3	4.07 + 3	-400.1	2440	-1.478	10.35	1.857									
7.39 - 4	1.087 - 3	1.53 + 3	-381.5	2458	-1.400	9.854	1.935									
1.23 - 3	1.087 - 3	256.4	-360.8	2468	-1.381	9.788	1.974									
1.96 - 3	1.088 - 3	612.2	-360.5	2477	-1.323	9.960	2.013									
3.06 - 3	1.088 - 3	403.4	-351.2	2486	-1.281	9.481	2.052									
4.69 - 3	1.089 - 3	323.4	-339.6	2496	-1.239	8.854	2.091									
6.11 - 3	1.091 - 3	206.3	-333.5	2502	-1.221	8.158	2.118									
0.00211	1.030 - 3	365.3	0.0	2502	0.000	0.156	4.217	1.054	1750 - 6	1.02 - 6	0.569	0.0183	12.09	0.015	0.0735	
0.00267	1.030 - 3	311.7	7.6	2505	0.028	0.108	4.211	1.053	1633 - 6	1.00 - 6	0.374	0.0183	12.23	0.017	0.0753	
0.00360	1.000 - 3	130.4	28.8	2514	0.104	0.080	4.198	1.052	1422 - 6	0.99 - 6	0.582	0.0188	10.36	0.023	0.0748	
0.01387	1.000 - 3	98.4	49.8	2523	0.178	0.057	4.189	1.061	1325 - 6	0.98 - 6	0.390	0.0189	8.81	0.023	0.0743	
0.01917	1.000 - 3	60.7	70.7	2533	0.251	0.040	4.184	1.064	1080 - 6	0.96 - 6	0.398	0.0193	7.58	0.041	0.0737	
0.02617	1.002 - 3	51.94	91.6	2541	0.325	0.027	4.181	1.069	959 - 6	0.96 - 6	0.606	0.0195	6.63	0.049	0.0777	
0.03331	1.003 - 3	30.13	112.5	2550	0.393	0.020	4.179	1.072	853 - 6	0.95 - 6	0.613	0.0198	5.83	0.057	0.0717	
0.04712	1.005 - 3	27.90	133.4	2558	0.462	0.017	4.178	1.077	769 - 6	0.95 - 6	0.820	0.0201	5.20	0.065	0.0708	
0.06221	1.007 - 3	25.93	154.3	2564	0.530	0.014	4.176	1.082	695 - 6	0.94 - 6	0.628	0.0204	4.62	0.073	0.0700	
0.08132	1.009 - 3	17.82	175.2	2577	0.597	0.014	4.179	1.088	631 - 6	0.92 - 6	0.834	0.0207	4.16	0.083	0.0692	
0.1053	1.011 - 3	15.95	196.1	2586	0.669	0.011	4.180	1.095	577 - 6	0.92 - 6	0.640	0.0210	3.77	0.094	0.0683	
0.1251	1.013 - 3	11.08	217.0	2590	0.737	0.008	4.180	1.003	535 - 6	10.00 - 6	0.643	0.0213	3.42	0.101	0.0673	
0.1719	1.016 - 3	8.82	237.9	2604	0.791	7.922	4.184	1.011	480 - 6	10.20 - 6	0.650	0.0217	3.13	0.108	0.0686	
0.2167	1.018 - 3	7.08	258.8	2613	0.854	7.881	4.186	1.008	453 - 6	10.40 - 6	0.653	0.0220	2.88	0.116	0.0658	
0.2713	1.021 - 3	5.74	279.8	2622	0.916	7.894	4.188	1.003	430 - 6	10.60 - 6	0.660	0.0223	2.66	0.125	0.0649	
0.3372	1.024 - 3	4.683	300.7	2630	0.977	7.729	4.191	1.041	380 - 6	10.80 - 6	0.665	0.0226	2.45	0.133	0.0641	
0.4163	1.027 - 3	3.848	321.7	2639	1.038	7.637	4.185	1.054	345 - 6	11.00 - 6	0.668	0.0230	2.29	0.142	0.0632	
0.5100	1.030 - 3	3.188	343.7	2647	1.097	7.588	4.189	1.064	343 - 6	11.20 - 6	0.671	0.0233	2.14	0.151	0.0614	
0.6239	1.034 - 3	2.645	365.7	2655	1.154	7.581	4.205	1.083	324 - 6	11.40 - 6	0.674	0.0237	2.02	0.160	0.0602	
0.7514	1.038 - 3	2.212	384.7	2663	1.214	7.456	4.209	1.090	306 - 6	11.60 - 6	0.676	0.0241	1.91	0.169	0.0600	
0.9040	1.041 - 3	1.861	405.8	2671	1.271	7.394	4.214	1.097	290 - 6	11.80 - 6	0.679	0.0245	1.80	0.178	0.0595	
1.0123	1.044 - 3	1.679	419.1	2676	1.327	7.358	4.217	1.099	279 - 6	12.00 - 6	0.680	0.0248	1.78	0.184	0.0589	
1.0615	1.045 - 3	1.574	428.8	2679	1.358	7.353	4.220	1.098	274 - 6	12.20 - 6	0.681	0.0249	1.70	0.187	0.0586	
1.2862	1.048 - 3	1.327	449.0	2687	1.394	7.275	4.226	1.097	260 - 6	12.40 - 6	0.682	0.0254	1.61	0.195	0.0576	
1.5253	1.053 - 3	1.142	469.2	2694	1.439	7.218	4.232	1.090	248 - 6	12.60 - 6	0.683	0.0258	1.53	0.204	0.0586	
1.791	1.058 - 3	0.980	489.4	2702	1.484	7.163	4.239	1.104	237 - 6	12.80 - 6	0.686	0.0263	1.47	0.213	0.0556	
2.035	1.061 - 3	0.851	512.9	2710	1.525	7.058	4.258	1.119	217 - 6	13.05 - 6	0.688	0.0272	1.34	0.223	0.0536	
2.302	1.077 - 3	0.553	573.6	2739	1.708	6.959	4.276	1.221	200 - 6	13.42 - 6	0.698	0.0282	1.24	0.254	0.0515	
4.770	1.088 - 3	0.453	618.6	2742	1.810	6.865	4.302	1.291	185 - 6	13.70 - 6	0.688	0.0283	1.16	0.279	0.0494	
5.890	1.090 - 3	0.331	661.8	2753	1.911	6.775	4.331	1.368	173 - 6	14.12 - 6	0.683	0.0294	1.09	0.310	0.0473	
7.333	1.110 - 3	0.261	705.3	2764	2.011	6.680	4.36	1.46	162 - 6	14.50 - 6	0.682	0.0317	1.04	0.318	0.0451	
8.319	1.123 - 3	0.208	749.2	2773	2.108	6.607	4.40	1.56	152 - 6	14.85 - 6	0.678	0.0331	0.99	0.314	0.0429	
11.71	1.137 - 3	0.187	793.5	2782	2.205	6.539	4.44	1.66	143 - 6	15.18 - 6	0.673	0.0348	0.95	0.317	0.0407	
14.83	1.152 - 3	0.156	838.2	2790	2.301	6.451	4.48	1.78	136 - 6	15.54 - 6	0.667	0.0363	0.92	0.320	0.0385	
17.80	1.167 - 3	0.111	882.4	2795	2.395	6.377	4.53	1.94	128 - 6	15.92 - 6	0.660	0.0381	0.89	0.323	0.0362	
21.63	1.184 - 3	0.082	929.1	2799	2.479	6.312	4.59	2.10	124 - 6	16.25 - 6	0.651	0.0401	0.87	0.325	0.0339	
25.40	1.203 - 3	0.0796	978.6	2801	2.561	6.251	4.66	2.27	116 - 6	16.60 - 6	0.642	0.0423	0.86	0.329	0.0316	
31.86	1.222 - 3	0.0631	1023	2802	2.672	6.183	4.74	2.47	113 - 6	16.96 - 6	0.631	0.0447	0.85	0.331	0.0293	
37.70	1.244 - 3	0.0523	1071	2801	2.785	6.093	4.84	2.70	108 - 6	17.33 - 6	0.621	0.0475	0.84	0.335	0.0269	
44.38	1.268 - 3	0.0445	1119	2798	2.856	6.023	4.95	2.95	104 - 6	17.72 - 6	0.609	0.0506	0.83	0.339	0.0245	
52.36	1.294 - 3	0.0375	1170	2793	2.948	5.953	5.09	3.27	101 - 6	18.1 - 6	0.594	0.0540	0.82	0.343	0.0221	
61.19	1.323 - 3	0.0317	1220	2784	3.039	5.882	5.24	3.64	97 - 6	18.4 - 6	0.580	0.0583	0.87	0.347	0.0197	
71.08	1.355 - 3	0.0269	1273	2772	3.132	5.809	5.43	4.08	94 - 6	18.7 - 6	0.563	0.0637	0.80	0.352	0.0173	
82.16	1.389 - 3	0.0228	1328	2757	3.225	5.733	5.68	4.67	91 - 6	19.1 - 6	0.548	0.0699	0.94	0.358	0.0150	
94.51	1.433 - 3	0.0185	1384	2757	3.321	5.654	6.00	5.40	88 - 6	20.4 - 6	0.528	0.0787	0.90	0.368	0.0128	
108.3	1.485 - 3	0.0163	1443	2717	3.419	5.580	6.41	7.35	84 - 6	21.5 - 6	0.513	0.0841	1.05	0.384	0.0105	
123.3	1.612 - 3	0.0115	1573	2641	3.627	5.316	7.05	11.1	81 - 6	22.7 - 6	0.497	0.0929	1.14	0.415	0.0084	
159.1	1.705 - 3	0.0094	1647	2588	3.741	5.250	8.35	15.4	72 - 6	25.0 - 6	0.444	0.114	1.52	0.446	0.0065	
186.1	1.779 - 3	0.0085	1697	2555	3.805	5.191	10.6	18.3	70 - 6	27.0 - 6	0.430	0.121	1.65	0.420	0.0045	
174.7	1.856 - 3	0.0075	1734	2515	3.875	5.113	12.6	22.1	67 - 6	29.0 - 6	0.413	0.130	2.0	0.4	0.0038	
190.9	1.935 - 3	0.0068	1783	2466	3.950	5.025	16.4	27.6	64 - 6							

Anexo 3. Propiedades termo físicas del agua

T (° F)	ρ (lb/ft ³)	Cp (BTU/lb °F)	$\mu \times 10^3$ (lb/ft s)
32	62.4	1.01	1.20
60	62.3	1.00	0.760
80	62.2	0.999	0.578
100	62.1	0.999	0.458
150	61.3	1.00	0.290
200	60.1	1.01	0.206
250	58.9	1.02	0.160
300	57.3	1.03	0.130
400	53.6	1.08	0.0930
500	49.0	1.19	0.07
600	42.4	1.51	0.0579

Anexo 4. Hoja de cálculo

			Datos estándar	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Insumos	Unidad	Factor	PCI(BTU/FT3)	810	810	810	810	810	810	810	704	704	704	704	704	
Gas combustible	MMPC	849.07000	486	429	384	427	434	444	425	420	420	387	263	428	439	
Vap alta	Ton	3.03858	13239.4	16232	13593	14747	16931	18256	17831	26293	23248	18806	15653	25024	26769	
Vap media	Ton	2.80124	53280	83487	64816	61173	57827	55817	50603	53290	51651	46372	36441	48801	48626	
Condensado	Ton	0.80617	2546.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Agua de enf	M3	0.00106	9734400	5920163	5267705	5920163	5729190	5920163	5729190	5816999	5920163	5460282	3649855	5729190	5920163	
E. Eléctrica	KW-H	0.00341	1410000	1233290	1128260	1300600	1215330	1227850	1160650	749570	966830	963780	608500	904170	890890	
			MMBTU(X)	618797.3	641332	543817	573165	575040	582433	550059	578424	520650	468635	340598	522998	535922
Generación de servicios	Unidad	Factor														
Vap baja	Ton	2.60704	12708	14259	12446	4796	2858	2371	1238	0	0	0	13822	16038	20490	
Condensado 1	Ton	0.62208	53280	94952	53043	58409	58409	55246	52094	52913	51533	45060	28417	46825	45331	
Condensado 2	Ton	0.45779	11551.7	20586	11500	12664	12664	11978	11295	11472	11173	9769	6161	10152	9828	
			MMBTU(Y)	71562.9	105666	70709	54636	49583	46032	40805	38168	37172	32503	56533	75588	86117
Carga(A)	Ton		331863.3	283371	190906	279364	264884	278555	249004	255286	236587	247067	162886	285748	280991	
Producto(Z)	Ton		286470.3	230474	149675	229513	221136	233753	204716	211194	199249	205804	137064	236867	231683	
INDICADOR ENERGÉTICO																
FeP			1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	
(X-Y)/Z			1.91	2.32	3.16	2.26	2.38	2.29	2.49	2.56	2.43	2.12	2.07	1.89	1.94	
			100.00	82.19	60.43	84.55	80.39	83.25	76.79	74.68	78.73	90.14	92.17	101.13	98.39	
INDICADOR DE CARGA																
FeC			0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	
Z/A			0.86	0.81	0.78	0.82	0.83	0.84	0.82	0.83	0.84	0.83	0.84	0.83	0.82	
Ic=(Z/A)/FeC*10			100.00	94.22	90.83	95.17	96.71	97.21	95.24	95.84	97.56	96.50	97.48	96.03	95.52	