



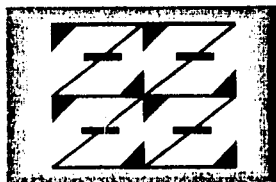
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
\*ZARAGOZA\***

**ANÁLISIS DE AHORRO DE  
ENERGÍA MEDIANTE EL USO DE  
RECUPERADORES DE CALOR.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**I N G E N I E R O Q U Í M I C O**  
**P R E S E N T A:**  
**HERRERA TOLEDO RODOLFO ALBERTO**

**ASESOR: I.Q. CUAUHTÉMOC LAGOS CHÁVÉZ**



**MÉXICO D.F.**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**OCTUBRE DEL 2002.**



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.

# PAGINACION DISCONTINUA



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/073/02**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: HERRERA TOLEDO RODOLFO ALBERTO**

**P r e s e n t e.**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>Presidente:</b>	<b>I.Q. Miguel José Flores Galaz</b>
<b>Vocal:</b>	<b>I.Q. Cuauhtémoc Lagos Chávez</b>
<b>Secretario:</b>	<b>I.Q. Rafael Sánchez Dirzo</b>
<b>Suplente:</b>	<b>Mtro. Genaro Altamirano García</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.Q. Roberto Ramírez Torres</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A t e n t a m e n t e**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**

México, D. F., 24 de Septiembre de 2002

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**M. en C. ANDRES AQUINO CANCHOLA**  
SECRETARÍA TÉCNICA

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## **Agradecimientos**

---

**A mi padre y a mi madre, por todo su amor y apoyo en todos los aspectos, gracias a ustedes he podido lograr esta meta.**

**A mis tres hermanos, por ser como son, por todo su cariño y consejos de los cuales sigo aprendido.**

**A nuestra Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de estudiar en ella.**

**A mi director de tesis, quien ha venido guiando desde hace un año mi formación académica, y como persona por considerarlo un amigo**

**A todos mis maestros, que nos brindan parte de su conocimiento y experiencia para afrontar futuros retos.**

**A mis sinodales por tomarse el tiempo de leer el trabajo, por su crítica y comentarios para mejorar la tesis.**

**A mis amigos, que son y fueron una parte importante en cada etapa de mis estudios y en especial al club del canal cultural.**

**Gracias a todas y cada una de las personas que participaron y que invirtieron su tiempo, conocimientos para ayudarme a completar mi proyecto de tesis.**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ÍNDICE.**

**INTRODUCCIÓN**

iii

**CAPÍTULO I. ANTECEDENTES DEL AHORRO DE ENERGÍA.**

<b>1. Antecedentes generales.</b>	<b>2</b>
<i>1.1 Tres tipos de conservación.</i>	<i>6</i>
<i>1.2 Los obstáculos para la conservación de energía.</i>	<i>7</i>
1.2.1 La industria de la manufactura.	9
1.2.2 Las barreras para la conservación de energía.	11
<i>1.3 Fuentes y usos de calor de los gases de combustión a la salida.</i>	<i>14</i>
1.3.1 Fuentes de calor de desperdicio.	15
1.3.2 Como usar el calor de los gases de combustión a la salida.	17
1.3.3 Determinación de los requerimientos de calor de los gases de combustión a la salida.	18
<i>1.4 Economía de la recuperación de calor de los gases de combustión a la salida.</i>	<i>20</i>
1.4.1 Costos y beneficios.	20
<i>1.5 Herramientas de la ingeniería para la conservación de energía.</i>	<i>24</i>
1.5.1 Auditorías de energía.	24
1.5.2 Balances de calor.	24
1.5.3 Nuevos diseños e instrumentación para el control de procesos.	25
1.5.4 Aislamiento.	25

**CAPÍTULO II. ANTECEDENTES DE AHORRO DE ENERGÍA EN MÉXICO**

<b>2. Importancia de la eficiencia energética y de los programas de ahorro.</b>	<b>29</b>
<i>2.1 Funciones de CONAE.</i>	<i>31</i>
2.1.1 Objetivos estratégicos.	32
<i>2.2 Ahorros por programas de la CONAE 1995-2000.</i>	<i>33</i>
<i>2.3 Metas CONAE 2001-2006.</i>	<i>34</i>
2.3.1 Administración Pública Federal.	35
2.3.2 Estados y Municipios.	36
2.3.3 Empresas Paraestatales.	36
2.3.4 Grandes Corporativos	37
2.3.5 Pequeñas y Medianas Empresas	37
2.3.6 Sector Social.	38
2.3.7 Normalización.	38
2.3.8 Cogeneración.	39
2.3.9 Energías Renovables.	40
2.3.10 Transporte.	40
<i>2.4 Dirección del Sector Energético.</i>	<i>41</i>
2.4.1 Logros alcanzados en PEMEX en ahorro de energía.	42

# Análisis de ahorro de energía mediante el uso de recuperadores de calor.

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE RECUPERADORES DE CALOR.

<b>3. Tipos de recuperadores.</b>	<b>47</b>
<b>3.1 Clasificación de acuerdo a la forma de transferencia de calor.</b>	<b>47</b>
3.1.1 Recuperadores de calor por radiación.	47
3.1.2 Recuperadores de calor por convección.	52
3.1.3 Recuperadores mixtos de radiación-convección (tipo combinado).	54
<b>3.2 Clasificación de acuerdo al tipo de flujo.</b>	<b>56</b>
3.2.1 Recuperador de flujo paralelo.	57
3.2.2 Recuperadores de flujo cruzado.	58
3.2.3 Recuperadores de flujo a contracorriente.	58
3.2.4 Combinación de flujos.	60
<b>3.3 Clasificación de acuerdo al número de pasos.</b>	<b>63</b>
3.3.1 Recuperadores de varios pasos.	63
<b>3.4 Nuevas tecnologías en recuperadores de calor.</b>	<b>64</b>
3.4.1 Recuperadores tipo fifi.	64
3.4.1 Recuperadores de empresas.	67

## CAPÍTULO IV. BALANCE ENERGÉTICO.

<b>4. Balances de calor.</b>	<b>77</b>
<b>4.1 Fundamento de la combustión.</b>	<b>77</b>
4.1.1 Exceso de aire.	78
4.1.2 Pre calentamiento de aire de combustión.	79
<b>4.2 Cálculo de la temperatura de flama.</b>	<b>82</b>
<b>4.3 Diseño de un recuperador de calor.</b>	<b>85</b>
4.3.1 Consideraciones de diseño.	86
4.3.2 Descripción del procedimiento de cálculo.	87
<b>4.4 Memoria de cálculo: Determinación de la temperatura de flama.</b>	<b>92</b>

## CAPÍTULO V. APLICACIÓN PRÁCTICA A UN HORNO CALCINADOR

<b>5. Antecedentes del sistema del caso de estudio.</b>	<b>96</b>
<b>5.1 Descripción el sistema de la firma industrial.</b>	<b>96</b>
5.1.1 Cotización del recuperador de calor.	100
<b>5.2 Análisis de la inversión en el recuperador de calor.</b>	<b>102</b>
<b>5.3 Memoria de cálculo: Diseño de recuperador de calor.</b>	<b>107</b>
<b>5.4 Memoria de cálculo: Evaluación económica del recuperador de calor.</b>	<b>117</b>

<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>121</b>
----------------------	------------

<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>123</b>
----------------------	------------

## ANEXOS.

Anexo I. Ahorros estimados por la aplicación de las NOM-ENER.	v
Anexo II. Tablas de temperaturas de flama adiabática.	viii

## INTRODUCCIÓN.

Los medios sociales y tecnológicos cambian constantemente. En las décadas recientes, los avances de la ciencia, la ingeniería y la creciente demanda de una mejor forma de vida ha revolucionado considerablemente el área energética.

Empleamos el conocimiento que nos brinda la ingeniería para nuestro beneficio en todas las cosas que usamos, por medio de los productos o servicios que son llevados a cabo casi en su totalidad por máquinas que nos permiten alcanzar un objetivo deseado. Sin embargo en la actualidad, se tiene un enorme problema en la cuestión de disponibilidad de tales recursos energéticos para llevar a cabo dichas tareas. El primer cuestionamiento es el cómo llegamos a preocuparnos por cuidar los recursos energéticos, ya que en ocasiones en el origen del problema podemos encontrar una posible solución, en este tema por desgracia no sucede así ya que estos recursos no son renovables, tenemos que partir con lo que contamos actualmente, por lo que se ha puesto mayor atención a las fuentes alternativas de energía.

Una de las formas más inmediatas que tenemos de preservar estos recursos es el ahorro o uso eficiente de la energía, el propósito de este trabajo es analizar e ilustrar la forma en que esta propuesta puede colaborar con la llamada **energía de conservación**. En nuestro país la situación del uso eficiente de la energía es hasta cierto punto alentador. Los programas e instituciones que tienen que ver con el sector energético están sumamente conscientes que este tema es muy serio y afecta a nivel nacional, así mismo están tomando con responsabilidad el problema, trazándose metas para los próximos años, por lo que no podemos demeritar el esfuerzo que se está realizando.

El ahorro de energía puede realizarse con varios mecanismos. Para lograr este propósito se han construido equipos tales como bombas de calor, regeneradores, recuperadores, etc. que son solo algunos de las múltiples opciones disponibles. En el presente trabajo solamente nos ocuparemos de un equipo en particular el cual es el recuperador de calor. Para este equipo también existen diferentes tipos dependiendo de las características con que fue diseñado; las variables que se toman en cuenta principalmente son: el modo de transferencia de calor (convección y radiación), la forma en que se moverán los fluidos dentro del equipo (flujo paralelo, cruzado o contracorriente) y el número de pasos (veces que recorre el fluido exterior o interior el equipo).

Independientemente del tipo de recuperador debemos plantear el balance de energía para la unidad de intercambio de calor. Un balance térmico es el análisis del proceso que muestra de dónde viene el calor y a dónde va, es una herramienta vital para establecer las consecuencias monetarias de las pérdidas de calor y de los proyectos de utilización de calor de desperdicio. La energía que entra a los equipos de proceso en los cuales empleamos los recuperadores es como energía química, por lo que la revisión de conceptos tales como, el exceso de aire y precalentamiento de aire de combustión nos ayudaron a comprender la forma en que estas variables afectan el funcionamiento de los recuperadores, y una de las variables más importantes involucradas es la temperatura de flama. Las flamas de alta temperatura del aire proporcionan a un flux mucho más alto de calor que el aire normal, ayuda a salvar energía por medio del ahorro de combustible y reducen la contaminación, por un mejor quemado dentro del equipo de proceso, además de otros beneficios.



## Análisis de ahorro de energía mediante el uso de recuperadores de calor.

Se calcularon temperaturas de flama con varias temperaturas de precalentamiento para observar el impacto que tiene esta variable directamente con la eficiencia del equipo. de esta manera podemos determinar cualitativamente si es posible esperar un ahorro de combustible con la instalación del recuperador, que nos proporciona el medio para utilizar el calor en el precalentamiento de aire de combustión que de otra manera se desperdiciaría.

El siguiente paso fue el plantear las bases del diseño en forma general y algunos criterios que deben tomarse en cuenta para diseñar el recuperador, pero al realizar la elección de un tipo en específico dentro de todas opciones que se tienen se tuvo que elegir cual era la más adecuada para el caso de estudio, el cual es la instalación de un recuperador de calor en una Firma industrial denominada Yeso Panamericano S. A., para un horno calcinador. Una vez visto el sistema que ya estaba funcionando por lo que ya contaba con ciertas características específicas, se analizaron algunas consideraciones que limitan a la hora de realizar el diseño, la propuesta se realizó y desarrolló con un recuperador de tubos y coraza, ya que este tipo de recuperadores es de montaje rápido y fácil y no muy costoso.

Una vez determinado el tipo de recuperador procedimos a realizar el diseño el cual se hizo en el aspecto térmico obteniendo las cargas térmicas que va a manejar el recuperador, así como las temperaturas de operación y por el lado hidráulico calculando que las caídas de presión para ambos lados del equipo para tubos y coraza, verificando que estén dentro de los límites permitidos, y por supuesto las dimensiones requeridas para cumplir con el servicio adecuadamente.

Ya obtenido las dimensiones del recuperador, es decir la unidad que vamos a emplear para llevar a cabo el ahorro de energía por medio del ahorro de combustible, tuvimos que verificar la factibilidad y rentabilidad del proyecto, por medio del costo-beneficio. Partiendo de conocer el monto de la inversión en la que se incluyen los cambios necesarios que se requieren con la adición de un recuperador al horno calcinador, encontramos la inversión, además de los costos fijos y variables que son principalmente por mantenimiento; se calculó el ahorro de combustible que representa el único ingreso para la recuperación de la inversión.

La factibilidad del proyecto no representa ningún problema, pero la rentabilidad del proyecto siempre tiene cierta oposición de parte de los dueños de las empresas, en este caso de estudio, la recuperación de capital se da en un tiempo recomendado, por lo que el comprar un recuperador, de acuerdo a su rentabilidad, está justificado. Los proyectos de este tipo representan una buena opción para ayudar al ahorro de energía, por medio de la energía de conservación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO I.  
ANTECEDENTES DEL AHORRO DE ENERGÍA.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPÍTULO I. ANTECEDENTES DEL AHORRO DE ENERGÍA.

### I. Antecedentes generales.

Los hidrocarburos, combustibles fósiles, son una fuente de energía primaria con grandes ventajas en cuanto a su extracción, manejo y uso, por lo que se convirtieron en el energético más importante del siglo pasado. Desde el punto de vista de los energéticos empleados, se puede hacer un recorrido por la historia de la civilización, empezando por los cazadores recolectores de los principios de la humanidad, que usaban su propia energía, hasta llegar a nuestra sociedad basada en el petróleo.

Todavía al final del siglo XIX los energéticos más importantes eran la madera y el carbón. A finales del siglo XX, con el uso del petróleo, la cantidad de energía útil per capita fue veinte veces mayor. Claro que hablamos en promedio y sabemos que el uso de la energía es una de las principales diferencias entre los países ricos y los pobres. Además, a pesar de este enorme desarrollo, ya ha principios de los años setenta se plantearon serias dudas sobre la disponibilidad de los combustibles fósiles a nivel mundial, en el transcurso de los años.

Por lo que para dar un antecedente de los avances o medidas que se toman para el ahorro de energía debemos partir de cual fue el principal motivo por el cual surgió la mentalidad o la necesidad para ahorrar la energía, sabemos que los combustibles fósiles provienen de la energía química almacenada por espacio de millones de años. Que en un principio la humanidad tuvo siempre la necesidad de utilizar la energía ya sea para calentarse o para la cocción de sus alimentos y con el transcurso de la historia se hizo necesaria cada vez más y más energía no solo para lo indispensable sino para una forma de vida más cómoda por lo que la combustión de los hidrocarburos para proveerse de esa energía se hizo indispensable.

El petróleo del medio oriente era el combustible favorito del mundo (fácil de producirse en cantidades muy grandes —a diez o veinte centavos de dólar por barril—) fácil de transportar y de fácil combustión ciertamente más fácil que el carbón.

En los Estados Unidos cuando en 1970 la producción interna llegó a su nivel máximo la demanda de petróleo continuo creciendo y esta podía satisfacerse solo con más y más petróleo del Medio Oriente, lo que significaba una dependencia cada vez mayor (y una creciente vulnerabilidad). La idea de que existía algo amenazante en el aumento de la dependencia era algo que resultaba mejor ignorar y, aunque se reconociera el problema potencial, no era claro lo que se tenía que hacer al respecto, cuando el impulso general para usar más petróleo se consideraba irrefrenable.

El primer impacto que causó el petróleo a fines de 1973 y principios de 1974, marcó definitivamente el final del petróleo seguro y barato. Los productores árabes de petróleo embargaron a los EU, redujeron la producción total y los embarques a otros países. Por primera vez, los miembros de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo) dejaron de negociar un precio con las compañías petroleras; ellos en cambio establecieron el precio unilateralmente sobre bases definitivas.

Los compradores de petróleo no tenían alternativas y aceptaron, pagando un precio más alto, ocho veces más alto a fines de 1974 que cinco años antes. Y así los países exportadores de petróleo definieron una nueva época para el resto del mundo, una época de abastecimientos inciertos de petróleo costoso.

La crisis de 1973-1974, constituyó un punto vital en la historia de la posguerra, al asestar un golpe poderoso, económico y político, al mundo entero.

Desde ese momento el petróleo fue visto de otra manera, por lo que en EU empezaron a observar cuales eran sus fuentes de energía con que contaban, las fuentes convencionales que existen son: el petróleo, el gas natural, el carbón y la energía nuclear. Sin embargo varios autores coincidían en que las cuatro proporcionarían menos energía de lo que las proyecciones de sus partidarios nos podrían hacer creer. En pocas palabras, no hay muchas razones para esperar que las alternativas convencionales contribuyan considerablemente a reducir la dependencia del petróleo. En realidad es posible que estas fuentes de energía: el petróleo, el gas natural, el carbón y la energía nuclear como un grupo no pueda incrementar su contribución para satisfacer las necesidades adicionales de energía en las décadas venideras.

¿Qué tan restringidas se encuentran las fuentes convencionales de energía?

Enteramente restringidas. De hecho, existen pocas posibilidades de un crecimiento sustancial en la producción de petróleo y gas. La producción petrolera en muchos países del mundo declinará, y la producción de gas natural solo servirá como un medio para solucionar por algún tiempo el problema antes de caer en la misma dependencia que con el petróleo.

En el caso de la búsqueda de pozos petroleros, ya no queda casi lugares en donde no se haya hecho una exploración para encontrar nuevos yacimientos, más petróleo y gas nuevo se encontraran a precios más altos que a precios más bajos y estos descubrimientos extras compensaran en cierta medida la declinación de la producción procedente de los pozos existentes. Por estas razones, la medida de que los consumidores paguen precios más altos será un fiel reflejo de la dificultad que conllevará la extracción del petróleo o del gas natural.

Existen otras dos fuentes convencionales que se presentan como una propuesta para solucionar el problema del petróleo, el carbón y la energía nuclear. Por supuesto el carbón y la energía nuclear ofrecen beneficios obvios a los usuarios de la electricidad, así como la creación de empleos, y beneficios de la actividad económica asociada con estas industrias. Pero el carbón y la energía nuclear también están enredadas en controversia aunque de una clase diferente que la del gas y petróleo.

Los conflictos sobre el carbón y la energía nuclear, han tendido a poner de manifiesto y a no esconder el hecho de que solo se puede esperar una modesta contribución de energía extra con razonable certidumbre procedente de esas fuentes.

Además el conflicto sobre el carbón y la energía nuclear es acerca de la distribución de efectos laterales, esto es, las externalidades o costos, indirectamente cubiertos por los miembros de la sociedad en general, más bien que ser pagados directamente en efectivo por los consumidores de energía.

Los costos externos, en forma de salud y del medio ambiente, se acumulan a cada paso del viaje del carbón de la mina, en el ferrocarril, a la caldera que se quema. Cuando el economista o el ingeniero dice que el costo de la electricidad generada con carbón es de tres centavos (de dólar) por kilowatt hora desprecia un número importante de externalidades. En el período de extracción y transportación, los costos incluyen los escurrimientos ácidos de las minas y la desorganización de la vida de las comunidades cercanas a las minas. Los costos son aún mayores cuando se quema el carbón, ya que se desprende bióxido de azufre y una múltiples contaminantes. Estos costos incluyen cielos con smog, lluvia ácida, enfisema y las consecuencias de elevar la temperatura de la atmósfera al producir bióxido de carbono.

A causa que los problemas de la salud del medio ambiente se ha convertido cada vez en asuntos del proceso político y debido a que los costos de construcción de centrales carboeléctricas son altos y debido a que la corrosión es indeseable para las calderas, la perspectiva para el carbón no es tan brillante como podría proyectarse.

La energía nuclear tiene un conjunto de costos externos aún de más controversia que el carbón. Los desacuerdos profundos acerca de la seguridad de los reactores han sido una de las causas principales para los retrasos, junto con los cada vez más estrictos requerimientos de seguridad, han causado una escalada drástica en los costos.

Además lo que hace la energía nuclear, única entre las fuentes de energía, son los costos externos penetrantes que impone a las futuras generaciones, generaciones que heredarán escondrijos de combustible usado que emita radiaciones por muchos siglos. Algunos de los problemas técnicos del manejo de este material peligroso podrían ser simplificados si este fuera "reprocesado" para recobrar uranio o plutonio siendo ambos potencialmente útiles. Pero el reprocesamiento conduce a nuevos problemas.

Por otra parte, la **conservación de energía** y la energía solar, alternativas no convencionales que tendían a dejarse de lado, podrán hacer una contribución mucho mayor de lo que generalmente se supone. Se deberá prestar mucha atención a las alternativas no convencionales tanto como a las convencionales, lo que a la fecha no ha sucedido por completo. Ya que las fuentes convencionales de energía siguen recibiendo incentivos y subsidios para seguir con su utilización, mientras que las fuentes no convencionales no han recibido prácticamente nada en comparación, debido a que los productores de las fuentes convencionales mantienen los precios muy por debajo de los costos de sustitución por fuentes no convencionales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Entre las fuentes no convencionales de energía la conservación se presenta como la oportunidad más inmediata; se le debe considerar como una fuente de energía que prácticamente ha sido desaprovechada. De hecho la conservación (ni el carbón ni la energía nuclear) es la principal alternativa. Se calculaba en los EU que podía "suministrar" (por así decirlo) hasta 30% de energía. Más aún, las evidencias sugieren que hay una flexibilidad mucho mayor entre el uso de la energía y el crecimiento económico de lo que generalmente se supone y que, en realidad, una estrategia de conservación podría estimular el crecimiento.

La conservación no requiere de descubrimientos tecnológicos, pero ha sido difícil su implantación, debido a que un grupo congruente de indicadores (precio, incentivos y reglamentación) no está definido. Además el carácter descentralizado del consumo de energía significa que las decisiones para la conservación a diferencia de aquellas para la producción de energía, se tiene que poner en práctica por cientos de personas en el sector industrial y por millones de personas en la conservación de la energía que se utiliza en su hogar.

Podemos decir que existe una fuente de energía que no produce desechos radiactivos, y casi nada de contaminación. Además la fuente puede proporcionar la energía que las fuentes convencionales tal vez no podrían facilitar.

*La fuente podría ser llamada la eficiencia energética. Pero la fuente energética por lo regular se conoce por el término más prosaico de conservación.*

No debemos confundir la eficiencia energética con otro concepto fundamental en términos energéticos que es el de eficiencia de conversión, que se define como la relación entre la salida de una forma de energía y la entrada de otra. Por ejemplo, las mejores celdas solares tienen una eficiencia de entre 20 y 30 % y transforman energía radiante (solar) en eléctrica, mientras una locomotora de vapor tiene una eficiencia de 3-6 % y transforma energía química en mecánica.

Para ser precisos semánticamente, la fuente debería llamarse energía de conservación, para recordarnos la realidad, de que la conservación podría contribuir más que cualquiera de las energías convencionales en cualquier país con problemas energéticos.

Como ya se mencionó en los EU desde la década de 1980. Se hizo un serio compromiso con la conservación para consumir un 30% menos energía de lo que se consumía en los 70's, y así disfrutar del mismo o más alto nivel de vida. Este ahorro no dependía de un importante descubrimiento tecnológico y solamente requeriría de modestos ajustes en gran parte de las industrias así como en la forma de vida de las personas. Además el costo de la conservación de la energía es muy competitivo con otras fuentes energéticas.

Uno debe comprender que existe una gran flexibilidad en cuanto a la cantidad de energía que se requiere y cuanta se emplea en realidad para este o aquel propósito, de otra manera si obtenemos el mismo producto final, pero los métodos que se emplean para hacerlo varían bastante en cuanto a la energía que se consume y los desechos que se producen será deseable tener el método con la menor cantidad de energía posible con el mínimo de desechos.

Las barreras para el ahorro potencial a través de la conservación son muy grandes pero rara vez son tecnológicas. Aunque algunas de las barreras son económicas, en la mayor parte de los casos son institucionales, políticas y sociales. Para superarlas se requiere una política gubernamental, que le proporcione a esta fuente de energía una oportunidad igual en el mercado a la que disfrutaban las fuentes convencionales de energía.

¿Pero por que deben las naciones dar un mayor énfasis a la conservación?

En un principio como ya se comento la crisis petrolera llevo a que los EU se dieran cuenta que la dependencia excesiva del petróleo del Medio Oriente estaba llegando un punto peligroso y esto tenía como consecuencia un impacto social por motivos económicos; además, la limitada capacidad productiva que tiene los EU de gas y petróleo, las grandes incertidumbres de la creciente dependencia de la energía nuclear y el crecimiento moderado que se puede esperar del carbón.

La conservación muy bien puede ser barata, segura y productiva alternativa energética que ya está a disposición en grandes cantidades y la conservación es la única fuente energética de calidad. No amenaza con socavar el sistema monetario internacional, emite bióxido de carbono en menores cantidades que las fuentes convencionales, ni tampoco genera problemas comparables con los desechos nucleares.

Y contrariamente al pensamiento convencional, la conservación puede estimular la innovación, empleo y crecimiento económico.

### ***1.1 Tres tipos de conservación.***

Uno puede levantar un pedazo de carbón, tenerlo en la mano y decir "esto es carbón ". La conservación es mucho más difícil de captar y de comprender. A la vez que esto implica un sin número de diferentes cosas "bombas de calor economizadores, aislamiento, nuevas máquinas, también involucra cambio en los métodos y aún más importante, un compromiso progresivo para promover y llevar a la práctica la conservación. Para esclarecer estas cuestiones, podemos identificar tres categorías de conservación de energía, aunque los límites entre ellas sean confusos. Las dos primeras no son deseables. La tercera lo es.

La primera categoría de la conservación es a fondo la reducción. Cuando súbitamente se interrumpen los suministros, se obliga al ahorro de energía cuando las fábricas están cerradas y se pierde los días de trabajo, y la gente no maneja tanto porque no puede obtener gasolina. Esto sucedió en los EU cuando el gas natural interestatal faltó en 1976 y 1977, durante la huelga del carbón en 1977-78, y durante las colas para obtener gasolina de 1979.

Aunque el ejemplo más típico sea la falta de suministro de la energía eléctrica que se realiza comúnmente en nuestro país y en el futuro se podrían esperar más reducciones no solo de este tipo.

Una segunda categoría es el reacondicionamiento ó un cambio en la manera de trabajar. Para mucha gente la conservación de energía sugiere solamente reducción o reacondicionamiento algo represivo, que implica limitaciones, racionamiento y desempleo.

Lo han visto como el producto de una cruzada anticrecimiento. Este aspecto no se refiere a un reacondicionamiento en el equipo, instalaciones sino mas bien va encaminado decimos que la conservación de la energía debe también involucrar a las personas que trabajan en plantas industriales, así como a la sociedad en general, por más medidas que se tomen en cuanto a equipos en las plantas si no se cuenta con el apoyo del personal, no se logrará el objetivo deseado.

Pero existe una tercera forma de contemplar la conservación: como una forma de ajuste, que implica cosas como aislar térmicamente las casas, las manufacturas de los automóviles, procesos industriales y hacer más eficientes los aparatos domésticos y **aprovechar el calor de desecho**. A esto se le puede llamar *conservación productiva*, que fomenta cambios en el acumulamiento de capital y en el comportamiento diario que promueve el ahorro de energía en una manera en la que no se da una desorganización económica y social. Su propósito es utilizar menos energía de lo que ha sido el hábito para lograr una tarea (ya sea para calentar una casa o fabricar accesorios) para prevenir una posterior desorganización. Por lo tanto, la conservación no es un asunto teológico ni ideológico. Debe perseguirse no como un fin en si misma, sino como un medio hacia un mayor bienestar social y económico, como una manera de promover bienestar de la ciudadanía. Como lo han expresado dos prominentes analistas Lee Schipper y Joel Darmstadter<sup>2</sup>: "El factor más apremiante para fomentar la conservación es el costo de no hacerlo."

### *1.2 Los obstáculos para la conservación de energía.*

Un impedimento importante para la conservación productiva radica en su propio carácter (es un área de indagación altamente fragmentada que con certeza carece de encanto). En realidad no existe un arreglo tecnológico enorme que resuelva todos los problemas energéticos. Ciertamente es más fácil que el gobierno organice una gran medida, pero no es de lo que se trata con la conservación productiva. Involucra un sinnúmero de cosas grandes medianas o pequeñas y no en un solo lugar centralizado donde se produce la energía, sino un medio descentralizado donde se consume.

Un segundo obstáculo para la conservación es la manera en que se ha llevado a cabo el debate de la energía en muchas partes del mundo. Cuando irrumpió la crisis en 1973 en los EU cuando se habló con los expertos, la gente que había pasado su vida de trabajo tratando de aumentar los suministros de energía a partir del petróleo, gas, carbón y energía nuclear.

---

<sup>2</sup> Energía del futuro, Ed. CECISA, 1982



No era de sorprenderse que esta gente abogara vigorosamente por una rápida acumulación de fuentes convencionales y su voz tenía poder. Después de todo, ellos pertenecían a organizaciones establecidas para lograr dichas tareas y estas organizaciones habían sido admirablemente efectivas para hacerlo y en el proceso contribuyeron con mucho a la prosperidad general. Aunque hubiera estado involucrado el propio interés económico, los puntos de vista, convicciones y experiencias adquiridas a través de muchas décadas de trabajo para proporcionar más energía, naturalmente habrían hecho que esta gente pusiera énfasis en la producción de energía más que en su conservación.

Sus voces eran aun más poderosas porque la otra parte era demasiado débil. ¿Qué "experto" sería partidario de disminuir la demanda?, esa era la idea que se mantenía.

Quizá fuera de los fabricantes de aislamientos, no existía antes de 1980 en los EU una industria organizada de la conservación. De manera que no se tenía nada para comparar con los productores de energía en términos de mercado, distribución y cabildeo. Las compañías petroleras y las empresas eléctricas estaban muy ocupadas hablando acerca de cuanto necesitaban producir.

Pero nadie vende al mayoreo la conservación por tonelada o barril.

La industria de conservación empezó a crecer considerablemente desde 1975, pero hasta mediados de 1980, todavía era incipiente en los EU. De esta manera, los proveedores de energía en gran parte determinaron los términos del debate y establecieron lo que era importante y lo que no lo era.

Resumiendo, el esfuerzo para reformar el debate de esa nación sobre la energía al punto donde la conservación estaría considerada como una fuente seria de energía, fue lento inseguro y totalmente inadecuado en la década de 1970. Sin embargo, hoy en día la conservación (con ayuda de un creciente historial y de un cambio en las actitudes del público) finalmente se está tomando en serio por parte de un amplio espectro de la industria estadounidense, aunque no de la misma forma en nuestro país.

Un tercer obstáculo para la conservación productiva se puede resumir en la cita "permítase al mercado hacer su trabajo"<sup>3</sup>. Como debería estar claro, los precios de la energía en los EU deberían reflejar las realidades del mercado mundial y no se deberían restringir. Pero la liberación de los crecientes precios reales no es suficiente. Aunque los precios se empezaran a elevar sustancialmente mañana mismo, la conservación aun estaría seriamente obstaculizada por barreras políticas o sociales. La fe excesiva en el mercado tienden a oscurecer las dificultades y requerimiento de la necesidad de una transición para apartarse del mundo del petróleo (lo que en nuestro país resulta imposible por la dependencia económica). Simplemente porque los precios suben no significa que la gente dará ciertos pasos (o que tendrá un fácil acceso al capital, aunque si quieren dar estos pasos). El tiempo del problema energético se ha comprimido. De esta manera, el proceso de adaptación debe acelerarse.

<sup>3</sup> Energía del futuro. Ed CECOSA, 1982

La cuestión de los precios es una de las razones principales del porque todo el debate sobre la energía ha sido tan desagradable. Cualquier cambio significativo en los precios de la energía plantea asuntos reales en cuanto a la distribución (algunas personas serán perjudicadas mientras que otras ganarán). Decir que estos asuntos son secundarios es no tomar en cuenta la manera en que los grupos de intereses y las regiones hacen valer sus derechos en el proceso político. Por tanto una estrategia efectiva para la conservación tiene que buscar métodos para mediatizar los reclamos de distribución y tiene que proporcionar los incentivos y medidas de emergencia para reducir los perjuicios de los altos costos para los consumidores de ingresos aún más bajos.

La cuarta barrera es un malentendido fundamental acerca de la relación entre el uso de energía y el crecimiento económico. Muchos creen en lo que puede llamarse la ley de hierro de la unión energía (Producto Nacional Bruto -PNB-). Algunos economistas, así como un número de personas que toman las decisiones en los negocios, en el campo laboral y en el gobierno de los EU, han creído que existía una correlación de uno a uno directa y hasta inevitable entre el crecimiento económico y en consumo de energía y de acuerdo con esto, que al fomentar la conservación fácilmente podría sumergir a su nación en una grave situación económica.

El Energy Report del Chase Manhattan Bank hasta llegó a decir que "No existe una evidencia documentada que indique que la eterna y congruente relación entre el uso de la energía y el PNB cambiará en el futuro". Y una comunicación interna decía "No existe evidencia empírica que indique que la unión de energía con el crecimiento económico se pueda desunir" La idea básica detrás de la unión de hierro fue cáusticamente expresada por los dirigente de una varias comisiones en área de transportación "EU no llevo a ser grande conservando, llegó a ser grande produciendo"<sup>4</sup>.

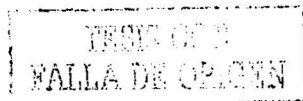
Pero de hecho, esta unión de hierro todavía tiene que demostrarse convincentemente. Permanece sin ser probada como puede verse estudiando el registro histórico y al comparar a los EU con otros países industriales avanzados. Ha existido una amplia y errática variación en la relación entre la energía y el PNB.

### *1.2.1 La industria de la manufactura.*

La industria se caracteriza por un constante conocimiento de sí misma. Cada vez se hacen mayores esfuerzos en él cómputo y comparación, para lograr mejor ubicación de los recursos, balance de procesos, y la mejora de productos. En otras palabras, la industria tiene un cometido y las ganancias son la prueba final.

Consecuentemente, debido a que la energía en las décadas de 1950 y 1960 era muy barata, un esfuerzo para ahorrarla difícilmente era una cosa que le preocupara a la mayor parte de las empresas.

<sup>4</sup> Energy report September 1976



Escuchábamos comentarios de ejecutivos como el siguiente: "Antes no prestábamos ninguna atención a los costos del gas, porque ni se veían"<sup>4</sup>. Pero el drástico aumento de 1973-1974 en los precios de la energía proporcionó un incentivo (aunque no siempre poderosos) para que los negocios buscaran innovaciones para el ahorro de energía como parte de un esfuerzo más amplio por reducir los costos de energía.

El proceso de conservación de energía industrial se puede clasificar en tres principales y en cierta medida interdependientes, grandes categorías:

- 1) Las mejoras domésticas, lo que significa cosas como el mantenimiento de calderas, ajuste de iluminación, el arreglo de escapes de vapor. Frecuentemente se pueden realizar sorprendentes ahorros importantes con una mínima inversión o sin ella.
- 2) La recuperación de los desechos, lo que frecuentemente involucra tecnología familiar. Uno de los aspectos más importantes es la recuperación de calor de desperdicio, una tarea importante para el reajuste industrial. Otra es la cogeneración de electricidad y vapor. Otra es la recuperación de productos de desecho. Por ejemplo, reciclar aluminio solo requiere 7% de la energía necesaria para extraer aluminio del mineral.
- 3) Innovación tecnológica, lo que requiere de un importante rediseño de los procesos y productos y una inversión de capital que abarca las tecnológicas más eficientes.

Desde principios de la década de 1970, las industrias han estado luchando por integrar el ahorro de energía dentro de sus principales propósitos.

El ahorro puede ser dramático cuando se contempla en términos de recuperación de la inversión. Los comentarios de varios de los ingenieros en empresas que están tratando de llevar a cabo el ahorro de energía son por el estilo: "Todos están buscando un enfoque innovador para la conservación de energía. No se trata de eso. No existe nada sensacional en la forma en que ahorramos energía. Se trata de una ética totalmente nueva para la conservación".

Se puede lograr en realidad una cantidad sorprendente a través de simples y buenas mejoras domésticas. Pero existen límites hasta para las mejores mejoras domésticas y en cuanto a un largo plazo, una mayor eficiencia requeriría inversiones para nuevas centrales y equipo, especialmente en industrias de alta intensidad energética. La evidencia sobre la conservación de energía en la industria es contradictoria.

Con todo, recientemente se ha hecho bastante común afirmar que el ahorro de energía en el sector industrial está procediendo rápida y suficientemente, lo que sugeriría que la conservación de la energía se está aprovechando ampliamente.

En este momento parecería conveniente decir lo que sigue: La conservación de la energía está procediendo con más rapidez en el sector industrial que en ninguna otra parte de la economía y el proceso se ha ido acelerando desde 1973, con la ayuda de uno de los más desarrollos positivos en el cuadro de la energía estadounidense, el creciente estatus e importancia del administrador de energía de las corporaciones.

En la unión americana entre 1973-1981 la producción industrial se elevó 20%, mientras que el uso de la energía industrial declinó 9% indicando una disminución en el uso de energía por unidad de producción industrial del 24%. Pero se necesita calificar lo anterior. La utilidad de datos recientes se ha restringido marcadamente por las recesiones de mediados de la década de 1970 y principios de la de 1980.

Un análisis de la declinación de la intensidad de energía en la industria de los EU entre 1973 y 1980, le atribuía la mitad de la ganancia a los cambios de producción y la otra mitad a una mayor eficiencia en el empleo de la energía. (esto último incluía tanto una continuación de las tendencias de antes de 1973 como al esfuerzo adicional que se estimuló a partir de entonces). Por tanto, sobre la base de lo que se conoce actualmente, sería prudente concluir que aunque la industria ha implantado el mejor récord hasta ahora en cualquier sector, permanece muy debajo de su potencial. A pesar de la relativa flexibilidad de la industria, la conservación ha sido mucho más lenta e incierta de lo que debería.

### *1.2.2 Las barreras para la conservación de energía.*

Una serie de barreras importantes retardan la conservación en la industria. Para empezar, la conservación efectiva no es algo que sucede automáticamente. Requiere una respuesta organizacional, por lo general a tres niveles. Debe haber un interés fuerte y permanente y un compromiso de parte de los principales administradores. Debe existir una unidad efectiva de energía en la compañía (es decir, ingenieros administradores que cuenten con la autoridad de los ejecutivos de alto nivel, quienes puedan poner en práctica cambios en las plantas y en las oficinas). Y finalmente la conservación se debe establecer dentro de las operaciones mismas, de manera que el uso de la energía sea constantemente inspeccionado y de manera que la conservación se convierta en parte de los hábitos de trabajo de los empleados y un elemento en los dividendos anuales del administrador y de los trabajadores.

La educación en temas relacionados con el uso de la energía, va de la mano con la educación ambiental. Convencer a la comunidad de que ahorre energía es un proceso más complicado que una campaña de vacunación, porque los riesgos de no hacerlo no son ni tan evidentes ni tan inmediatos. Sin duda, para que nuestro país se desarrolle necesitamos consumir energía, pero no podemos olvidar nuestra responsabilidad frente al cuidado del medio ambiente. Debemos aspirar a un desarrollo sustentable, es decir, aquel que no compromete el futuro de las generaciones venideras y asegura equidad en el presente.

En una sociedad con participación activa, la gente podría opinar sobre las decisiones estatales, pero para ello requiere un conocimiento fundamentado en la ciencia. Estas decisiones, que podríamos llamar "difíciles", le han dado a la divulgación científica una importancia fundamental. No es sólo por el placer del conocimiento que la ciencia debe estar al alcance de la comunidad, sino por el bien de nuestro futuro y del futuro de las investigaciones en las universidades. Sin duda, se intentará dar los fondos necesarios para aquellos temas que la sociedad considere prioritarios. Planteamos aquí que uno de estos temas prioritarios es la necesidad de la planeación energética.

México cuenta con grandes reservas probadas de hidrocarburos, alrededor de 40,000 millones de barriles de petróleo crudo equivalente.<sup>5</sup> Sin embargo, la diversificación energética es necesaria por varios motivos principales: hay aspectos técnicos y económicos que limitan el volumen de hidrocarburos que se puede extraer del subsuelo y hay un aumento en el costo del barril a medida que se hace más compleja la extracción.

Además, el petróleo es muy importante también en la elaboración de materiales sintéticos y, en cierta forma, se desaprovecha como combustible. Finalmente, es un recurso no renovable.

¿Cuáles deben ser las bases para definir los criterios necesarios en un programa de planeación energética? Se requiere contar con escenarios del balance energético del país, conocer la oferta de energía "probada" y decidir el desarrollo económico y social del país que queremos tener.

Los llamados Balances de Energía, son "un marco contable que integran información estadística relativa a la producción, transformación y consumo de energía". Permiten tener una visión ordenada y de conjunto de los principales flujos de ésta en un sistema determinado, por lo que son de particular utilidad para estimar necesidades totales, elaborar proyecciones y estudiar las posibilidades de sustitución y conservación de energía".

El balance nacional nos indica que la producción total de energía debe ser igual a las necesidades internas totales de energía, más las exportaciones totales de energía y más (o menos) las variaciones de inventarios. La producción total corresponderá a la suma de las contribuciones provenientes de las fuentes primarias de energía, tales como: hidrocarburos, hidroenergía, carbón, nuclear, geotermia y solar. Son fuentes no renovables aquellas que no podemos recuperar en tiempos comparables con la vida humana. Las necesidades internas son la demanda de energía de los sectores de la economía nacional, tales como: energético, industrial, transporte, comercial, doméstico y agrícola.

La elaboración de balances energéticos requiere una gran cantidad de datos, lo que dificulta su realización. Aún más complejo es el establecimiento de escenarios futuros, ya que es necesario conocer cómo se desarrollarán diversos parámetros económicos, tecnológicos, políticos y comerciales, entre otros, así como suponer la evolución de la interrelación existente entre dichos parámetros. Por ejemplo, y simplificando sobremanera la problemática real, se podría definir que los requerimientos internos de energía dependerán del estado de la economía nacional; los volúmenes de exportación de hidrocarburos obedecerán a la situación del mercado internacional y a la capacidad tecnológica nacional, y la participación de energéticos alternos se sujetará a las innovaciones tecnológicas y acciones de política.

---

<sup>5</sup> Sánchez A. M. M. (1995) Science Communication and a more efficient use of energy.

Existen diferentes métodos para hacer planeación energética. Por ejemplo el llamado LEAP, de las siglas en inglés para "planeación a largo alcance de energías alternativas", es un modelo que permite evaluar el efecto de diferentes políticas energéticas en el consumo de energía y en sus consecuentes emisiones. Dentro de este esquema se calcula la energía consumida por la demanda, a partir de la energía gastada por los diferentes sectores finales de México. Por ejemplo, los sectores finales son el residencial, el agrícola, el industrial, el transporte y la energía consumida por el propio sector energético. La fase de transporte incluye generación y distribución de electricidad, las refinerías, las plantas de gas, la producción de gas natural, y la producción de petróleo y coque. Una vez que se calcula la energía de la demanda, las fuentes primarias y las transformaciones deben ser compatibles con ésta.

Estos modelos permiten desarrollar escenarios posibles para México, por ejemplo, a partir del año 1996 hasta el 2025.<sup>6</sup> Se tienen que plantear hipótesis, como suponer un crecimiento económico constante a un cierto porcentaje del PIB. También es importante el número de habitantes. Si el crecimiento anual de la población fuera constante y de 1.21 %, seremos 130 millones en el año 2025. También hay que suponer cómo aumenta la demanda de energía y cómo crece la capacidad instalada de las transformaciones energéticas. Finalmente, también hay que definir a qué se dedicará el aumento de energía eléctrica.

Se sabe que en 1996 el 74% de la energía primaria neta de México se usó en los sectores finales y el 19%, en la transformación. El 7 % restante fueron pérdidas por distribución y almacenaje. Sólo el 11.6 % vino de fuentes de energía renovables. Para imaginar lo que pasará en 2025, se pueden construir tres escenarios diferentes con base en las siguientes suposiciones.

En el primer escenario se considera a los hidrocarburos como la principal fuente de energía. En el sector de generación de potencia se usa tecnología basada en combustóleo. En el segundo escenario, la fuente privilegiada es el gas natural. Toda la instalación nueva de capacidad energética se basa en tecnologías de gas natural. En el tercer escenario, las fuentes de energía renovables se usan para suplir las nuevas necesidades de demanda, siempre y cuando sean factibles tanto desde el punto de vista económico como del técnico, lo que implicaría que el 31% de la energía total primaria vendría de fuentes renovables.

¿Cómo podemos evaluar estos escenarios? Un factor fundamental es medir sus impactos en el medio ambiente. Muchos procesos de combustión energética van acompañados de emisiones, principalmente de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. El primer escenario es el que más rápidamente contamina. El uso de gas natural disminuye el ritmo de la contaminación. La diversificación de fuentes de energía, con el uso de fuentes renovables, nos ofrece un escenario en el cual se puede llegar a controlar y reducir la contaminación ambiental. Además, en este último esquema se ahorra petróleo para utilizarlo en otras aplicaciones.

<sup>6</sup> S Manzini, F. J. (2000) Reduction of Greenhouse Gases Using Renewable Energies in Mexico 2025

Los resultados anteriores son escenarios de futuros posibles de la Demanda Interna de Energía Primaria en México y las fuentes primarias y tecnologías que las satisfarán. Se debe siempre considerar, además, que un programa de ahorro de energía podría repercutir muy favorablemente en los requerimientos nacionales de inversión, divisas y desarrollo tecnológico.

Se debe enfatizar que la evaluación de un sistema energético, como viable técnicamente, no implica que su implantación sea factible desde un punto de vista económico o social. El apoyo al desarrollo científico y tecnológico nacional es imprescindible, debiéndose establecer políticas y criterios que favorezcan la utilización de esquemas creados en el país, así como reglas que aseguren una verdadera transferencia de tecnología cuando sea necesario emplear procesos extranjeros.

Finalmente, la comprensión de estos problemas por parte de la población en general y los legisladores, servirá para lograr el cumplimiento de las metas del desarrollo, que se resumen a continuación:

- Incrementar el empleo.
- Mejorar la tasa de crecimiento económico.
- Lograr una distribución más equitativa del ingreso.
- Impulsar la descentralización de la vida nacional.
- Obtener y asegurar un mayor grado de independencia económica y tecnológica.
- Aliviar las presiones en la balanza de pagos.
- Garantizar un orden y una disciplina ecológica.

Por todo lo anterior se observa que el ahorro de energía es una realidad hoy en día y debe ser una fuente de energía alternativa, sin embargo en el sector industrial y sobre todo en industrias que tienen una gran capacidad energética el llamado calor de desperdicio que se utiliza como un nombre general, es decir como aquel calor que no fue utilizado en el proceso y se disipa al ambiente si no existe un medio o mecanismo que se lo impida. Pero para procesos de combustión este calor recibe un nombre en particular el cual debemos nombrar "**calor de los gases de combustión a la salida**" lo cual nos permite saber de donde proviene ese calor no utilizado en el proceso inicialmente.

### ***1.3 Fuentes y usos de calor de los gases de combustión a la salida.***

El calor de los gases de combustión a la salida ha sido definido como el calor liberado de un proceso a una temperatura superior a la ambiente, con suficiente margen que permita al ingeniero aprovechar parte de ese calor. Las fuentes de calor de los gases de combustión a la salida se pueden definir según su temperatura, en tres rangos:

El rango de alta temperatura se refiere a valores superiores a 1200°F. El rango de temperatura media se encuentra entre 450°F y 1200°F, el rango de temperatura baja, inferior a los 450°F. El calor de los gases de combustión a la salida a temperaturas altas y medias se puede usar para producir vapor de proceso. Si se cuenta con calor de los gases de combustión a la salida a alta temperatura, en lugar de producir vapor directamente debe considerarse la posibilidad de usar la energía de alta temperatura para hacer trabajo útil antes de extraer calor de los gases de combustión en el rango de bajas temperaturas.

1.3.1 Fuentes de calor de desperdicio.<sup>7</sup>

La combustión de los hidrocarburos produce gases en el rango de temperatura alta. La máxima temperatura teórica posible en quemadores atmosféricos se encuentra un poco debajo de 3500°F, en tanto que la temperatura de flama que se ha medido en los quemadores prácticos es un poco inferior a 3000°F. Con consecuencia se admite aire secundario o algún otro diluyente al quemador para reducir la temperatura de los productos a la temperatura requerida en el proceso; por ejemplo para proteger equipo, reduciendo así el valor práctico de la temperatura del calor de los gases de combustión a la salida.

La tabla 1.1 que sigue da las temperaturas de gases de combustión a la salida de equipo de proceso industrial en el rango de alta temperatura, todos estos casos resultan de procesos de combustión directa.

Tabla 1.1.-Temperaturas de gases de combustión a la salida de equipo de proceso industrial en el rango de alta temperatura.

Tipo de dispositivo	Temperatura °F
Horno de refinación de níquel	2500-3000
Horno de refinación de aluminio	1200-1400
Horno de refinación de zinc	1400-2000
Horno de refinación de cobre	1400-1500
Horno de calentamiento de acero	1700-1900
Horno de reverbero para cobre	1650-2000
Horno de hogar abierto	1200-1300
Horno de cemento (proceso seco)	1150-1350
Horno para fusión de vidrio	1800-2800
Planta de hidrógeno	1200-1800
Incineradores de desperdicios sólidos	1200-1800
Incineradores de fumigación	1200-2600

<sup>7</sup> Guía para el aprovechamiento de calor (1990)



La tabla 1.2 da las temperaturas de gases de desperdicio obtenidos de los equipos de proceso en el rango de temperatura media. La mayor parte del desperdicio en este rango proviene de los escapes de las unidades de proceso de combustión directa. El calor de desperdicio a temperatura media aún es suficiente para permitir considerar la extracción de trabajo mecánico por medio de una turbina de vapor o de gas.

*Tabla 1.2 Temperaturas de gases de combustión a la salida de equipo de proceso industrial en el rango de temperatura media.*

Tipo de dispositivo	Temperatura °F
Escapes de caldera de vapor	450-900
Escapes de turbina de gas	700-1000
Escapes de Maquina reciprocante	600-1100
Escapes de Maquina reciprocante (con turbocargador)	450-700
Hornos para tratamientos químico	800-1200
Hornos para secado y cocción	450-1100
Crakers catalíticos	800-1200
Sistemas de enfriamiento de horno de recocido	800-1200

El calor de desperdicio a baja temperatura se puede utilizar en forma suplementaria para precalentamientos

*Tabla 1.3.- Temperaturas de gases de combustión a la salida de equipo de proceso industrial en el rango de baja temperatura.*

Fuente	Temperatura °F
Condensado de vapor de procesos	130-190
Agua de enfriamiento de:	
Puertas de horno	90-130
Chumaceras	90-190
Máquinas de soldar	90-190
Máquinas de moldeo por inyección	90-190
Hornos de recocido	150-450
Troqueles	80-190
Compresores de aire	80-120
Bombas	80-190
Máquinas de combustión interna	150-250
Condensadores de aire acondicionado y refrigeración	90-110
Condensadores de destilación líquida	90-190
Hornos de secado curado y cocción	200-450
Líquidos procesados en caliente	90-450

### 1.3.2 Como usar el calor de los gases de combustión a la salida.

Para usar el calor de los gases de combustión a la salida de fuentes como las ya descritas, con frecuencia se desea transferir el calor existente de un fluido a otro fluido (por ejemplo, de gas de tobera al agua de alimentación o aire de combustión) al dispositivo que efectúa esta transferencia se le llama cambiador de calor.

El equipo que se usa para recuperar el calor de los gases de combustión a la salida puede variar de algo tan simple como un tubo o ducto, hasta algo tan complejo como una caldera de calor de desperdicio.

Estas tecnologías desarrolladas, han sido empleadas durante años en algunas industrias.

- 1) Los gases de escape a temperatura alta y media pueden usarse para precalentar aire de combustión en:  
Calderas que usan precalentador de aire.  
Hornos que usan recuperadores.  
Turbinas de gas que usan regeneradores.
- 2) Los gases de escape a temperaturas bajas a medianas se pueden usar para precalentar el agua de alimentación de las calderas o agua de reposición de las calderas provistas de economizador, que son simplemente dispositivos de calentamiento de agua de gas a líquido.
- 3) Los gases de escape y el agua de enfriamiento de los condensadores se pueden usar para recalentar insumos líquidos y/o sólidos en los procesos industriales. En este caso se usan intercambiadores de calor de tubos con aletas y tubos en coraza.
- 4) Los gases de escape se pueden usar en calderas de calor de desperdicio, para generar vapor, y producir potencia eléctrica, mecánica o vapor de proceso, o bien combinación de ellas.
- 5) El calor de los gases de combustión a la salida puede ser transferido a unidades de procesos líquidos o gaseosos, directamente por medio de tubos o conducto, o indirectamente a través de un fluido secundario, por ejemplo aceite o vapor.
- 6) El calor de los gases de combustión a la salida puede ser transferido a un fluido intermedio por medio de cambiadores de calor o caldera de calor de desperdicio, o bien puede ser aprovechado circulando el gas caliente de escape a través de tubos o ductos.

El calor de los gases de combustión a la salida se puede usar para operar una unidad de enfriamiento por absorción, para acondicionamiento de aire o para refrigeración.

Organización de un programa de administración de calor de los gases de combustión a la salida.

Toda planta tiene algo de calor de los gases de combustión a la salida. esto es. un estudio sistemático de las fuentes de calor de desperdicio de una planta y las oportunidades para utilizarlo, normalmente formaría parte de un programa más amplio de conservación de energía.

La organización y administración de un programa de recuperación de calor de los gases de combustión a la salida, es parte integral de un programa general de conservación de energía, pero el esfuerzo de ingeniería y la inversión de capital necesaria para la recuperación de calor de desperdicio son considerablemente mayores que las necesarias para la mayor parte de las otras oportunidades de ahorro de energía. Así pues, las decisiones que afectan a los proyectos individuales resultan más difíciles de tomar. Los gastos necesarios para los estudios de ingeniería y los análisis económicos son sustanciales, por lo que se demanda la obtención de una mayor ventaja en la utilización óptima de la energía. Por otra parte, el ahorro obtenido por los costos reducidos de la energía, puede ser mayor y esto constituye el incentivo de invertir a fondo en la recuperación de calor de los gases de combustión a la salida.

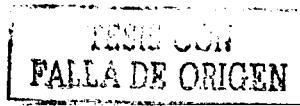
Implementación para la administración del calor de los gases de combustión a la salida.

Los primeros pasos que deben darse son revisar las unidades de proceso de la planta, con el objeto de descubrir las oportunidades para recuperar y usar el calor de desperdicio. El siguiente paso es estudiar el diagrama de flujo del proceso y sus balances térmicos para determinar en donde existen oportunidades para recuperar el calor de desperdicio. Enseguida se evalúan resumiendo los resultados de los estudios técnicos y económicos para cada unidad de proceso, usando información adicional apropiada, así como propuestas de fabricantes de equipos de recuperación de calor de los gases de combustión a la salida.

Siempre que sea posible, los procesos individuales deben estar sujetos a la medición de su consumo de combustible e instrumentados de manera que se pueda vigilar el comportamiento del equipo. Es esencial, si se desea obtener el máximo beneficio de la inversión de capital, que el equipo se mantenga en condiciones óptimas de operación, lo que solo puede asegurarse por medio de una adecuada instrumentación y un programa activo de pruebas.

### 1.3.3 Determinación de los requerimientos de calor de los gases de combustión a la salida.

La recuperación económica del calor de los gases de combustión a la salida depende de cinco factores. Primero debe existir una demanda para el uso de calor de los gases de combustión a la salida. Este punto se presupone que ya ha sido considerado en la planta de proceso en la que se quiera realizar la recuperación de calor. Segundo debe tenerse tal cantidad adecuada de calor de los gases de combustión a la salida; para estimar la cantidad de calor disponible, se usa la primera ley de la termodinámica. Tercero el calor debe ser de la calidad adecuada para el objeto en cuestión; por ejemplo si se dispone de calor a 300°F, no se puede emplear para calentar vapor a 400°F. Los problemas de calidad de calor y disponibilidad se tratan utilizando la segunda ley de la termodinámica. Cuarto el calor debe ser transferido de la corriente de desperdicio a la pieza de trabajo o material donde deba usarse. Este es un problema de transferencia de calor. Quinto el calor de los gases de combustión a la salida debe usarse de manera que sea rentable; ésta es una cuestión económica.



Por lo que se refiere a la primera ley de la termodinámica, la cantidad del calor de los gases de combustión a la salida disponible se determina de los balances térmicos de las unidades de proceso, de plantas completas o de grupos de plantas.

La base de las ecuaciones de balance térmico es la primera ley de la termodinámica que dice que la energía no puede ser creada ni destruida. Para los objetivos de la ingeniería, no se tomará en cuenta la conversión de energía en masa o viceversa, para nuestro objeto esta ley puede enunciarse de la siguiente manera:

El aumento neto del contenido de energía de un sistema, más el trabajo efectuado sobre el sistema particular en un periodo dado es igual al contenido de energía del material que abandona el sistema, más el trabajo efectuado sobre el sistema, más el calor efectuado por el sistema.

Para estimar la cantidad de calor de desperdicio, consideremos un sistema con volumen conocido (por ejemplo una caldera, a la cual entran y de la cual salen materiales). Si  $U_{ent}$  denota la energía interna del material que abandona el sistema  $Q$  es el calor agregado al sistema y  $W'$  el trabajo efectuado por el sistema (el valor negativo del trabajo efectuado sobre el sistema), la primera ley de la termodinámica se puede escribir entonces:

$$Q - W' = U_{ent} - U_{sal} \dots (1.1)$$

Para escribir de esta forma la ecuación se han despreciado varios términos de energía, tales como energía cinética, energía eléctrica, energía magnética, y energía gravitacional, que pueden ser importantes en aplicaciones específicas pero no necesitan considerarse para aplicaciones relativamente simples.

La segunda ley de la termodinámica indica que la entropía de un sistema aislado no puede disminuir; esto es, en un sistema aislado las fuerzas y diferenciales de temperatura tienden a disiparse y en cualquier caso, no crecerán espontáneamente. Por ejemplo, la primera ley de la termodinámica permitiría usar el calor de desperdicio en vapor de salida a 250°F para fundir acero la segunda ley nos dice que no podemos, a menos que introduzcamos energía al sistema en conjunto, el calor fluirá del acero caliente al vapor tibio y no al contrario.

En la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería de calor de desperdicio, esta comprensión cualitativa es todo lo que se requiere, sin embargo para algunos casos especiales es útil efectuar un "análisis de disponibilidad". El concepto de disponibilidad es una herramienta que se emplea para analizar la utilidad de la energía en nuestro calor de desperdicio (en función de la segunda ley). La disponibilidad se define (suponiendo que se puede despreciar las contribuciones de energía provenientes de la velocidad, de la gravitación). Donde  $B$  es la disponibilidad (energía libre de Gibbs),  $H$  la entalpía,  $S$  la entropía y  $T_0$  la temperatura (generalmente la ambiente) del depósito disponible para "vaciar" el calor.

$$B = H - T_0 S \dots (1.2)$$

**1.4 Economía de la recuperación de calor de los gases de combustión a la salida.**

Los detalles de análisis financieros naturalmente son particulares de cada compañía. Los procedimientos generales y los tipos de requerimientos de datos, serán esencialmente uniformes para muchas industrias que pudieran desear evaluar una inversión en la recuperación de calor de desperdicio.

En el caso que haya un tipo de equipo de recuperación de calor de gases de salida adecuado para la aplicación específica y pocas posibilidades en cuanto al tamaño del equipo, la decisión sobre la inversión es simple ¿debe comprarse el equipo o no?. En el caso en que sea posible el uso de equipos con diferentes características, la pregunta no será solamente si debe comprarse, sino que equipo entre los diferentes tipos y tamaños es el más eficiente.

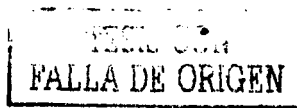
La discusión de técnicas de evaluación de inversión presupone que un objetivo fundamental de un negocio, es la maximización de la utilidad (Otros objetivos posibles incluyen la minimización del costo para una producción dada, minimización del riesgo de pérdidas, maximización de las ventas). Probablemente la mayoría de las industrias tienen varios objetivos, pero la maximización de la utilidad es una de las más importantes. Una inversión adecuada en la recuperación del calor de desperdicio generalmente aumenta las utilidades reduciendo los costos de combustible y, en algunos casos, obteniendo ingresos. Se supone una utilidad de la inversión que se espera en los sistemas de recuperación de calor es un factor crítico para determinar si la firma debe o no aceptar los sistemas.

**1.4.1 Costos y beneficios.**

En general, la motivación que tienen las firmas industriales para invertir en la recuperación de calor de los gases de salida es que espera que los beneficios resultantes sean superiores a los costos de inversión. Los factores que recientemente han hecho atractivas estas inversiones son los elevados costos de combustible y la reducción de fuentes ordinarias de combustible, que amenazan con cortes de producción y la necesidad de cambio a otras fuentes de energía.

Además la reglamentación contra la contaminación y los costos cada vez mayores de la mano de obra inciden en las utilidades y hacen que las firmas comerciales consideren más cuidadosamente las formas en que pueden controlar los costos.

Los beneficios potenciales que pueden resultar de la recuperación de calor de los gases de combustión a la salida se explican en la siguiente tabla. Estos beneficios han sido sugeridos por una observación preliminar de las aplicaciones existentes; sin embargo, solo una de ellas, o sea el ahorro de combustible, se encuentra en la mayoría de los casos. Los otros beneficios, ahorro en capital y costos de mantenimiento del equipo existente, reducción de la contaminación, ahorro de salarios, mejoramiento del producto y recuperación por las ventas del calor recuperado, parecen limitados a ciertas aplicaciones.



*Tabla 1.5 Posibles beneficios de la recuperación de calor de los gases de combustión a la salida.*

Tipo de beneficio.
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ahorro de combustible.</li><li>▪ Reducción de tamaño en consecuencia, costo de capital más bajo del equipo de calefacción/enfriamiento.</li><li>▪ Reducción de costo de mantenimiento del equipo existente.</li><li>▪ Reducción de la contaminación.</li><li>▪ Reducción de los costos de mano de obra de producción.</li><li>▪ Mejor calidad del producto.</li><li>▪ Ingresos por las ventas del calor o energía recuperado.</li></ul>

El ahorro de combustible se obtiene cuando se recupera el calor de los gases de combustión a la salida y se usa en sustitución de calor o energía que de otra manera se compraría. Por ejemplo, el calor de los gases de salida de una chimenea se puede recuperar por medio de un economizador y usarlo para calentar el agua de entrada, reduciendo así la cantidad de combustible necesaria para la generación de vapor.

Es posible efectuar ahorros en costos de capital para ciertos elementos del equipo existente (por ejemplo, equipo regular aparte del requerido para la recuperación calor de los gases de combustión a la salida), si el calor recuperado reduce la capacidad necesaria en hornos u otro equipo de calefacción o enfriamiento.

La reducción en el mantenimiento y reparación de ciertas partes del equipo existente puede, en algunos casos considerarse un beneficio adicional de la inversión en la recuperación de calor de los gases de combustión a la salida.

El impacto principal sobre el mantenimiento del equipo existente habrá de provenir probablemente de las fases de planeación, ingeniería e instalación de la inversión en la recuperación calor de los gases de combustión, cuando el equipo existente y los procesos de la planta son sometidos a análisis e investigación. Las fallas existentes pueden ser identificadas y corregidas; y las mejoras en las prácticas de mantenimiento se pueden extender al equipo existente. Aunque estos mismos efectos se pueden lograr independientemente de la recuperación calor, gracias a una inspección aislada del equipo existente. La planeación para recuperar el calor de los gases de combustión a la salida se convierte en una motivación de las inspecciones.

Además el costo de la información probablemente se reduce significativamente cuando la inspección se efectúa conjuntamente con la planeación para la recuperación calor. Hay otros efectos adicionales de la recuperación calor de los gases de combustión a la salida, que pueden reducir los costos de mantenimiento; por ejemplo una disminución en la temperatura de los gases de chimenea.

Otro tipo de beneficio que puede resultar de la inversión en la recuperación calor es el ahorro en costos de mano de obra. Este ahorro de mano de obra puede resultar, por ejemplo, de una reducción en el tiempo de cambio de régimen del horno (es decir el tiempo necesario para alterar las temperaturas del horno que se requieren para un cambio en utilización dentro de la producción) precalentando el aire de combustión con calor de los gases de combustión a la salida.

También pueden obtenerse ahorros derivados de arranque más rápidos de hornos, logrados por medios similares. Al reducir la cantidad de tiempo muerto los costos unitarios de mano de obra se reducen (pueden existir disyuntivas entre mantener el horno vacío a altas temperaturas durante las horas de no producción, o incurrir en tiempos muertos de mano de obra durante los arranques del horno). Si la práctica común es mantener el horno caliente vacío para evitar los tiempos muertos, el ahorro proveniente del uso de calor de los gases de combustión a la salida recuperado para precalentar aire lo sería en función de reducciones de combustible y no por reducciones del costo de la mano de obra).

La reducción de la contaminación es un beneficio marginal que puede resultar de la recuperación calor de desperdicio. La recuperación calor de los gases de combustión a la salida del aire que abandona el horno antes de entrar al cambiador de calor no solo entregará calor o energía que puede usarse para reducir los costos de combustible, sino que también ayudará a la recolección de contaminantes. Si no fuese por la recuperación de calor, sería necesario enfriar el aire utilizando otros medios, lo que generalmente requeriría de consumo adicional de combustible.

El mejoramiento del producto es un efecto marginal potencial más, proveniente de la recuperación calor de desperdicio, ya que al lograr una temperatura más estable en el horno y una reducción en la aereación del mismo, el uso de un recuperador para precalentar aire de combustión puede reducir la formación de escamas indeseables en productos metálicos. En ausencia de aire de combustión precalentado, sería necesario invertir en mejorar los controles de horno o en algún otro medio para evitar la formación de escamas, para asegurar la calidad del producto.

Un beneficio potencial final proveniente de la recuperación calor de desperdicio, según se ve de las aplicaciones existentes, es la generación de ingresos provenientes de las ventas por calor y energía de desperdicio recuperados. En algunos casos, el calor de los gases de combustión recuperable no puede ser utilizado en su totalidad dentro de la planta misma. La recuperación puede, sin embargo, seguir siendo ventajosa si hay plantas adyacentes interesadas en comprar el calor recuperado. En este caso, el beneficio potencial, la generación de ingreso, en lugar de reducción de costo y sus efectos serían medibles como ingresos adicionales recibidos por venta.

Con la siguiente información: registro de niveles y erogaciones de operaciones pasadas, la eficiencia del equipo de recuperación de calor propuesto, el nivel esperado en la operación del horno, la demanda de calor reciclado y el precio probable del combustible, sería posible predecir con bastante precisión, el ahorro en costos de combustible que resultaría al sustituir calor de desperdicio en lugar de calor o energía adicionales, algunos de los otros beneficios potenciales, como por ejemplo, el ahorro de mano de obra y mejoramiento del producto, pudieran ser más difíciles de estimar.

Para evaluar la conveniencia de inversión se necesitan mediciones de costos para comparar con los beneficios.

Los costos pueden comenzar aún antes de que el sistema de recuperación de calor sea instalado, extendiéndose a lo largo del periodo de operación continua de la planta. En la mayor parte de los casos, la partida principal de costo probablemente será la adquisición e instalación del cambiador de calor y debe ser relativamente fácil estimarlo una vez seleccionado.

Es importante que solo aquellos costos y beneficios atribuibles a una inversión sean incluidos en el análisis de la inversión. Si la planta requiere agregar un aparato de control de contaminación no debe estar influida por los costos del sistema de control de contaminación. O los costos de sustitución o reparación de equipo no necesarios por la adición del sistema de recuperación de calor no deben incorporarse a la evaluación del calor de desperdicio, aunque debe hacerse conjuntamente, por conveniencia.

Costos potenciales que deben considerarse al invertir en recuperación de calor de los gases de combustión:

- 1) Costos de preingeniería y planeación.
- 2) Costo de adquisición del equipo de recuperación de calor.
- 3) Costos de adquisición de las adiciones necesarias al equipo existente.
- 4) Costo de sustitución.
- 5) Costo de modificación y reparación de equipo existente.
- 6) Costos de espacio.
- 7) Costos de suspensión de producción durante la instalación.
- 8) Costos de ajuste (eliminación de problemas durante la puesta en servicio).
- 9) Costos de mantenimiento del equipo nuevo.
- 10) Impuestos sobre la propiedad y/o equipo, aplicados al equipo de recuperación de calor.
- 11) Cambio en los costos de seguros por riesgos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 1.5 Herramientas de la ingeniería para la conservación de energía.<sup>8</sup>

Lo que nos concierne primero, ya sea en los equipos o especificaciones de operación práctica, es revisar las herramientas de la ingeniería, que es básico, pero de gran valor ya que nos permitirán tener una base para abordar el tema de la conservación de energía.

#### 1.5.1 Auditorías de energía.

Una de las formas en que se apoya la ingeniería para evaluar las condiciones de equipos y/o de operación son las auditorías de energía que no es más que un estudio significativo para inspeccionar la energía realmente usada.

La técnica consiste en determinar el total de los combustibles usados, dada la facilidad con que se obtienen los porcentajes de cada combustible usado, estos porcentajes deben ser justificados realmente sumando el consumo de cada uno de los usuarios para cada combustible. Los datos deben ser colectados seriamente ya que sin esto la auditoría al final puede tener una credibilidad cuestionable y el impacto del estudio puede ser diluido sustancialmente.

#### 1.5.2 Balances de calor.

Otra de las formas importantes que nos permitirá tener un parámetro para llevar a cabo la conservación de la energía son los balances de calor que no es más que la contabilidad de la suma de las pérdidas de calor individuales relativos al calor de entrada al sistema. El balance de calor va directamente paralelo de la auditoría de energía excepto que el balance de calor es generalmente realizado para calentamientos específicos o procesos térmicos mientras la auditoría es por lo general dirigida hacia las instalaciones totales. Dependiendo del equipo al que se esté realizando el balance de calor serán las mejoras que podemos plantear sin embargo una consideración general es que al aumentar la eficiencia térmica se puede lograr una sustancial ganancia mejorando la conservación de energía.

Una vez que el balance es preparado apropiadamente puede ser usado no solo para dar una comparación de las pérdidas particulares sino como un patrón para lo cual se puede comparar operaciones dadas con operaciones similares en otras empresas. Obviamente si el balance de calor particular bajo estudio muestra consumos de combustible los cuales son más altos que los estándares típicos de la industria pueden ser justificados esfuerzos continuos en el mejoramiento del proceso en particular.

---

\* Combustion technology manual, 5th edition.

### 1.5.3 Nuevos diseños e instrumentación para el control de procesos.

Desde el punto de vista de ingeniería hay un número de formas que pueden ser consideradas en la conservación de energía sobre calentadores nuevos o existentes. El nuevo diseño de calentadores puede minimizar la cantidad del área de enfriamiento requiriendo, que las estructuras de soporte sean diseñadas desde un punto de vista estructural y térmico para minimizar las pérdidas de calor y maximizar la resistencia de la estructura.

El control de procesos puede ser implementado pero requiere un incremento en el capital inicial. Un diseño sofisticado de control permite que los calentadores puedan ser controlados efectivamente para mantener con precisión la proporción de alimentación, es decir, la cantidad de combustible requerido.

Además, equipos como los quemadores industriales están ahora disponibles en una variedad infinita de geometrías de flama e intensidades de combustión. En todos los casos, el calor liberado de los sistemas de combustión puede ser adaptado completamente, liberándolo en una zona diseñada para ello, particularmente en el caso de los calentadores continuos.

Cada instalación nueva puede dar consideraciones serias con respecto al futuro inmediato de la recuperación. El diseño de calentadores incluye la combustión y sistemas de control que pueden establecerse en tal forma que sean incorporadas recuperaciones en el futuro aunque no sean instaladas inicialmente. En este caso los quemadores pueden ser del tipo el cual sea capaz de hacer la operación con aire frío y en un futuro la operación con aire caliente. Los sistemas de control pueden ser del tipo que son operados con o sin precalentamiento.

Si se quiere asegurar en realidad la conservación de energía se requerirá que los sistemas de control y equipo o instrumentación de control sean apreciablemente más sofisticados y mejor aplicados que en el pasado.

### 1.5.4 Aislamiento.

El aislamiento como ya se mencionó, fue la primera forma de conservación de energía y con esto el ahorro de la misma, los aislamientos de calentadores continuos están en un área donde las mejoras pueden ser realizadas. Eficiencias altas en materiales como mantas bloques y recubrimientos muestran la forma de reducir sustancialmente las pérdidas por radiación en varios diseños de calentadores. Tales materiales no solo mejoran constantemente el estado de las pérdidas por conducción, sino que también muestran un ahorro térmico adicional en el almacenamiento de calor. Esta área de la conservación de calor es muy variada aplicable a casi toda industria, además que el desarrollo de nuevos materiales para aislar no termina.

CAPÍTULO II.  
ANTECEDENTES DE AHORRO DE ENERGÍA EN MÉXICO

## CAPÍTULO II. ANTECEDENTES DE AHORRO DE ENERGÍA EN MÉXICO

El ahorro de energía en México es un tema relativamente nuevo, como sabemos México ha dependido para satisfacer sus necesidades de energía y para apoyar su desarrollo industrial, fundamentalmente de los hidrocarburos. Adelantándose en muchos años a otros países productores de petróleo, México recuperó el dominio de la nación sobre los recursos petroleros en 1938 y ha sido básicamente autosuficiente en energéticos hasta la fecha, con excepción del periodo comprendido entre 1970 y 1974 en que tuvo que hacer importaciones de cierta magnitud.

Por eso la definición de una política de energéticos en México gira alrededor del petróleo, su abundancia o su escasez y el empleo que debe darse a los recursos de hidrocarburos con que cuenta el país.

La disponibilidad del petróleo y gas natural y el precio bajo de estos energéticos ha sido la base del desarrollo de México en los últimos sesenta años pero al mismo tiempo esa situación desalentó el desarrollo de otras fuentes de energía e hizo al país cada vez más dependiente de los hidrocarburos.

Por otra parte, la política de precios fijos de los productos petroleros frente a costos crecientes de producción, produjo que el sector no generase los recursos financieros suficientes para mantener el ritmo de las inversiones adecuado en las actividades de explotación y producción.

Podemos decir que, como se podía pensar en programas y mucho menos en una política hacia el ahorro de energía. Las tecnologías para el uso de la energía no podían desarrollarse en una época de energía barata, lo que se refleja en la baja eficiencia de numerosos sistemas para el uso final de la energía.

En los años setenta se pensaba que los ahorros más importantes en el consumo de energía podrían obtenerse en el sector transporte y en el sector industrial. Sin embargo la política de precios internos de los combustibles definida en el llamado "Plan de Desarrollo Industrial" que consideraba que debía continuar con la política de suministrar energéticos baratos, llevó a contribuir al desarrollo de una industria y transporte ineficientes en el uso de energéticos, poco efectivos comparados con los sectores internacionales.

El Plan Nacional de Desarrollo Industrial planteaba en sus afirmaciones iniciales lo siguiente:

*El plan propone una estrategia para ajustar gradualmente los precios internos de los combustibles industriales, de manera que a mediano plazo, se aproximen a los internacionales, siempre con un margen razonable a favor de la industria nacional. Ello alentará el uso más racional de los energéticos y permitirá absorber recursos para reorientarlos a destinos prioritarios.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Plan Nacional de Desarrollo Industrial, Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, México, 1979.

Por lo que se mantuvo la elaboración del Programa de Energía por la Secretaría de Patrimonio y Fomento industrial y la promulgación del decreto por el que se aprueba dicho programa y se ordena su ejecución, publicado en el diario oficial del 4 de febrero de 1981, lo cual constituye un acontecimiento de gran importancia. Por primera vez México cuenta con un Plan Nacional de Energía a largo plazo, con metas trazadas para 1990 y proyecciones al año 2000. El Programa de energía estaba centrado en los recursos petroleros de México y su utilización para el crecimiento económico y la industrialización del país.<sup>2</sup>

Sin embargo este programa no planteaba como tal el uso racional de la energía, aunque fue un paso muy importante ya que no contábamos en nuestro país ni siquiera con un programa de energía en años en que los países industrializados ya trataban de organizar los programas de uso racional de energía en todos los sectores (social, transporte, industrial, etc.). La creciente demanda en este tema llevo posteriormente a que se desarrollaran las instituciones que llevarían a cabo la tarea de cumplir con el objetivo de ahorro de energía.

En México el panorama del uso eficiente de energía es relativamente joven ya que la mayoría de instituciones o programas creados para tal propósito fueron fundados no hace muchos años, por ejemplo en la UNAM el Programa Universitario de Energía (PUE) fue creado en agosto de 1982, el Programa de conservación y ahorro de energía de Petróleos Mexicanos se creó en agosto de 1984, y la Comisión Nacional de Ahorro de Energía (CONAE) en 1989.

En la UNAM como una de las instituciones más importantes en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, se dio a la tarea de la creación del Programa Universitario de Energía, la primera idea fue constituir dicho programa en un vehículo de vinculación, entendida como una vía de dos sentidos:

De la Universidad hacia el entorno, para lograr que el conocimiento y las habilidades de los profesores e investigadores de la UNAM sean útiles a la sociedad; y que los individuos e instancias públicas, privadas y sociales externos a ella, relacionados con el sistema energético nacional y mundial, conozcan sobre las capacidades y la producción que sobre este tema poseen sus diferentes grupos especialistas.

Del exterior hacia la Universidad, para conseguir que sean transmitidas y difundidas en la comunidad universitaria las características y problemáticas del sector energético nacional e internacional, contribuyendo de esta manera a mantener el nivel de excelencia de la institución.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<sup>2</sup> Programa de Energía. Diario Oficial. México, 2 de febrero de 1981.

En el Programa Universitario de Energía se abordan temas del área energética tales como:

- Aspectos científicos y tecnológicos de los hidrocarburos y la electricidad, desde la exploración del recurso energético, hasta los usos finales y el ahorro de energía.
- El uso de las energías no convencionales para generación eléctrica, térmica o mecánica.
- Las emisiones contaminantes resultantes de la producción, el transporte y el uso de las diferentes formas de energía.
- Los impactos sociales y económicos relacionados con los sistemas energéticos.

Dentro de las actividades que se realizan dentro del PUE están:

- Organizar foros de consulta, coloquios, seminarios y conferencias.
- Publicar informes, libros, ensayos, memorias, etc.
- Efectuar censos de programas y proyectos relacionados con la energía, existentes en la UNAM y fuera de ella.
- Identificar programas interdisciplinarios y mecanismos para iniciar nuevos proyectos.
- Concertar convenios de colaboración con entidades externas a la Universidad: empresas, organismos gubernamentales e internacionales, etc.
- Fomentar relaciones entre dependencias de la UNAM y de ésta con otras instituciones públicas y privadas, nacionales e internacionales.
- Coadyuvar en la integración de los desarrollos tecnológicos en el sistema económico nacional.

Además aunque la creación del PUE fue hecha antes de la aparición de la CONAE este ha recibido su mayor impulso a partir de la creación de la CONAE ya que el trabajo en conjunto con otras instituciones ha venido impulsando de forma notable el avance en el tema de el ahorro de energía ya que como se ha dicho en el capítulo anterior la conservación de energía requiere un órgano descentralizado, por lo que para obtener los resultados que se trazan en la CONAE; PUE o PEMEX, no solo se requiere del trabajo de instituciones relacionadas con el manejo de procesos energéticos, sino de instituciones que ayuden la normatividad o financiamiento de los proyectos.

## **2. Importancia de la eficiencia energética y de los programas de ahorro.**

Como se ha mencionado antes, para obtener resultados en el uso racional de la energía se requiere de una gran participación en cada uno de los sectores que utilizan la energía, que en realidad es todo mundo de una u otra forma, y para obtener dicha participación debe brindarse la información que ayude a fomentar la colaboración, como el conocer los beneficios que el ahorro de energía producirá.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El maximizar la eficiencia en el uso de la energía tienen muchos beneficios como:<sup>3</sup>

Nivel nacional.	Nivel empresa.
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reducir el consumo nacional.</li> <li>▪ Permitir exportar más petróleo y/o conservar los recursos energéticos.</li> <li>▪ Reducir la necesidad de las inversiones públicas en producción, transporte y transferencia de energía.</li> <li>▪ Hacer a las empresas, especialmente en la industria, más competitivas.</li> <li>▪ Permitir exportar más productos y crear empleos.</li> <li>▪ Acelerar el desarrollo tecnológico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajar costos de producción.</li> <li>▪ Permitir producir más a menores costos.</li> <li>▪ Permitir exportar (o aumentar la exportación).</li> <li>▪ Permitir la modernización de los procesos a través del uso de tecnologías más eficientes.</li> <li>▪ Crear nuevos empleos (nuevas necesidades y aumento de producción).</li> </ul>

Rol del sector público (gobierno).	Rol del sector privado.
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Promover.</li> <li>▪ Coordinar.</li> <li>▪ Orquestar.</li> <li>▪ Establecer políticas y reglamentos, incluso capital.</li> <li>▪ Asegurar disponibilidad de recursos financieros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Debe ser socio del gobierno.</li> <li>▪ Participar activamente en la definición de políticas.</li> <li>▪ Asesorar -Promover "feedback".</li> <li>▪ Debe ser el implementador.</li> <li>▪ Identificación y selección de proyectos.</li> <li>▪ Financiamientos, implementación y evaluación de proyectos.</li> <li>▪ Otros (entrenamiento, comercialización de servicios y técnicos).</li> </ul>

Las instituciones que tienen participación con la energía y su uso adecuado de alguna manera no son solamente aquellas que se ocupan del estudio de alternativas energéticas o desarrollo de tecnología, o algún tema relacionado con la energía sino también aquellas que ayudan a promover su desarrollo, entre ellas tenemos:

<sup>3</sup> Implicaciones Económicas y Tecnológicas, CONACYT, 1992.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<b>Institución</b>	<b>Siglas</b>
Secretaría de Energía.	(SE)
Secretaría de de Economía.*	(SECOM)
Secretaría de Hacienda y Crédito Público.	(SHCP)
Secretaría de Comunicaciones y Transportes.	(SCT)
Secretaría de Educación Pública.	(SEP)
Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales.	(SEMARNAT)
Gobierno del Distrito Federal.	(GDF)
Petróleos Mexicanos.	(PEMEX)
Comisión Federal de Electricidad.	(CFE)

\* Antes del 2000 Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI).

La institución más importante en el tema de uso racional de la energía sin duda es la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), es una Comisión Intersecretarial creada por Acuerdo Presidencial el 28 de septiembre de 1989 y tiene por objeto fungir como órgano técnico de consulta en materia de ahorro y uso eficiente de energía, de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, de los gobiernos estatales y municipales y de los particulares, y constituye la instancia de concertación social responsable de promover acciones en esta materia que involucren a todos los sectores de la sociedad.

### **2.1 Funciones de CONAE.**

El Acuerdo de creación de la CONAE establece diversas funciones que se pueden agrupar en tres:

- Normalización.
- Asistencia Técnica.
- Promoción.

De manera particular las funciones más importantes de la CONAE son:

- Concebir y promover estrategias y acciones sobre el ahorro y uso eficiente y racional de la energía, así como coordinar y concertar dichas acciones.
- Preparar, coordinar y evaluar los programas nacionales de ahorro de energía.
- Promover, fomentar y difundir estudios relacionados con la utilización de energía, así como la investigación, desarrollo y difusión de tecnología para el ahorro y uso racional y eficiente de la energía.



**2.1.1 Objetivos estratégicos**

En función de la necesidad de seguir avanzando para poder aprovechar cabalmente los potenciales de ahorro de energía y de aprovechamiento de energías renovables que se presentan en millones de instalaciones que operan a lo largo y ancho de nuestro país, se han establecido seis objetivos estratégicos para 1998.

- 1) Consolidar la nueva estrategia de asistencia técnica de la CONAE.
- 2) Definir la personalidad jurídica de la Comisión.
- 3) Mejorar la capacidad para el diseño, operación y evaluación de programas.
- 4) Mejorar la calidad de los servicios de los consultores nacionales especializados.
- 5) Establecer un conjunto de políticas de alcance nacional para un aprovechamiento más amplio de las energías renovables.
- 6) Establecer una cartera amplia de proyectos que justifique la creación de ventanillas especializadas.

La Comisión Nacional para el Ahorro de Energía es la única organización gubernamental encargada de promover el uso eficiente y racional de la energía, así como el aprovechamiento de las energías renovables en todo el país. Tarea que ha cumplido exitosamente desde su creación en 1989, con una estructura organizacional y recursos presupuestales limitados. No obstante, en los últimos años ha logrado situarse, no sólo a nivel nacional sino también a nivel internacional, como una organización tipo en la promoción y desarrollo de programas y acciones de eficiencia energética. En este sentido, 1999-2000 representó un cambio significativo en el volumen e impacto de sus actividades, lo cual es el resultado de la evolución y consolidación de sus formas de operación, programas e instrumentos, y del constante proceso de aprendizaje en las formas de aprovechamiento de los avances tecnológicos, tanto en computación como en los sistemas de comunicación.

De acuerdo a las políticas y lineamientos planteados para el periodo 1995-2000; 1999 y 2000 se caracterizan por ser los años donde se inicia consolidación de los resultados esperados de acuerdo a los planes y programas nacionales establecidos al inicio del periodo. Asimismo, fijan las bases para la formulación de las políticas y metas para el periodo siguiente (2001-2006).

Asimismo, durante los últimos años, la CONAE cruzó dos umbrales significativos. En primer lugar, en septiembre de 1999, se convirtió en órgano desconcentrado de la Secretaría de Energía, y en segundo lugar, podemos decir que en el periodo 1995-2000, en México se ahorró una cantidad de energía como nunca antes en toda su historia. En este sentido, durante la pasada administración diversas instituciones -PAESE, FIDE y CONAE, entre otras- desarrollaron múltiples programas de ahorro de energía, con lo que para finales del 2000, estos programas resultaron en consumos evitados cercanos a los 41,000 millones de kWh y una reducción del crecimiento de la demanda máxima coincidente del sistema en 2,470 MW.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En lo que respecta exclusivamente a los programas de la CONAE, durante 1995-2000 se realizaron diversas actividades resaltando, en orden de importancia para la Comisión: el desarrollo de dieciocho Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia energética, el Programa de Ahorro de Energía en Inmuebles de la Administración Pública Federal, la Campaña de Ahorro de Energía de PEMEX, la instalación de 100 Puertos de Atención en los 32 Estados de la República, la coordinación del seguimiento al programa Horario de Verano, la realización de más de 400 eventos públicos sobre diversos temas en distintas ciudades del país, el llevar a cabo cerca de 200 reuniones al año de grupos de trabajo de alto nivel sobre una variedad importante de temas, y el cumplimiento de una apretada agenda de actividades internacionales.

Si bien durante estos seis años, la CONAE desarrolló la importante tarea de identificar potenciales de ahorro, de manera agregada los programas de ahorro de energía que desarrolló resultaron en consumos evitados cercanos a los 21,900 millones de kWh y una reducción del crecimiento de la demanda máxima coincidente del sistema en 1,000 MW, con los respectivos beneficios ambientales al dejar de emitir cerca de 18 millones de toneladas de contaminantes (98 por ciento corresponden a CO<sub>2</sub>).

**2.2 Ahorros por programas de la CONAE 1995-2000.<sup>4</sup>**

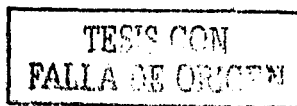
Ahorros logrados	1999	2000	Acumulado 1995-2000
Energía (GWh).	5,800	6,784	21,900
Equivalente económico del ahorro de energía. (Millones de pesos)	2,863	3,763	10,240
Capacidad. (MW)	748	1,000	1,000
Emisiones Evitadas. (Millones de Toneladas)	5	6	18

*Nota: Para presentar el equivalente económico del ahorro de energía logrado se utilizó el precio medio de la tarifa doméstica que reporta la CFE para cada año.*

Como referente, de 1995 a la fecha, el número de servidores públicos que laboran en la Comisión se ha mantenido prácticamente sin cambios, además de que el presupuesto anual asignado a la CONAE no ha tenido variaciones significativas, mientras que por otro lado, los ahorros energéticos obtenidos se han incrementado de manera exponencial.

*Nota: Las cantidades de ahorro de energía y presupuesto se expresan en millones de pesos. El ahorro de energía presentado se refiere sólo a la energía eléctrica ahorrada por las NOM's y otros programas que desarrolló la CONAE.*

<sup>4</sup> www.conae.com.mx.



Estos resultados marcan que la evolución de la Organización ha sido satisfactoria si consideramos que año con año se incrementan los ahorros de energía logrados por las actividades y programas que realiza. Esto no es más que el reflejo de una creciente productividad y, por lo tanto, rentabilidad social de lo que la nación invierte en la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.

<b>M E T A</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Programado Acumulado</b>	<b>Avance Real Acumulado</b>
Impactos de las Normas Oficiales Mexicanas en Eficiencia Energética	GWh = 9200	33.3%	33.3%
	MW = 1270	33.3%	33.3%
Impacto de los Programas de Ahorro de Energía de la CONAE	GWh = 125	20.0%	10.4
	MW = 20	20.0%	10.0
Número de Asistencias Téc. en ahorro de energía y energías renovables en los sectores público, privado y social	Asistencia Técnica= 3,000	22.7%	20.0%
Número de recursos humanos capacitados en ahorro de energía y energías renovables	Capacitados= 3,700	19.5%	18.8%
Número de personas con mensajes de la CONAE	Personas= 12.5 MM	24.1%	27.6%

Continuando con la definición de los principales elementos programáticos de la CONAE para el período 2001-2006 y tomando en consideración las líneas estratégicas de acciones establecidas, se plantearon metas por medio de las cuales se medirá el grado de avance de las actividades y logros de la Organización. En este sentido, a continuación se presentan las cinco metas rectoras establecidas para el período 2001-2006.

2.3 Metas CONAE 2001-2006.

META	2001	2006
Impactos de las Normas Oficiales Mexicanas en Eficiencia Energética (Ahorros)	GWh = 9,200 MW = 1,270	GWh = 18,280 MW = 2,580
Impacto de los Programas de Gran Alcance de la CONAE (Ahorros)	GWh = 125 MW = 20	GWh = 2100 MW = 300
Número de empresas apoyadas en ahorro de energía y energía renovable (anual)	Asistencia Téc.= 3,000	Asistencia Téc.= 10,000
Número de recursos humanos capacitados en ahorro de energía y energías renovables (anual)	Número de capacitados = 3,700	Número de capacitados = 6,000
Número de personas con mensajes de la CONAE (anual)	Personas con mensajes = 12.5, MM	Personas con mensajes = 38 MM

De acuerdo a la experiencia adquirida en más de diez años de trabajo y en congruencia con los planes y programas nacionales relacionados con la energía, la CONAE ha elaborado su Plan de Trabajo 2001-2006, el cual se integra por 10 programas básicos:

Seis programas sectoriales:

- Estados y Municipios.
- Empresas Paraestatales.
- Grandes Corporativos.
- Pequeñas y Medianas Empresas.
- Administración Pública Federal.
- Sector Social.

Además de cuatro Programas Temáticos:

- Normalización.
- Cogeneración.
- Energías renovables.
- Transporte.

2.3.1 Administración Pública Federal.

El sector público tiene dos características muy importantes que permiten apoyar esfuerzos nacionales para el uso eficiente de energía y aprovechamiento de las energías renovables: puede ser ejemplo de acción responsable para la sociedad y, representa un mercado importante de productos y servicios relacionados a esas acciones.

Para el período 2001-2006 las acciones de la CONAE estarán enfocadas a establecer en la Administración Pública Federal las bases normativas y de regulación que permitan optimizar el uso de la energía dentro de las instalaciones, procesos y prácticas que se realizan a través de las diversas dependencias y entidades que conforman este sector.

### 2.3.2 Estados y Municipios.

Para aprovechar cabalmente las oportunidades de eficiencia energética y de energías renovables es necesario realizar acciones en todos los puntos donde se consume la energía, los cuales, en nuestro país, suman cientos de millones. Esto implica que, para aprovechar esas oportunidades, se opere una articulación de actores muy amplia que no es posible bajo un esquema centralizado. Igualmente, las prioridades energéticas de cada estado o municipio varían de acuerdo a su actividad y desarrollo económico, al impacto que el consumo de energía tiene en su economía y a los recursos energéticos con los que dispone.

Bajo esta perspectiva, la estrategia de la CONAE para atender a estados y municipios se orientará al desarrollo de capacidades institucionales para la identificación, cuantificación, análisis e instrumentación de programas, proyectos y acciones en materia de eficiencia energética y aprovechamiento las energías renovables a nivel estatal y municipal. Igualmente, y en función de la alta rentabilidad que representa para usuarios y el país en general, y de la experiencia y capacidades establecidas en nuestro país, se promoverá la ampliación y, en su caso, el diseño e implantación, de programas regionales para la sustitución de equipos de baja eficiencia por nuevos más eficientes, en particular en zonas con altos crecimientos en el consumo de energéticos.

En este sentido, la CONAE se basará en su propia experiencia y fungirá, para hacer fluir información, soporte técnico y recursos financieros, como eslabón entre instituciones municipales y estatales y las instituciones federales e internacionales, públicas y privadas.

### 2.3.3 Empresas Paraestatales.

Las empresas paraestatales: PEMEX, CFE y Luz y Fuerza del Centro, por sus propios procesos y productos, consumen más del 35 por ciento del total de energía que se consume en el país.

Igualmente, y en especial en un gran número de instalaciones en PEMEX, los potenciales de ahorro de energía superan al 15 por ciento del consumo actual y que, al aprovecharlos, permitirían ampliar la oferta de energéticos en el país.

Por sus grandes dimensiones y complejidad no sólo técnica sino institucional, aprovechar los potenciales de ahorro de energía en las empresas paraestatales implica, además de una importante asignación de recursos, un gran reto tecnológico y de organización que sólo puede ser logrado a partir de un esfuerzo sistemático y sostenido. En esta perspectiva, la CONAE continuará apoyando en el desarrollo e implantación de herramientas analíticas, de esquemas y de protocolos que permitan profundizar en la identificación y aprovechamiento de todas las oportunidades existentes en las instalaciones de las empresas paraestatales.

#### 2.3.4 Grandes Corporativos.

Los grandes corporativos integran considerables consumos de energía y, por lo tanto, potenciales de ahorro de energía que, en volumen, pueden ser significativos. Además, tienen capacidad económica para adquirir e integrar sistemas que, por un lado, les permiten claras economías en sus costos de operación y, por otro lado, pueden significar demandas de productos y servicios a niveles que pueden apoyar el desarrollo de mercados de los mismos.

Finalmente, pueden establecer, justificados por el valor de las transacciones energéticas en un amplio conjunto de instalaciones, capacidades institucionales para manejar, específicamente, los temas energéticos. Por estas razones, la CONAE se enfocará al desarrollo de capacidades gerenciales en los grandes corporativos para que diseñen e instrumenten, dentro de sus propias instalaciones, programas integrales de ahorro de energía y aprovechamiento de energías renovables.

#### 2.3.5 Pequeñas y Medianas Empresas.

La importancia de las pequeñas y medianas empresas radica en su contribución a la creación de empleos ya que son la semilla de actividades empresariales mayores. Sin embargo, su propio tamaño limita sus capacidades para atender la multiplicidad de aspectos que comprende la actividad empresarial, ya que muchas veces disponen de pocos recursos para contratar apoyo técnico especializado, particularmente, en temas energéticos.

Para atender a este importante sector, la CONAE ha venido operando una estrategia que consiste, fundamentalmente, en establecer la Red Nacional de Puertos de Atención CONAE (PAC's) orientada a la atención a ese tipo de empresas a través de instituciones con vocación de vinculación a los sectores productivos y que, con el respaldo técnico de CONAE y de otras organizaciones a través de la red Internet, dan asistencia técnica directa de bajo costo y alta calidad a las empresas.

En este sentido, y dada la cantidad y variedad de actividades de este tipo de empresas, la CONAE requiere mantener y reforzar su estrategia para que se amplie su capacidad de atención y se establezcan las bases para que las pequeñas y medianas empresas de todo el país tengan la posibilidad de identificar y realizar sus proyectos y acciones de ahorro de energía y aprovechamiento de las energías renovables.

Por esto, el objetivo fundamental de las acciones de la CONAE para las pequeñas y medianas empresas es el de aumentar y reforzar la oferta de asistencia técnica para identificar y aprovechar las oportunidades de ahorro de energía y uso de energías renovables de estas empresas.

**2.3.6 Sector Social.**

Para que los esfuerzos nacionales en el uso eficiente de la energía tengan un impacto amplio y permanente es necesario que los individuos que forman parte del diverso tejido social de nuestro país entiendan el valor de estos esfuerzos y tomen una actitud positiva y activa. Por otro lado, el que las familias conozcan las formas en las que sus costos energéticos se pueden minimizar sin perder los beneficios del uso de la energía, sirve para proteger su economía y contribuir a un esfuerzo colectivo que beneficia a todos.

Finalmente, y en particular en el sector eléctrico, los patrones de consumo energético de los usuarios domésticos determinan, de manera importante, las demandas máximas coincidentes del sistema nacional, muchas veces con electrodomésticos con eficiencias muy inferiores a las que existen en el mercado.

En función de la importancia de este sector y del carácter fundamentalmente educativo de este esfuerzo, la CONAE orientará sus acciones para que el mayor número de mexicanos adquieran aptitudes y actitudes que resulten en un uso más eficiente de la energía. Para lograr estos propósitos, la CONAE realizará un amplio conjunto de acciones, buscando optimizar los recursos humanos, materiales y financieros a través del uso de tiempos oficiales en medios de comunicación, así como a través de alianzas con organizaciones públicas y privadas afines. Estas acciones se concentran en:

- Realizar campañas permanentes de información sobre la importancia del cuidado de la energía en medios masivos de comunicación, aprovechando tiempos oficiales.
- Desarrollar y proponer elementos educativos sobre ahorro de energía y energías renovables para ser utilizado en el sistema educativo nacional.
- Articular y promover, de manera permanente, eventos sobre la importancia y los beneficios del ahorro de energía y las energías renovables, a la población en general.

Para poder llevar adelante este programa, la CONAE buscará coordinarse con la SEP, la SEMARNAT y la SEDESOL; con gobiernos estatales y municipales, empresas eléctricas, asociaciones; instituciones educativas públicas o privadas y organismos internacionales.

**2.3.7 Normalización.**

La normalización para la eficiencia energética de productos y sistemas con consumos importantes de energía ha sido, en México y en las partes del mundo donde se ha aplicado, una medida de política pública de alta rentabilidad social, que permite al usuario de energía reducir sus costos de operación, al fabricante darle un valor agregado a sus productos, al país reducir sus necesidades de inversión en nueva infraestructura energética y, lo más importante, contribuir a la preservación de sus recursos naturales no renovables.

En México, la continuidad del esfuerzo de normalización para la eficiencia energética se sustenta en los significativos ahorros de energía que se han obtenido a través de las 18 normas en vigor y del gran potencial de ahorro existente, además del interés expreso de la industria nacional de seguir fabricando productos con el valor agregado de la eficiencia energética, lo cual les permite participar con ventaja en mercados internacionales altamente competitivos.

Bajo esta perspectiva, las actividades de la CONAE se orientarán a mantener actualizadas las normas vigentes de acuerdo al desarrollo tecnológico y atender las necesidades de nuevas normas; a promover y apoyar el desarrollo de la infraestructura necesaria para la evaluación de la conformidad de productos y sistemas con las NOM's de eficiencia energética; y a dar apoyo en los procesos de certificación y verificación con el objeto de lograr la cabal aplicación de las mismas.

Debemos mencionar que las normas referentes a la eficiencia energética están basadas principalmente en el sector eléctrico y por lo tanto los ahorros se reportan en la energía eléctrica en su mayoría, si existen normas para la eficiencia térmica y desde luego los ahorros correspondientes, pero estas son solo tres normas, dentro de las que se encuentran:

- NOM-002-ENER-1995 Calderas paquete
- NOM-009-ENER-1995 Aislamientos térmicos industriales
- NOM-012-ENER-1996 Calderas de baja capacidad

El esfuerzo que se tiene que realizar con la expedición de diversas normas oficiales mexicanas, cuya finalidad es la preservación y uso racional de los recursos energéticos, debe contemplar también los equipos de ahorro de energía podemos observar estas estimaciones de ahorros tanto en energía eléctrica como en energía térmica en las tablas que se incluyen en el Anexo I.

### 2.3.8 Cogeneración.

Los sistemas de cogeneración permiten generar simultáneamente energía eléctrica y térmica a partir de una misma fuente energética. Esto conlleva un incremento en la eficiencia global del uso de combustibles del 35 hasta el 85 por ciento con respecto a los sistemas que suministran energía eléctrica y térmica por separado. La instalación masiva de estos sistemas permitiría aliviar en gran medida los problemas de falta de capacidad en la oferta que enfrenta la industria eléctrica nacional.

Por otra parte, la cogeneración representa una oportunidad de modernización de la planta industrial, así como una alternativa viable a los usuarios para satisfacer sus necesidades energéticas con una mayor rentabilidad, confiabilidad y calidad de la energía eléctrica.

En 1995, la CONAE analizó el potencial nacional de cogeneración, el cual se ubicó entre 7,500 y 14,000 MW, dependiendo del tipo de esquema de cogeneración empleado. Cerca del 70 por ciento de esta capacidad se presenta en el sector industrial, 20 por ciento en instalaciones de PEMEX Petroquímica y 10 por ciento en el sector comercial.



Si bien la cogeneración es permitida en México desde 1992, existen limitaciones legales que fijan, a un nivel poco atractivo para los posibles inversionistas, el precio de compra de la energía eléctrica excedente, además de que su compra está sujeta a las reglas de despacho de carga establecidas por las empresas eléctricas públicas.

### 2.3.9 Energías Renovables.

Con el aprovechamiento de las energías renovables se obtiene un conjunto significativo de beneficios para la sociedad. De manera fundamental, la conservación de recursos energéticos no renovables es, por su impacto generacional, el más importante. Por otra parte, el aprovechamiento del gran potencial en México de estas energías traería como resultado la diversificación de la oferta energética del país, una atenuación considerable de impactos sobre el medio ambiente, una posible detonación de actividad económica en la manufactura, instalación y operación de estos sistemas, y el aprovechamiento de una base tecnológica nacional que ha venido operando y desarrollándose a lo largo de los últimos 25 años. Igualmente, las energías renovables pueden jugar un papel primordial para el desarrollo de comunidades aisladas de nuestro país donde estos sistemas resultan más económicos que la conexión a la red nacional.

Para que se aprovechen estos beneficios, la CONAE se abocará a impulsar el desarrollo tecnológico nacional, a promover la adecuación y adopción de los avances tecnológicos internacionales en la materia, a integrar elementos de sustento de políticas y mecanismos de promoción de estas tecnologías, a apoyar en el diseño e implantación de programas que faciliten la adquisición de estos equipos y sistemas, además de informar a la población en general de los beneficios individuales y colectivos del aprovechamiento de las energías renovables.

### 2.3.10 Transporte.

El transporte de personas y mercancías consume más del 40 por ciento del total de la energía de uso final en México y, en los últimos años, ha registrado tasas de crecimiento significativas. Este consumo, particularmente de gasolina y diesel, es utilizado en condiciones tales que existe una gran oportunidad de ahorro de energía y que además, al ser aprovechado de manera óptima, permitiría reducir en forma importante la emisión de contaminantes en las ciudades.

Por otra parte, las políticas y acciones para el uso eficiente de energía en el transporte se enfrentan a otras necesidades individuales y colectivas más apremiantes, como la seguridad, calidad, economía y oportunidad en el movimiento de personas y mercancías. Igualmente, muchas de las políticas que permiten una mejora en los índices globales de eficiencia energética en el transporte requieren de grandes inversiones y de acciones de largo plazo, como la mejora en combustibles y en vehículos, la instalación de infraestructura de soporte (Por ejemplo: suministro de energéticos, caminos y señalizaciones) y, finalmente, en el ordenamiento de los grandes asentamientos humanos.

Por lo tanto, el objetivo de las acciones de la CONAE en este sector es el de propiciar que en México se cuente con sistemas de transporte energéticamente eficientes, tanto de personas como de bienes.

La Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) es un órgano administrativo descentralizado de la Secretaría de Energía, que goza de autonomía técnica y operativa.

La CONAE tiene por objeto fungir como órgano técnico de consulta de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, así como, de los gobiernos de las entidades federativas, de los municipios y de los particulares, en materia de ahorro y uso eficiente de la energía y de aprovechamiento de energías renovables.

#### **2.4 Dirección del Sector Energético**

La Dirección del Sector Energético opera desarrollando proyectos bajo los esquemas previos de intervención de la CONAE en instalaciones, pero al mismo tiempo establecerá las bases para operar como soporte técnico a proyectos que se desarrollen con mayor participación de los operadores de las instalaciones.

El programa de "Gases de desfogue y residuales" esta enfocado a evaluar el potencial de aprovechamiento térmico de gases de desfogue y residuales de relevo a quemadores, así como al análisis de la viabilidad de implementar sistemas de cogeneración; el programa de "Calentadores de proceso y tecnologías de eficiencia energética" analizará calentadores a fuego directo y sistemas de intercambio térmico y abarcará la implantación de una metodología de evaluación que permitirá abordar un mayor número de instalaciones; el programa de "Sistemas eléctricos" esta enfocado a la optimización de dichos sistemas, tanto en instalaciones de proceso de Petróleos Mexicanos como de generación de la Comisión Federal de Electricidad, incluyendo la implantación de metodologías; y finalmente, el programa de "Vapor, condensados y agua de enfriamiento" esta orientado a servicios relacionados directamente con la función de producción y a sistemas altamente consumidores de energía en plantas industriales de PEMEX y CFE, también incluyendo la implantación de metodologías. Dentro de los proyectos que tiene CONAE para la utilización de los gases de desfogue y de combustión a la salida se tienen los siguientes:

<b>Coordinación: Técnica.</b>	<b>Dirección: Sector Energético</b>
<b>Programa : Gases de Desfogue y Residuales</b>	<b>Clave: TS1</b>
<b>Descripción:</b> Estudio de ingeniería conceptual, análisis técnico y económico para evaluar el potencial de aprovechamiento térmico de gases de desfogue y residuales de relevo a quemadores. Se realizarán análisis de cogeneración en las instalaciones que permitan incluir esta alternativa. El programa contempla el seguimiento y evaluación del impacto energético derivado de la implantación de medidas recomendadas en los proyectos realizados.	

**Proyectos:**

Pemex Petroquímica, Complejo Petroquímico Escolín, Poza Rica, Ver.  
Pemex Petroquímica, Complejo Petroquímico Pajaritos, Coatzacoalcos, Ver.  
Pemex Refinación, Refinería Francisco I. Madero, Cd. Madero, Tamps.  
Pemex Exploración y Producción, Región Marina Noreste.  
Pemex Exploración y Producción, Región Marina Suroeste.  
Pemex Exploración y Producción, Región Sur.  
Pemex Refinación, Refinería Miguel Hidalgo, Tula, Hgo.  
Pemex Exploración y Producción, Región Norte.

**2.4.1 Logros alcanzados en PEMEX en ahorro de energía.**

Por todo lo que representa PEMEX para el país es importante observar sus logros en el tema. Con la creación del Comité de Ahorro de Energía y PEMEX-CONAE a finales de 1994, que incluye al corporativo y a las cuatro subsidiarias, se ha trabajado en medio centenar de proyectos, en particular sobre equipos como los calentadores a fuego directo, los sistemas de enfriamiento, el aprovechamiento de gases de desfogue, la recuperación de condensados y los sistemas de alumbrado exterior e interior. "Por ejemplo, a partir de una análisis sumamente detallado en la refinería de Tula, hemos generado una metodología muy simple para que los operadores sepan en qué medida pueden aprovechar la energía en estas instalaciones. Este tipo de estudio nos amplía las experiencias para luego llevarlas hacia el sector privado.<sup>5</sup>

También PEMEX trabajó en un proyecto con la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos, en lo que se llama generación y distribución de vapor. En 37 empresas analizamos al detalle alrededor de 70 calderas de diversas dimensiones y probó una metodología que ha propiciado, en algunos casos, hacer ajustes e instaurar medidas operativas mediante las cuales ya se ahorra energía. Se laboró en hoteles, en una papelería, en pequeñas industrias, con calderas de grandes, medianos y pequeños tamaños, y se analizó el proceso de combustión, los sistemas de tubos en explotación, si son aislados, las trampas de vapor donde se pierde agua, etc.

Algunas empresas requieren de inversión para subsanar ciertos problemas, pero no siempre representan montos sustanciales, pues quizá basta con comprar aislamiento para las tuberías para lograr un ahorro notorio. Por supuesto, en algunos casos se deben cambiar las calderas y eso implica exigencias mayores.

<sup>5</sup> [www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones](http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones).

En comparación con otros países, de América del Norte y Latinoamérica, Odon de Buen considera que, "No estamos tan mal, aunque hay muchísimo por hacer. Hablamos de un potencial de ahorro de energía de 20% y si se cotiza el barril de petróleo a 10 dólares, ese 20% significa mil millones de dólares al año. Y no sólo se trata de dinero, sino de contaminación. Claro está, el consumo de energía ocurre en infinidad de puntos, donde el ahorro o el desperdicio dependen de un sinnúmero de decisiones cotidianas que se toman al apagar y encender equipos. También hay decisiones de compra y de cambio de equipos, y eso nos plantea un reto en cuanto a estrategia, pues no es lo mismo tomar una decisión en una gigantesca planta de acero, en un solo lugar, que convencer a millones de personas en sus acciones diarias".

Odón de Buen agrega "En normalización no nos hallamos muy rezagados de Estados Unidos y, realmente, en América Latina no cuentan con nuestro nivel de actividades y con su alcance. Además, somos de los pocos países con una institución estatal como CONAE, dedicada a la actividad, aparte de que no sólo realizamos estudios, sino que impulsamos programas concretos, pues el mayor problema no es que exista o no el dinero para financiamiento, sino poner sobre la mesa proyectos financiables".

En materia de ahorro de energía en el año 1998 se realizaron diagnósticos energéticos y recomendaciones para la modernización y ahorro de gas en hornos, al tiempo que se desarrollan proyectos de diagnóstico energético en calentadores a fuego directo, de optimización y uso racional del agua de enfriamiento; en Petróleos Mexicanos esta el aprovechamiento térmico de gases de desfogue y de optimización en el sistema de distribución de vapor y retorno de condensados.<sup>6</sup>

En el marco de la "Campaña SIASPA de ahorro de energía y protección ambiental" puesta en marcha en agosto de 1999 en todas las áreas operativas de los Organismos de Petróleos Mexicanos, PEMEX Gas y Petroquímica Básica calcularon los índices de consumo de energía de sus centros de trabajo con el objeto de detectar aquellos que durante el año lograron consumir un menor volumen de energía respecto a los de 1998 y aquellos en los que existen áreas de oportunidad para reducir este consumo. Los resultados de la evaluación indican que del total de 36 centros de trabajo, 20 redujeron su consumo de energía y 16 lo incrementaron. Entre los que consumieron menos energía se incluyen 17 centros de trabajo, que lo hicieron en un rango mayor de 5.0% que se fijó como meta; estos centros fueron dos Centros Procesadores de gas, siete Sectores de ductos y ocho Terminales de gas licuado.<sup>7</sup>

<sup>6</sup> Memoria de labores PEMEX 1998.

<sup>7</sup> Memoria de labores PEMEX 1999.

CAPÍTULO III.  
ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE RECUPERADORES DE CALOR

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE RECUPERADORES DE CALOR.

Hasta ahora solo hemos mencionado los beneficios y las condiciones que deben tenerse para el empleo de un sistema o equipo de recuperación de calor, sin embargo, se tiene que conocer cuales son los medios que nos permitirán llevar a cabo el ahorro de energía, podemos empezar con la recuperación de calor la cual puede dividirse dentro de tres categorías:<sup>1</sup>

### Recuperación directa:

La recuperación directa ocurre con modificaciones completas del mismo sistema de calentamiento, la temperatura de los gases de combustión a la salida es pequeña.

### Recuperación indirecta:

La recuperación indirecta toma lugar cuando los gases de combustión a la salida se utilizan para precalentar algo lo cual entra al sistema de calentamiento. Esto puede ser, aire de combustión, combustible o el material puede ser precalentado en el sistema de calentamiento.

### Recuperación secundaria:

La recuperación secundaria utiliza los gases de combustión a la salida para precalentar un medio externo. Un buen ejemplo puede ser la generación de vapor.

El método más económico y eficiente de recuperación indirecta es el precalentamiento de aire de combustión por lo que es el método en que está basado el estudio de los recuperadores de calor. Nos enfocaremos principalmente en los equipos de recuperación indirecta ya que nos brinda los medios para bajar más el consumo de combustible, y también nos da ciertas oportunidades para mejorar las condiciones de combustión.

### *Recuperación indirecta.*

La recuperación indirecta emplea medias y altas temperaturas, la recuperación de calor por temperaturas bajas es usada para calentamiento de espacios. La recuperación indirecta puede ser llevada a cabo por medio de recuperadores o regeneradores.

Un recuperador de calor es un cambiador de calor que recupera el calor de desperdicio de los gases de combustión a la salida de un horno para calentar el aire de entrada empleado en dicha combustión. Este es el nombre que se usa en las industrias del acero y en la manufactura del vidrio, en esta mismas industrias podemos diferenciar un regenerador el cual se refiere a dos cámaras rellenas de un material (con una conductividad térmica alta) acomodado dejando huecos que alternativamente absorben calor igualmente de los gases de combustión a la salida de un horno y luego entrega parte de ese calor al aire de entrada.

<sup>1</sup> Industrial Heating Equipment Association. Combustion technology manual. 5th edition.

Dicho de otra manera en los regeneradores la superficie es calentada primero y entonces el medio puede ser precalentado pasando alternativamente sobre una misma superficie. Esta superficie es un material que almacena calor, el cual absorbe alternativamente calor desde las corrientes más calientes y regresándolo a la corriente más fría. Consecuentemente la transferencia de calor en un regenerador es más bien un proceso cíclico (transitorio) que un proceso continuo (estado constante) como en un recuperador.

Sin embargo debe señalarse que aunque sus funciones son similares, los dos cambiadores de calor mencionados pueden ser bastante diferentes estructuralmente, al igual que difieren en sus modos de transferencia de calor. Los precalentamiento máximos son dictados por la temperatura límite de las superficies calentadas por ellos mismos.

Con respecto a los tipos de materiales usados para las superficies de calentamiento los materiales metálicos y cerámicas comprenden las dos categorías mayores. Las ventajas de las superficies metálicas incluyen alta conductividad térmica (correspondientemente un alto porcentaje de transferencia de calor) resistencia a la fractura por algunos impactos o choque térmico y relativamente peso y costo bajo.

Las superficies cerámicas ofrecen mejor resistencia a dañarse por altas temperaturas o corrosión y están sujetas a menor expansión térmica una consideración importante en el diseño estructural.

Algunas aplicaciones típicas de los recuperadores se encuentran en hornos de tratamiento de recocido, hornos de fusión, posquemadores e incineradores de gas, quemadores de tubo radiante, hornos de recalentamiento y otras aplicaciones de recuperación de calor de desperdicio en el rango de temperatura media alta.

Las especificaciones de un cambiador industrial de calor debe incluir la capacidad de intercambio de calor, las temperaturas de los fluidos, la caída de presión permisible en cada una de las trayectorias de los fluidos y las propiedades y flujo volumétrico de los fluidos que entran al cambiador. Estas especificaciones determinarán los parámetros de construcción y en consecuencia el costo del cambiador de calor. El diseño final será una solución intermedia entre los factores de caída de presión, efectividad del cambiador de calor y costo. Las decisiones que lleven al diseño final balancearán el costo de mantenimiento y de operación de todo un sistema contra los costos fijos, de tal manera que el total sea el mínimo posible.

Los parámetros esenciales que deben conocerse para hacer la selección óptima de los dispositivos de recuperación de calor de desperdicio, es decir, los gases de combustión a la salida son:

- Temperatura de los gases de combustión a la salida.
- Régimen de flujo de calor de los gases de combustión a la salida.
- Composición química de los gases de combustión a la salida.
- Mínima temperatura permisible de los gases de combustión a la salida.
- Temperatura del fluido calentado.

- Composición química del fluido calentado.
- Máxima temperatura permisible del fluido calentado.
- Temperatura de control, si se requiere este control.

Aunque el uso de recuperadores conserva combustible en los hornos industriales y aún cuando su costo es relativamente modesto, la compra de la unidad con frecuencia es solo el principio de un programa de inversiones más extenso para mejoras. El uso de un recuperador eleva la temperatura de entrada, puede requerir la compra de quemadores de alta temperatura, líneas de aire de mayor diámetro con aditamentos flexibles para permitir la expansión, líneas de aire frío para enfriar los quemadores, modificación en los controles de combustión para mantener la relación requerida aire/combustible independientemente de que haya calentamiento variable del recuperador, controles de tiro de chimenea, controles para proteger el recuperador durante la falla de ventilador o falla de alimentación de potencia y ventiladores más grandes para contrarrestar la caída adicional de presión en el recuperador contra daño debido a temperaturas excesivas, ya que el costo de reconstrucción del recuperador dañado puede ascender hasta a 90% del costo inicial de manufactura y la reducción en la eficiencia de un recuperador dañado fácilmente aumenta los costos de combustible entre un 10 a 15%.

### **3. Tipos de recuperadores.<sup>2</sup>**

La siguiente clasificación que debemos hacer es la de los recuperadores de calor, una forma adecuada será conociendo primero el tipo de recuperador de acuerdo a su modo de transferencia de calor, posteriormente la forma en que se desplazan los flujos dentro del recuperador, y por último el número de pasos que pueden tener los recuperadores.

#### **3.1 Clasificación de acuerdo a la forma de transferencia de calor.**

##### **3.1.1 Recuperadores de calor por radiación.<sup>3</sup>**

En estos recuperadores la transferencia de calor entre el fluido primario y el secundario se realiza principalmente por radiación.

Este tipo de intercambio está favorecido fuertemente por la temperatura, de tal manera que estos recuperadores son especialmente indicados en los siguientes casos:

- Cuando la temperatura de los gases de salida es superior a 1000-1050°C.
- Cuando los componentes de los gases de salida son agresivos o contienen un alto porcentaje de partículas.

<sup>2</sup> <http://recuperators.com>

<sup>3</sup> [www.kalfrisa.com](http://www.kalfrisa.com)



La configuración más simple para un cambiador de calor es el recuperador metálico de radiación que consiste de dos tramos concéntricos de tubo de metal como se ilustra en la figura 3.1.

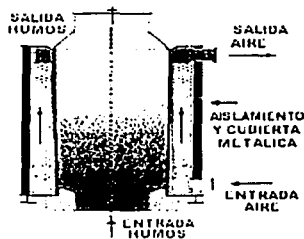


Figura 3.1.-Recuperador metálico.

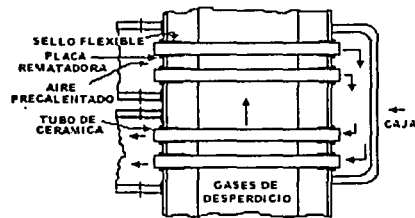


Figura 3.2.-Recuperador de cerámica.

El tubo interior conduce los gases calientes de salida en tanto que el anillo externo lleva el aire de combustión de la atmósfera a las entradas de aire de los quemadores del horno. Los gases calientes son enfriados por el aire de combustión entrante que ahora lleva energía adicional a la cámara de combustión. Esta energía que no necesita ser suministrada por el combustible; en consecuencia para una carga específica del horno se requiere quemar menos combustible. Este recuperador particular toma su nombre del hecho de que una porción sustancial de la transferencia de calor de los gases calientes a la superficie del tubo interior tiene lugar por transferencia de calor radiactivo. El aire frío en el anillo, sin embargo, es casi transparente a la radiación infrarroja de manera que solo tiene lugar transferencia de calor por convección al aire de entrada.

Como lo muestra el diagrama, los dos gases fluyen en trayectorias generalmente paralelas, aunque la configuración más simple y la transferencia de calor más eficiente si los flujos se desplazaran en direcciones opuestas (contra flujo). La razón para el uso de flujo paralelo es que los recuperadores tienen frecuentemente la función adicional de enfriar el ducto de salida de los gases de escape y extendiendo en consecuencia la vida útil.

Con frecuencia el tubo interior está construido con materiales de alta temperatura, como por ejemplo aceros inoxidables de alto contenido de níquel. La gran diferencia de las temperaturas en la entrada produce expansiones diferenciales, ya que la cubierta exterior está generalmente hecha de materiales diferentes con frecuencia más baratos. El diseño mecánico debe tomar en consideración este efecto.

Otros diseños más elaborados de los recuperadores de radiación, incorporan dos secciones; la inferior que opera en flujo paralelo y la superior que usa la disposición más eficiente de contra flujo. Debido a las considerables expansiones axiales experimentadas y a las condiciones de esfuerzos en la parte inferior del recuperador, la unidad está soportada frecuentemente de la parte superior por medio de un marco de soporte en pedestal con una junta de expansión entre el horno y el recuperador.

La limitación principal en la recuperación de calor en los recuperadores de metal es la reducción en la vida del revestimiento a temperaturas de entrada superiores a 2000°F

(1093°C). A esta temperatura, es necesario usar la disposición menos eficiente de flujos paralelos de los gases de salida y para mantener el enfriamiento suficiente en la cubierta interior. Además, cuando el flujo de aire de combustión del horno se reduce debido a reducción en la carga, el régimen de transferencia de calor de los gases calientes de desperdicio al aire de combustión a precalentar se vuelve excesiva lo que causa un rápido deterioro de la superficie. Es necesario entonces, generalmente suministrar una derivación de aire ambiente para enfriar los gases de salida.

Con el objeto de vencer las limitaciones de temperatura que presentan los recuperadores de metal, se han desarrollado recuperadores de tubos de cerámica, cuyos materiales permiten la operación hasta 2800°F (1538°C), en el lado del gas y 2200 °F (1204°C), en el lado de aire precalentado y a solo 1500 °F (815°C), en una forma más o menos práctica. Los primeros recuperadores de cerámica se construían de mosaico y eran juntados con cemento refractario, pero después esto ocasionaba agrietamiento en las juntas y el rápido deterioro de los tubos. Desarrollos posteriores introdujeron varias clases de tubos cortos de carburo de silicio que pueden unirse mediante sellos flexibles localizados en los distribuidores de aire figura 3.2 mantiene los sellos a temperaturas relativamente bajas y ha reducido los regimenes de fugas en los sellos a un pequeño porcentaje.

Los primeros diseños habían experimentado fugas que iban de 8 a 60%. Los diseños posteriores presentaban un porcentaje más bajo y con temperaturas de precalentamiento hasta de 1300 °F.

#### *Tipo doble camisa.*

Fabricados mediante dos cilindros concéntricos en los que el fluido secundario circula a través de la corona circular, paralelamente al eje del recuperador o helicoidalmente, en contracorriente o en flujos paralelos.

Están disponibles para presiones de trabajo de hasta 2000 mm H<sub>2</sub>O<sub>m</sub> (manométricas), debido a la baja resistencia mecánica de la camisa interior a las elevadas temperaturas de trabajo.

Sus principales ventajas son las siguientes:

- Disminución del consumo de combustible, que en determinadas circunstancias puede superar el 40%, por precalentamiento del aire de combustión.
- Ausencia de pérdidas de presión en los humos como consecuencia del diseño geométrico de este tipo de recuperadores.
- Diseño compacto que facilita su instalación en la chimenea de humos.

Este tipo de recuperadores son indicados en hornos de forja de la industria siderúrgica, hornos de fusión, hornos de vidrio, hornos de aluminio, etc.



Figura 3.3.-Recuperador de radiación de cesta de tubos operando a 1.200°C.

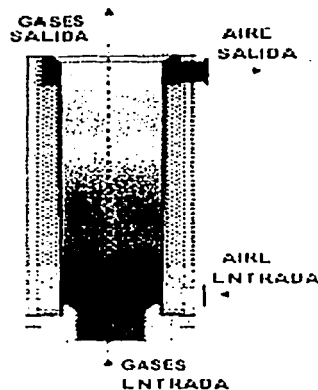


Figura 3.4.-Recuperador de radiación de doble camisa.

*Tipos cesta de tubos.*

En estos recuperadores se sustituye la camisa interior por una cesta de tubos dispuestos anularmente, por la que circula el aire, de manera que la transferencia de calor sigue realizándose por radiación.

Entre sus principales ventajas estarían las siguientes:

- Mejor distribución del aire, que da como resultado una temperatura homogénea de los tubos de la cesta.
- Mayor resistencia a la corrosión, por una elección más adecuada del material.
- Mantenimiento idóneo, ya que el elemento de intercambio (cesta de tubos) es independiente del armazón.
- Mayores presiones de trabajo, que podrían llegar hasta 6000 mm H<sub>2</sub>O<sub>m</sub>.
- Este tipo de recuperadores se instala habitualmente en hornos de fusión de la industria del vidrio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

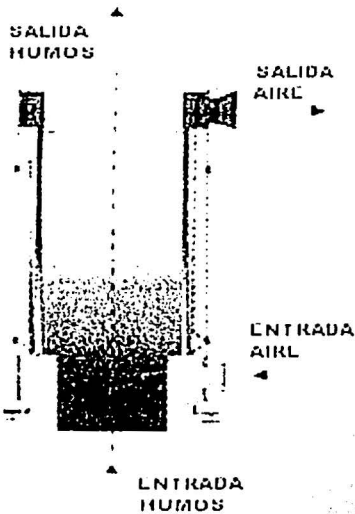


Figura 3.5.-Recuperador de radiación de cesta de tubos.

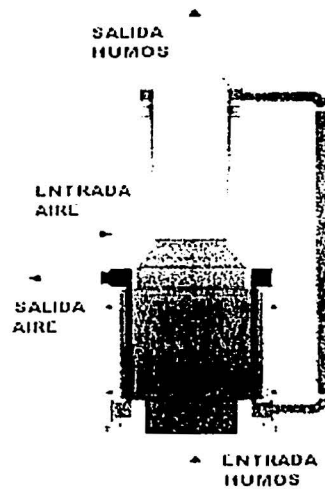


Figura 3.6.-Instalación constituida por un recuperador de cesta de tubos y un doble camisa, conectados entre sí en serie.

*Instalaciones mixtas.*

En aquellos casos en los que se pretende realizar un máximo aprovechamiento térmico de los gases de salida humos, desde luego siempre y cuando el diseño nos lo permita, (no existan ciertas restricciones) es aconsejable la utilización de instalaciones constituidas para dos o más recuperadores conectados en serie, como se puede apreciar en la figura 3.6.

Con este sistema se evita la instalación de un único recuperador de grandes dimensiones, lo que daría lugar a unos mayores problemas de funcionalidad y mantenimiento así como a un mayor costo en su fabricación.

Existe un gran número de posibilidades en función de las necesidades de los posibles usuarios de recuperadores, de acuerdo a las cuáles se pueden combinar distintos tipos y modelos de recuperadores.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

3.1.2 Recuperadores de calor por convección

Como indica su nombre, en estos recuperadores la transferencia de calor entre el fluido primario y el secundario se realiza fundamentalmente por convección. Comúnmente estos recuperadores recibe también el nombre de recuperadores de tipo de tubos. Como puede verse en el diagrama esquemático de la figura 3.7, los gases calientes son conducidos a través de numerosos tubos paralelos de pequeño diámetro, en tanto que el aire de entrada que debe calentarse entra a una cubierta que rodea al conjunto de tubos y pasa sobre los tubos calientes una o más veces, en dirección normal a sus ejes.

Entre sus principales ventajas estarían las siguientes:<sup>4</sup>

- Los recuperadores del tipo de cubierta y tubos son generalmente más compactos que los recuperadores por radiación.
- Tienen una efectividad más alta que los recuperadores de radiación, debido a la mayor área de transferencia de calor que se logra por medio del uso de tubos múltiples de los gases.

Se caracterizan por un contacto total entre los gases y los tubos que constituyen el recuperador, por lo que son especialmente indicados para los siguientes casos:

Para temperaturas de trabajo inferiores a 1000-1050°C.

Para corrientes gaseosas moderadamente limpias (ausentes de partículas) y sin componentes especialmente corrosivos.

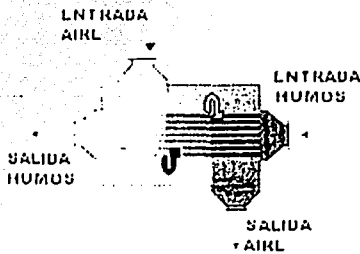


Figura 3.7.-Recuperador convectivo.

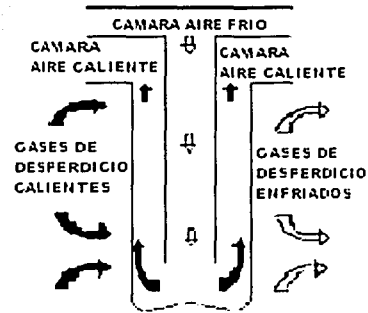


Figura 3.8.-Diagrama de un recuperador vertical de tubo en tubo.

Un dimensionamiento térmico exacto permite lograr la mejor relación entre la superficie de intercambio y la caída de presión, así como entre la superficie de intercambio y el espacio ocupado.

<sup>4</sup> www.kalfrisa.com/

La figura 3.8 ilustra esquemáticamente una disposición alternativa para el recuperador de tipo convectivo, en el cual el aire frío para combustión se calienta en un banco de tubos verticales paralelos que se extienden dentro de la corriente de gas de salida. La ventaja que se pretende con esta disposición es la facilidad de sustituir los tubos individuales, que puede hacerse durante la operación del horno a plena capacidad, lo que reduce al mínimo costo, la inconveniencia y posibles daños al horno debido a un paro forzado por la falla del recuperador.

Todo ello, junto con la consideración del riesgo de corrosión y el conocimiento de dónde van a ser ubicadas las instalaciones, garantiza el uso del equipo más adecuado a las necesidades de las industrias interesadas en los recuperadores. Además, la óptima selección de los materiales empleados asegura una durabilidad del equipo y una ventajosa relación calidad/precio/rendimiento.

*Tipo canal.*

Estos recuperadores pueden ser de dos tipos:

- Recuperadores de haces tubulares sueltos, para introducir en un canal de gases horizontal (subterráneo o aéreo) o vertical (chimenea).
- Recuperadores de haces tubulares con armazón revestido interiormente, para aquellos casos en los que no existe un canal de humos definido (horizontales o verticales).

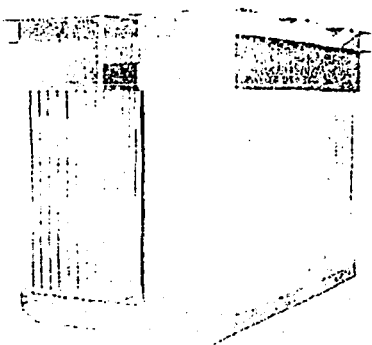


Figura 3.9.-Recuperador de convección tipo canal.

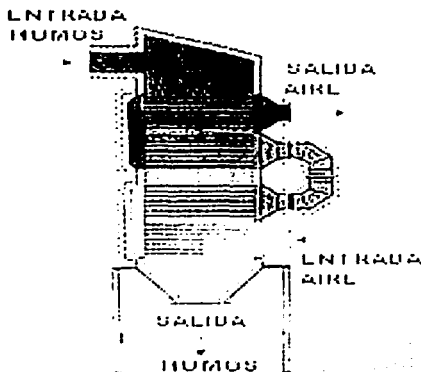


Figura 3.10.-Recuperador de cuatro haces con armazón. Humos verticales / Recuperador horizontal.

Entre su principal ventaja estaría la siguiente:

- Para aquellos casos en los que se pretende un máximo aprovechamiento térmico de los gases de salida, existe la posibilidad de buscar soluciones técnicas mediante la combinación de dos o más recuperadores, tanto en serie como en paralelo (instalaciones mixtas).

Este tipo de equipos son de especial aplicación en gran número de sectores industriales, como el siderúrgico (en hornos de recocido, de recalentamiento), el mineral (en hornos de calcinación y de tueste), en instalaciones de incineración y de secado de lodos procedentes de depuradoras, etc.

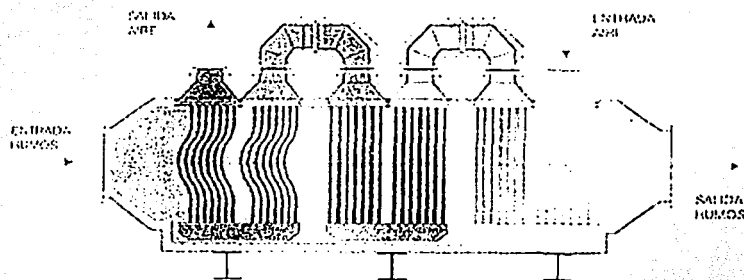


Figura 3.11.-Recuperador de seis haces tipo canal. Humos horizontales / Recuperador vertical.

### 3.1.3 Recuperadores mixtos de radiación-convección (tipo combinado).

Para tener la máxima efectividad en la transferencia de calor, se usan combinaciones de recuperadores del tipo de radiación y de convección, en las cuales el tipo convectivo siempre va después del recuperador de radiación a alta temperatura. Un diagrama de esta disposición puede verse en la figura 3.12.

Los recuperadores de calor tipo combinado constituyen una alternativa muy interesante a los recuperadores de radiación tipo doble camisa y tipo cesta de tubos, porque su sistema térmico doble les proporciona una gran superficie de intercambio en un mínimo espacio ocupado.

Estos equipos están constituidos por una doble camisa y un haz tubular, ubicado en el interior del recuperador, de tal manera que el fluido secundario en un caso circula a corrientes paralelas y en otro a contracorriente o viceversa.

Al circular el fluido secundario así y como se ha indicado anteriormente, se consigue que la temperatura media logarítmica sea mayor y por tanto que la superficie de intercambio necesaria para un determinado rendimiento térmico sea menor.

Así, estos equipos se caracterizan por su menor tamaño, en comparación con otro tipo de recuperadores, para un mismo rendimiento térmico.

En la doble camisa el intercambio de calor se realiza fundamentalmente por radiación mientras que en el haz tubular, debido a la disposición de los tubos, el intercambio se realiza tanto por radiación como por convección.

Entre sus principales ventajas estarían las siguientes:

- La principal ventaja de este tipo de recuperador es su alta capacidad de intercambio de calor como consecuencia de su sistema térmico doble e inverso, que permite obtener temperaturas de precalentamiento altas aún cuando los gases no estén muy calientes, con caídas de presión en el circuito de gases prácticamente nulas.

Otras ventajas, aparte de la ya indicada, son las siguientes:

- Diseño compacto que facilita su instalación.
- Menores requerimientos de espacio en comparación con otros tipos de recuperadores.

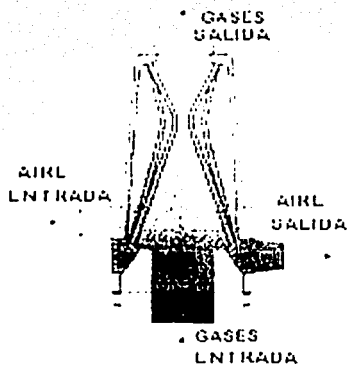


Figura 3.12.-Recuperador mixto tipo combinado.

Campo de aplicación.

Este tipo de recuperadores son especialmente indicados en los siguientes casos:

- Hornos de forja.
- Hornos de tratamiento.
- Plantas de incineración de residuos sólidos.
- Instalaciones de la industria química en general.



Capacidades y modelos.

Los recuperadores del tipo combinado pueden trabajar con temperaturas de humos de hasta 1300°C y temperaturas de precalentamiento del aire de hasta 650°C.

Se han construido equipos para precalentar caudales de aire entre 300 y 32.000 Nm<sup>3</sup>/h, aunque bajo determinadas condiciones se podría llegar hasta 50.000 Nm<sup>3</sup>/h por equipo.

Para equipos pequeños el haz tubular interior es de una sola fila de tubos y con una única curvatura, mientras que para equipos de mayores dimensiones el haz tubular es doble o triple y los tubos disponen de doble curvatura.

En la mayoría de los casos no es necesario utilizar compensadores para absorber las dilataciones eventuales, aunque existe la posibilidad de instalarlos en la camisa interior o exterior del recuperador.

En función de los datos del rendimiento térmico deseado, etc., los colectores de entrada y de salida del aire estarán próximos a la entrada o a la salida de humos.

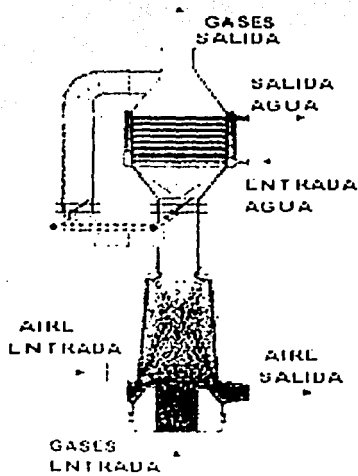


Figura 3.13.-Recuperador combinado con aprovechamiento posterior de los gases mediante intercambiador de agua y by-pass.

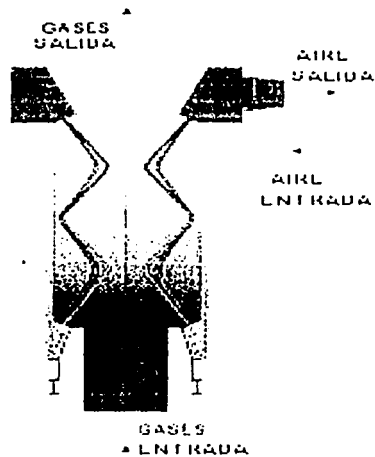


Figura 3.14.-Diseño especial de un recuperador combinado con haz tubular y curvatura doble.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

3.2 Clasificación de acuerdo al tipo de flujo.<sup>5</sup>

Los cambiadores de calor se diseñan para transferir calor a partir de un flujo de un medio a otro. En un recuperador, esto ocurre sin el almacenaje del calor en un material en el interior del equipo (figura 3.15). Un recuperador es preferible para procesos muy grandes.

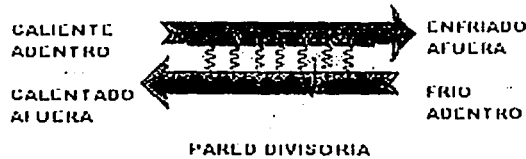


Figura 3.15.-Esquema de intercambio de calor en recuperadores.

Una forma muy importante para clasificar los recuperadores que debe considerarse, es la manera en la cual se va a transferirse el calor entre los materiales involucrados (desde el punto de vista de cómo se desplazarán dentro del recuperador). Un recuperador se puede categorizar como flujo paralelo, flujo cruzado y a contracorriente. El contra flujo es usado en la mayoría de los casos porque es fundamentalmente superior al flujo paralelo en el mecanismo de transferencia de calor.

Las mismas formas de recuperadores construidos son básicamente adecuados tanto para el flujo paralelo como a contracorriente. Esto es porque las diferencias entre ambos tipos de flujo son solo por el tamaño de la superficie de transferencia de calor evidentemente, o en resultados diferentes numéricamente en los cálculos de transferencia de calor. Aún cuando se hable solamente de las formas de operación de los recuperadores a contra flujo, está sobre discusión podrá ser aplicada directamente a los recuperadores de flujo paralelo.

3.2.1 Recuperador de flujo paralelo.

En un recuperador de flujo paralelo, los flujos de los gases son separados por las paredes de división del recuperador y se mueven en la misma dirección. Si idealmente tuviéramos una pared extremadamente larga (para un intercambio de calor completo) y que el la carga térmica de los flujos fuera la misma a la salida de ambos, las temperaturas de la salida de ambos flujos serán iguales a la mitad de las temperaturas de la entrada.

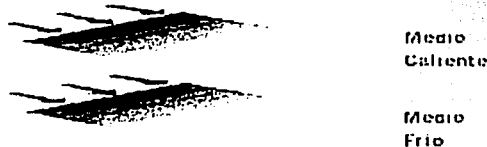


Figura 3.16.-Esquema de flujo paralelo.

<sup>5</sup> Transfer of heat equipment- Cross- flow.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La eficiencia de un recuperador se define como la relación de transformación entre la diferencia de la temperatura en uno de los flujos (el más grande cuando los flujos en la carga térmica no son iguales) y la de las temperaturas de la entrada. La eficiencia de un recuperador del flujo paralelo nunca puede, por lo tanto, estar más arriba del 50 %.

### 3.2.2 Recuperadores de flujo cruzado.

En este caso, la geometría crea un cambio en temperatura en los flujos a la salida a través del ancho del conducto del recuperador pero esa diferencia de temperaturas máxima tampoco puede alcanzarse con este arreglo. Por consiguiente, en flujos con igual carga térmica a la salida, la eficiencia en flujo cruzado el recuperador se limita a un 75 % aproximadamente. Pero la velocidad extensión del fluido (es decir como se va desplazando dentro de la placa) no es uniforme entre placas y es una razón por la que la eficiencia suele ser generalmente entre 40 y 60 % en la práctica.

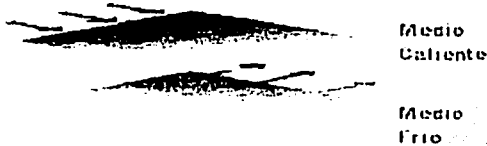


Figura 3.17.-Esquema de flujo cruzado.

### 3.2.3 Recuperadores de flujo a contracorriente.

Para recuperar el máximo de calor, es importante que los dos flujos, los cuales son separados por una pared en el recuperador, pasen en direcciones opuestas y que los flujos en sus carga térmicas sea igual en la medida de lo posible al final de la transferencia de calor.

Si se resuelven estas condiciones, la diferencia de temperatura entre ambos flujos es aproximadamente igual a través del recuperador. Si la pared de división es adecuada, esta diferencia es mínima. La temperatura del flujo saliente de un medio puede ser casi idéntica a la del flujo de entrada del otro medio. Esto se conoce como recuperación a contracorriente.

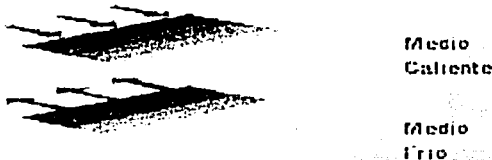


Figura 3.18.-Esquema de flujo a contracorriente

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El concepto de contra flujo o contracorriente fue llevado a cabo primeramente en hornos usados para materiales cerámicos tales como ladrillos. Aquí la propuesta de transferencia de calor a contra flujo es precalentar el material que es usado para llevar a cabo la combustión (aire de combustión) y usar los gases de salida que escaparon de la zona de combustión del horno.

El primer recuperador de calor como tal surgió de la idea de hacer pasar través de una pared de ladrillos el calor contenido de los gases de combustión desperdiciados, al aire fresco u otros gases. Un arreglo de interés consistió primero en dirigir los gases de desperdicio y aire a través paredes lisas estando adyacentes unas con otras, los cuales pueden construirse fácilmente con simples ladrillos. Los recuperadores de este tipo son usados actualmente en hornos para propósitos industriales, por ejemplo para precalentamiento de bloques metálicos. Frecuentemente las paredes horizontales y verticales son arregladas como en la figura para forzar un movimiento del gas de zig-zag dentro del recuperador.

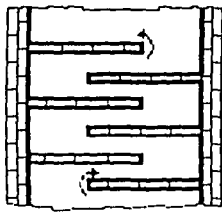


Figura.-3.19.-Recuperador de ladrillos.

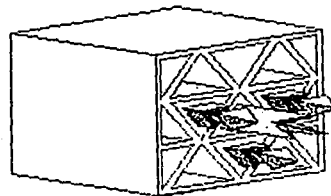


Figura.-3.20.-Ducto recuperador a contraflujo.

En los recuperadores en algunos casos no es fácil tener un alto nivel de efectividad en un volumen limitado, puesto que la conductividad térmica de los gases y la capacidad térmica por volumen son bajas en ambos casos. Se puede realizar el traspaso térmico usando dos métodos: incrementando el intercambio en la mayor parte de los flujos alargando la superficie e incrementando el tamaño de la superficie de intercambio de calor.

La intensificación del intercambio de un medio en la mayor parte del flujo a lo largo de la superficie de transferencia de calor es dando vuelta al flujo con los deflectores o cerciorándose del flujo es turbulento lo que puede mejorar el intercambio del calor, pero también da lugar a la mayor caída de presión.

El tamaño de la superficie de transferencia de calor puede ser aumentada agregando aletas o dividiendo los conductos, esto crea una mayor superficie de intercambio de calor en el mismo volumen de espacio. La adición de aletas a la superficie requiere una cantidad relativamente grande de material con las buenas características térmicas de la conductividad. La ventaja de distribuir los flujos sobre una serie de conductos es que la superficie crece en proporción con la raíz cuadrada al número de conductos y que el flujo se puede mantener en flujo laminar, restringiendo la caída de presión y contaminación.

El coeficiente de transferencia de calor en flujos laminares es proporcional al diámetro del conducto o a la raíz cuadrada del número de conductos, de modo que la capacidad total del traspaso térmico sea proporcional al número de conductos, mientras que la caída de presión es también proporcional al número de conductos.

Los recuperadores de contracorriente se han diseñado siempre como cambiadores de placas. El traspaso térmico puede ser mejorado mucho mediante el trabajo con conductos en lugar de las placas. Varias patentes han sido adquiridas recientemente, referentes a ciertas geometrías. La empresa Kemenade<sup>6</sup> emplea la siguiente geometría cada conducto es rodeado por una serie de mini-conductos en los cuales la dirección del flujo es en orden inverso de unos mini-conductos con respecto a los otros (figura 3.20).

### 3.2.4 Combinación de flujos.

El flujo cruzado es usualmente combinado con el flujo paralelo o contraflujo, más bien que el uso del flujo cruzado simple. Arreglos de este tipo son conocidos como flujo cruzado con dos tres o más pasos múltiples a contraflujo/ flujo paralelo.

La combinación más completa de flujo cruzado y contraflujo se encuentra en un cambiador de calor de flujo contra cruzado el cual es totalmente construido de tubos, pero es desarrollado para tecnologías de baja temperatura.

#### *Comparación entre flujo paralelo contraflujo y flujo cruzado.*

En la figura 3.21 La eficiencia  $\eta_r$  para flujo paralelo contraflujo y flujo cruzado mostrada como función de  $kA_{TC}/C_p$ , donde  $k$  es el coeficiente de transferencia de calor del recuperador,  $A_{TC}$  es área de transferencia de calor y  $C_p$  la capacidad calorífica del material del recuperador.

Ordenados para una comparación efectiva de estos tres tipos de flujo. La gráfica 3.21 confirma el resultado de la cuestión acerca de que para un valor dado de  $kA_{TC}/C_p$  el contraflujo será siempre, el modo más favorable de operación de transferencia de calor. Sin embargo también podemos realizar una comparación como el flujo cruzado contra el flujo paralelo, esto comienza cuando observamos que cuando la eficiencia tiende a 1, por un incremento en el valor de  $kA_{TC}/C_p$ , para el rango de convergencia en el flujo paralelo esta muy abajo del caso de contraflujo.

<sup>6</sup> www.wtb.tue.nl

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

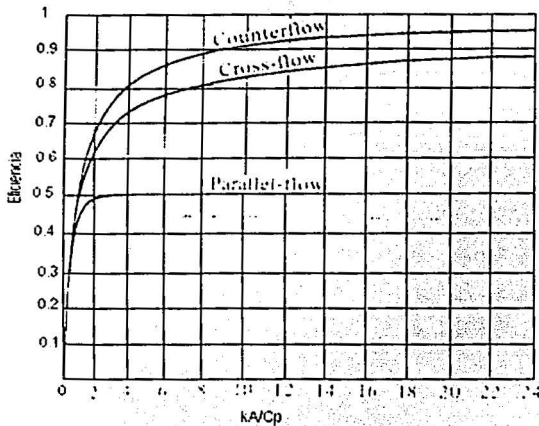


Diagrama 3.21.- Eficiencia de un recuperador ( $\eta_r$ ) de calor en flujo paralelo contraflujo y flujo cruzado.

El hecho es que existe una diferencia considerable entre el flujo paralelo y los otros dos, por ejemplo para una eficiencia del 90% de los valores de  $kA_{TC}/Cp$  puede ser tres veces más grande para el flujo cruzado que para el contraflujo, por lo tanto cuando especificamos los valores de  $k$  y  $Cp$ , y el área de transferencia  $A_{TC}$  pueden ser tres veces más grandes para el flujo cruzado. Los tubos ensamblados nos dicen que en la práctica estas diferencias son pequeñas, y que los coeficientes de transferencia de calor más altos se dan del lado exterior de los tubos en el flujo cruzado que para el flujo paralelo.

Pero esto no quiere decir que solo existan recuperadores de contraflujo por el hecho de que presentan una mejor eficiencia, de ser así el análisis de los recuperadores de calor no tendría sentido, incluso de ningún equipo de intercambio de calor, la respuesta es que no solo la eficiencia marcará cual es el recuperador que necesitamos sino será una serie de factores (térmicos, mecánicos, económicos,) lo que nos permitirá la elección del intercambiador más adecuado de acuerdo a las necesidades de cada instalación.

*Flujo cruzado combinado con flujo paralelo.*

Cuando se presenta el flujo cruzado combinado con flujo paralelo en un intercambiador de calor llamado flujo contra-cruzado, los tubos que orientan la dirección del flujo de gases de salida del intercambiador son dispuestos a la entrada y salida del recuperador de forma paralela a el flujo de aire pero en el interior los tubos son colocados verticalmente por los que el flujo exterior choca contra los tubos colocados dentro del recuperador en dirección horizontal, por lo que el flujo principal de aire corresponde a un flujo cruzado puro (figura 3.22).

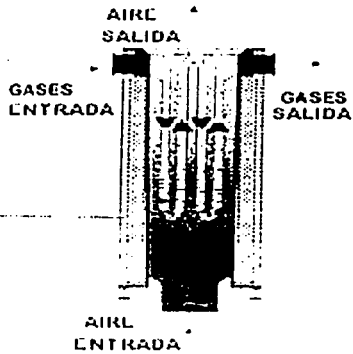


Figura 3.22.-Flujo cruzado con flujo paralelo-contracorriente.

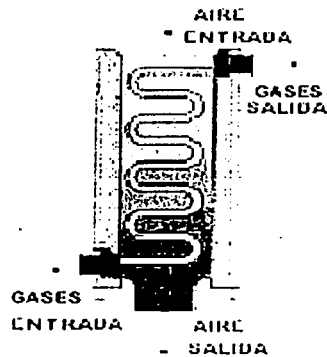


Figura 3.23.-Contraflujo con flujo cruzado como un proceso separado.

La eficiencia de tal arreglo generalmente se sitúa en algún punto entre las eficiencias del flujo cruzado y el flujo paralelo como flujo individual para su correspondiente función. Los cambiadores de este tipo representan un caso límite para los recuperadores que consisten en varios pasos conectados en serie. Además la combinación más eficiente se presenta cuando la parte principal del cambiador opera en flujo cruzado y por la parte de los tubos el promedio del proceso se lleve a cabo en contraflujo. Esto lo observamos en las figuras 3.23 y 3.24 sin embargo por la geometría de los tubos en el primero de ellos el contraflujo con flujo cruzado como un proceso separado es con oposición de dirección opuesta y en el segundo con la dirección igual.

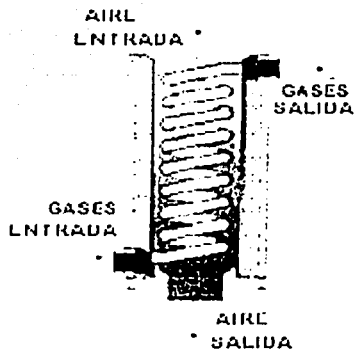


Figura 3.24.-Contraflujo con flujo cruzado como un proceso separado.

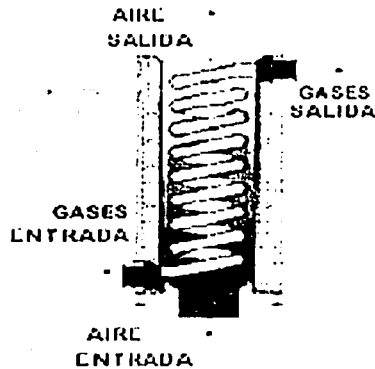


Figura 3.25.-Flujo paralelo con flujo cruzado como un proceso separado.

### 3.3 Clasificación de acuerdo al número de pasos.

#### 3.3.1 Recuperadores de varios pasos.

Un recuperador construido de tubos ensamblados, frecuentemente es dividido en el interior en varios grupos de tubos cerrados y conectados en serie, este es como tal un intercambiador de calor de tubos y corazas. Se realiza una división dentro de la coraza y dependiendo del número de divisiones es el número de veces que el fluido pasará por los grupos de tubos de esta manera se tienen los recuperadores con dos o más pasos por el lado externo de los tubos.

Si los tubos tienen deflectores para permitir que el gas pase dos veces por ellos, el cambiador de calor, recibe el nombre de recuperador de dos pasos por el lado interno de los tubos, pero como sabemos el uso de deflectores aumentará tanto el costo del cambiador como la caída de presión, en la trayectoria de aire de combustión, y por otra parte aumenta la efectividad del cambio de calor.

Estos recuperadores son usados cuando el coeficiente de transferencia de calor es más alto en el área exterior que en el área interior de los tubos. Este coeficiente más alto de transferencia de calor puede ser causado, por un líquido fluyendo externamente, por condensación de vapor contenido en el aire, por un gas fluyendo externamente, especialmente donde el flujo cruzado es forzado por medio de deflectores (ya que la turbulencia implica mejor transferencia).

#### *Intercambiadores.*

En un intercambiador, al igual que en un recuperador tipo canal, la transferencia de calor se realiza por convección.

Estos equipos se caracterizan por un diseño mucho más compacto, lo que permite un montaje rápido y sencillo.

Constructivamente, en un intercambiador el haz tubular es uno mismo con el armazón que lo contiene, evitando posibles rupturas, como consecuencia de las distintas dilataciones térmicas entre el haz y el armazón, mediante la incorporación de compensadores o mediante el curvado de los tubos del haz.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



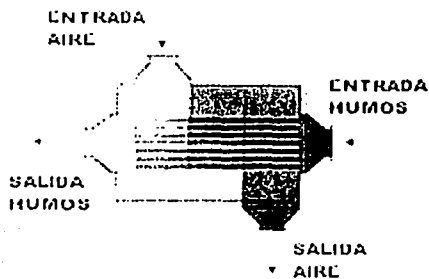


Figura 3.25.-Intercambiador de tres pasos a contracorriente.

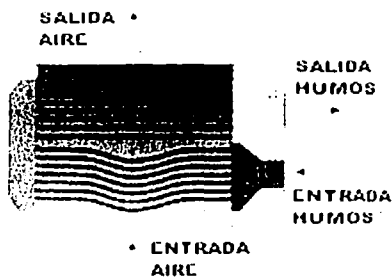


Figura 3.26.-Intercambiador de dos pasos en corrientes paralelas.

Estos equipos son adecuados en los siguientes casos:

- Cuando la temperatura de los gases de salida no es excesivamente alta, del orden de 700-750°C, salvo casos especiales.
- Cuando no se dispone de un canal en el cual introducir el haz de tubos.

El campo de aplicación de los intercambiadores es muy amplio, siendo especialmente adecuados en instalaciones de incineración de disolventes de la industria automotriz, en instalaciones de cogeneración, en instalaciones de tratamiento de superficies metálicas y plásticas, etc.

### 3.4 Nuevas tecnologías en recuperadores de calor.

#### 3.4.1 Recuperador tipo Fiffi.

Los recuperadores de radiación tipo FIFFI son el resultado de una larga experiencia tanto en su estudio como en su utilización.

En estos recuperadores el intercambio de calor entre el fluido primario y el secundario se realiza principalmente por **radiación**.

Están constituidos por un cuerpo de una aleación de cromo, lo que los hace especialmente adecuados para aquellos casos en los que los gases de salida tienen un contenido en sustancias corrosivas que hace poco aconsejable e incluso imposible la utilización de otro tipo de recuperadores en hoja de acero rollada.

Dicho cuerpo de fundición dispone de un conjunto de aletas en el lado de aire, lo que facilita el intercambio de calor entre el fluido primario y secundario dando lugar a unas temperaturas de pared más reducidas.

Esto permite la utilización de materiales menos exigentes para el elemento de intercambio, lo que conlleva una reducción importante en el costo del recuperador.

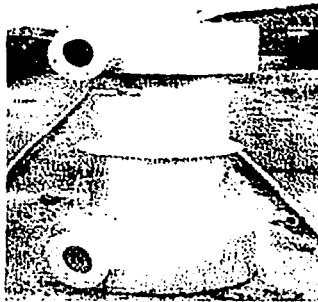


Figura 3.27.-Recuperador de radiación tipo FIFFI.

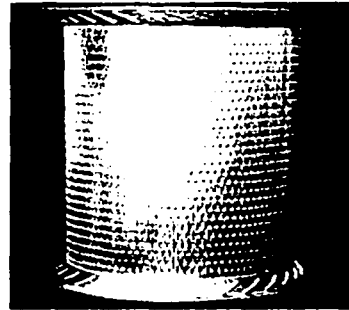


Figura 3.28.-Cuerpo de fundición aleada al cromo.

Campo de aplicación.<sup>7</sup>

Este tipo de recuperadores están diseñados en términos generales a su instalación en hornos de alta temperatura.

De forma más específica, son adecuados en los siguientes casos:

- Hornos de forja,
- Hornos de soldadura,
- Hornos de fusión,
- Hornos de vidrio,
- Hornos de cocción, etc.

<sup>7</sup> <http://www.kalfrisa.com>

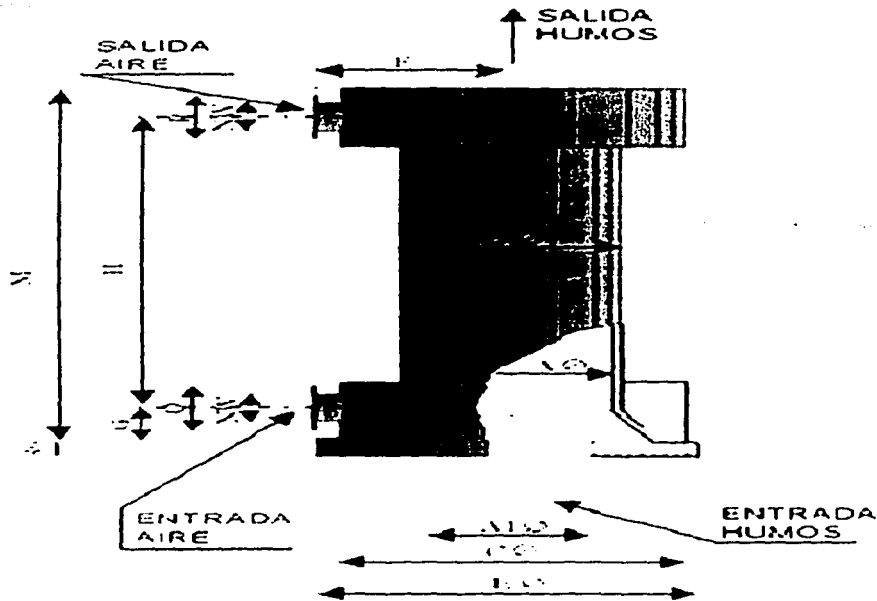


Figura 3.29.-Esquema recuperador tipo FIFFI

Capacidades y modelos.

El recuperador de radiación tipo **FIFFI** trabaja con temperaturas de humos comprendidas entre 1832°F (1000°C) y 2732°F (1500 °C), consiguiendo un calentamiento del fluido secundario (aire) de hasta 550 °C. Existen modelos que permiten trabajar en un rango de caudales comprendido entre 170 y 1200 Nm<sup>3</sup> / h para cada equipo instalado.

Tabla3.1.- Medidas para el recuperador Fiffi

Medida	II	III	IV	V	VI
A	400	500	600	800	800
A1	300	400	450	600	600
B	452	552	652	852	852
E	680	780	880	1080	1080
F	390	440	500	630	630
G	145	170	205	210	210
H	910	1060	1090	1180	1580
M	1200	1400	1500	1600	2000
NW	125	151	212	250	250

Dimensiones / mm

Tabla 3.2.- Capacidades para el recuperador Fiffi

Flujo de aire		Consumo de combustible		
		Gas natural 9.000 kcal/Nm <sup>3</sup>	Gas propano 22.900 kcal/Nm <sup>3</sup>	Aceite-comb 9.600 kcal/kg
Tipo	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	kg/h
II	170-500	16,2-47,5	6,6-19,3	14,5-42,7
III	220-630	20,9-60	8,5-24-4	18,8-53,8
IV	280-750	26,6-71,3	10,8-29	24-64
V	375-1.000	35,6-95	14,5-38,7	32-85,4
VI	375-1.200	35,6-114	14,5-46,5	32-102,5

Temperatura máxima de gases de salida: 2732°F (1500°C).

Temperatura máxima del aire: 1022°F (550°C).

Pérdidas de carga lado aire: aprox. 120 mm H<sub>2</sub>O.

Material: Ha/A2.

### 3.4.2 Recuperadores de empresas

Otra de las empresas dedicadas al desarrollo de nuevos tipos de recuperadores es la empresa Eclipse Combustion, entre sus equipos se encuentran dos recuperadores:

- Recuperador Eclipse de flujo cruzado.
- Recuperador Tubular Externo.

#### Recuperador de flujo cruzado.

Los tubos de recuperador de flujo cruzado son la aleación de cromo níquel de alto grado y el acero inoxidable incluido aislado de acero al carbón.

- Temperatura de operación máxima 2100°F. (1150°C).
- El rango de volumen 160 - 2300 CFM (270 - 3900 m<sup>3</sup>/hr).
- 4 Tamaños Disponibles, entradas de 1,500,000 a 10,000,000 Btu/hr.
- No requiere juntas de expansión.
- Baja caída de presión.
- Amplia gama de entradas, construcción compacta, duradera.

#### Aplicaciones típicas

- Hornos de recocido.
- Hornos de fundición de aluminio.
- Hornos de esmaltando.
- Hornos para endurecimiento y forjado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

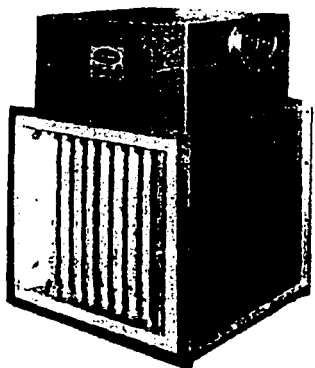


Figura 3.30.-Recuperador elipse de flujo cruzado.

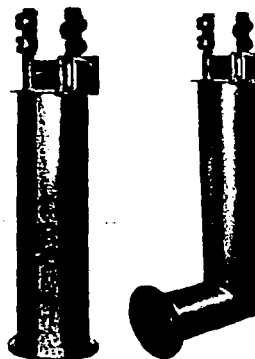


Figura 3.31.-Recuperador tubular externo.

Los tubos de recuperador de flujo cruzado son construidos de acero inoxidable de cromo níquel, con el aislamiento adecuado para su uso. Pueden realizarse configuraciones de colocación diferentes con varias posiciones de montaje. Sus características son las siguientes:

- Temperatura de operación máxima 2100 ° F. (1150 ° C).
- Rango de Volumen 160 - 2300 CFM (270 - 3900 m3/hr).
- 4 Tamaños Disponibles. Entradas de 100,000 a 2,500,000 Btu/hr (30 a 730 kw).
- Baja caída de presión.
- Amplia gama de entradas, De peso ligero, construcción duradera.
- Diseño de tubo acabado simple.
- Toma de aire de dilución empotrada si es requerido.

Tabla 3.3.- Porcentajes de ahorro de combustible a varias temperaturas de salida y aire de combustión precalentado para recuperadores de Eclipse Combustion.

Temperatura de salida del horno (°F)	Temperatura de aire precalentado °F				
	700	800	900	1000	1100
2400	29%	32%	35%	38%	41%
2200	26%	29%	31%	34%	36%
2000	23%	26%	28%	31%	33%
1800	21%	23%	26%	28%	31%
1600	19%	22%	24%	26%	28%
1400	18%	20%	22%	24%	26%
1200	17%	19%	21%	23%	25%
1000	15%	18%	20%	---	---

Combustible gas natural @ 10% de exceso de aire

Una buena forma de visualizar la utilidad de este tipo de recuperadores, es mediante los esquemas, por lo que presentamos uno para el recuperado de flujo cruzado en el cual se muestra el montaje para un recuperador que maneja una temperatura de operación de 2100°F.

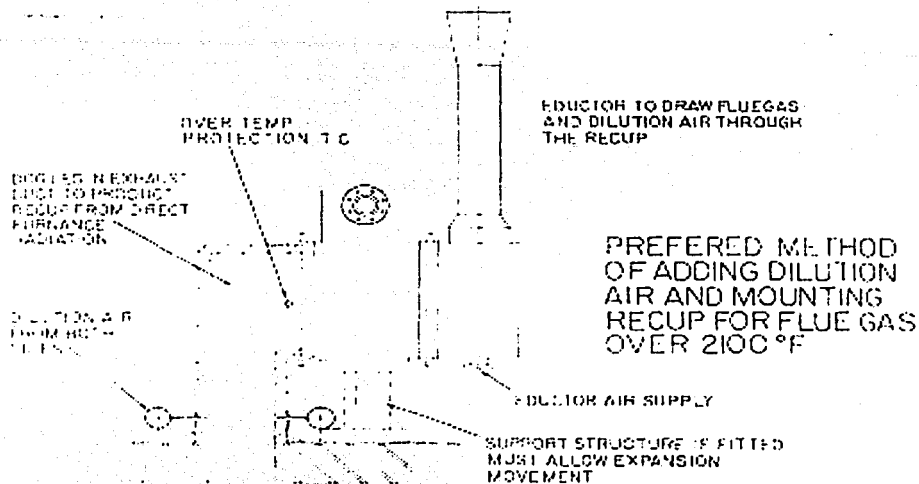


Figura 3.32.- Montaje para un recuperador de flujo cruzado

De igual manera podemos observar las gráficas de los diferentes tipos de estos recuperadores de acuerdo al número de tubos, aquí presentamos solo dos para ver como cambia la caída de presión y la temperatura de entrada de precalentamiento con una área de transferencia mayor. Además de ver un esquema con las dimensiones que tiene este recuperador, así como el peso de la unidad.

FLUJOS Y CAÍDA DE PRESIÓN.

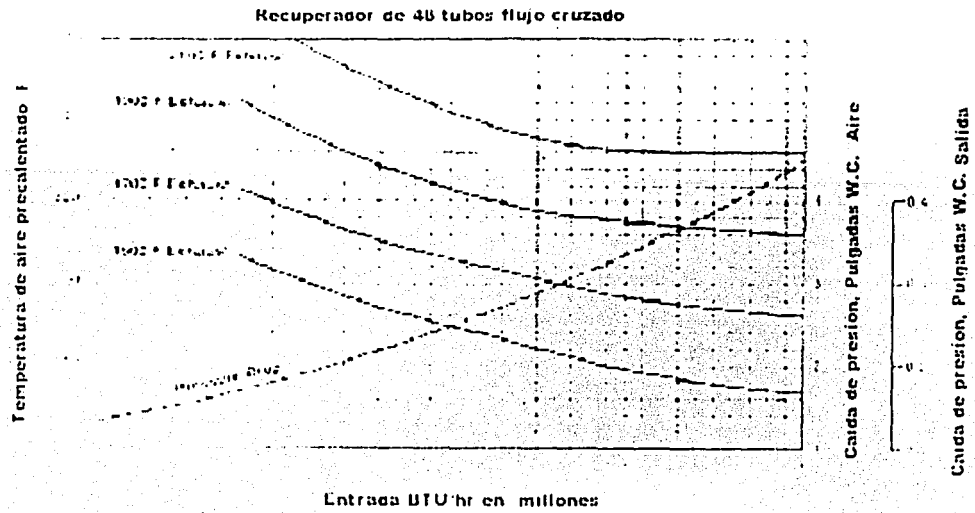


Figura 3.32.- Gráfica para un recuperador de flujo cruzado con 48 tubos.

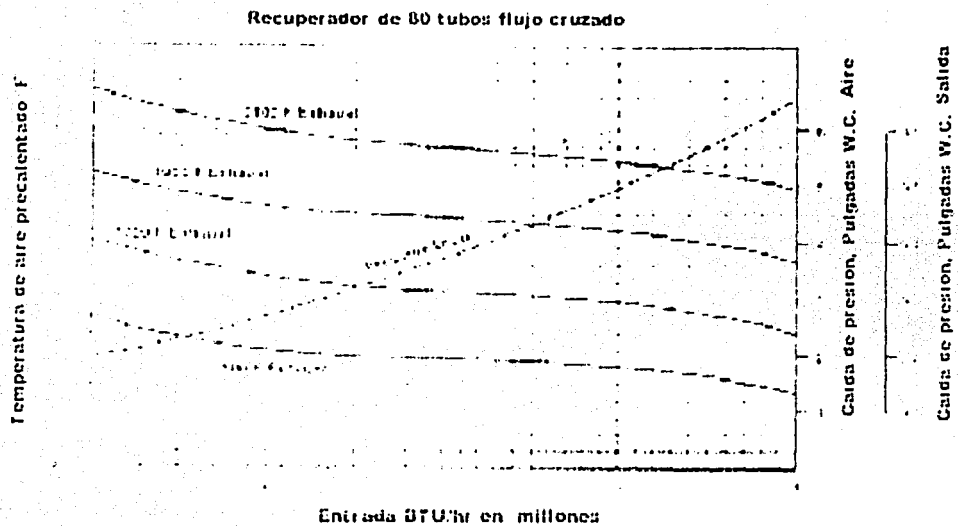


Figura 3.33.- Gráfica para un recuperador de flujo cruzado con 80 tubos.

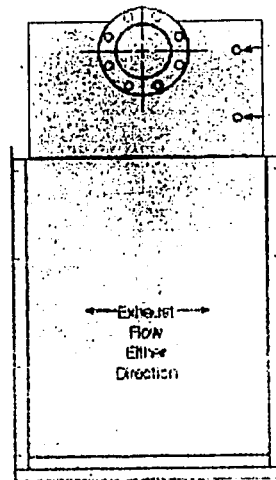
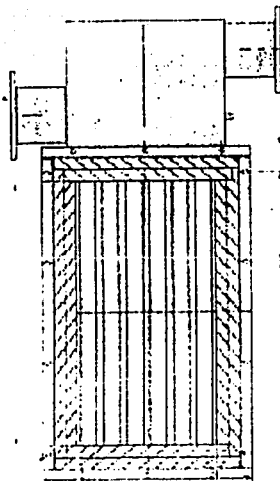
# ECLIPSE CROSS-FLOW RECUPERATORS

48 TUBE MODEL

Assembly No. 101883

Unit Weight: 600 Lbs.

Air Inlet/Outlet  
Flanges



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## ECLIPSE EXTERN-A-THERM RECUPERATORS

SERIES "M"

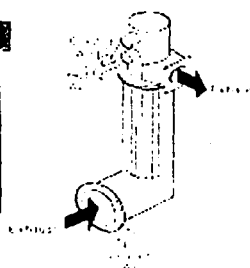
EXTERN-A-THERM  
LESS HOUSING



HOUSING STYLE "ST"



HOUSING STYLE "DL"



"T" STYLE RECUPERATOR & HOUSING

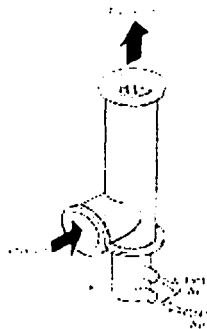


Figura 3.34.- Tipos de recuperadores tubulares.

También aquí contamos con gráficas que nos muestran el comportamiento de la temperatura de combustión y la caída de presión para diferentes tamaños del recuperador tubular.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

PERFORMANCE DATA

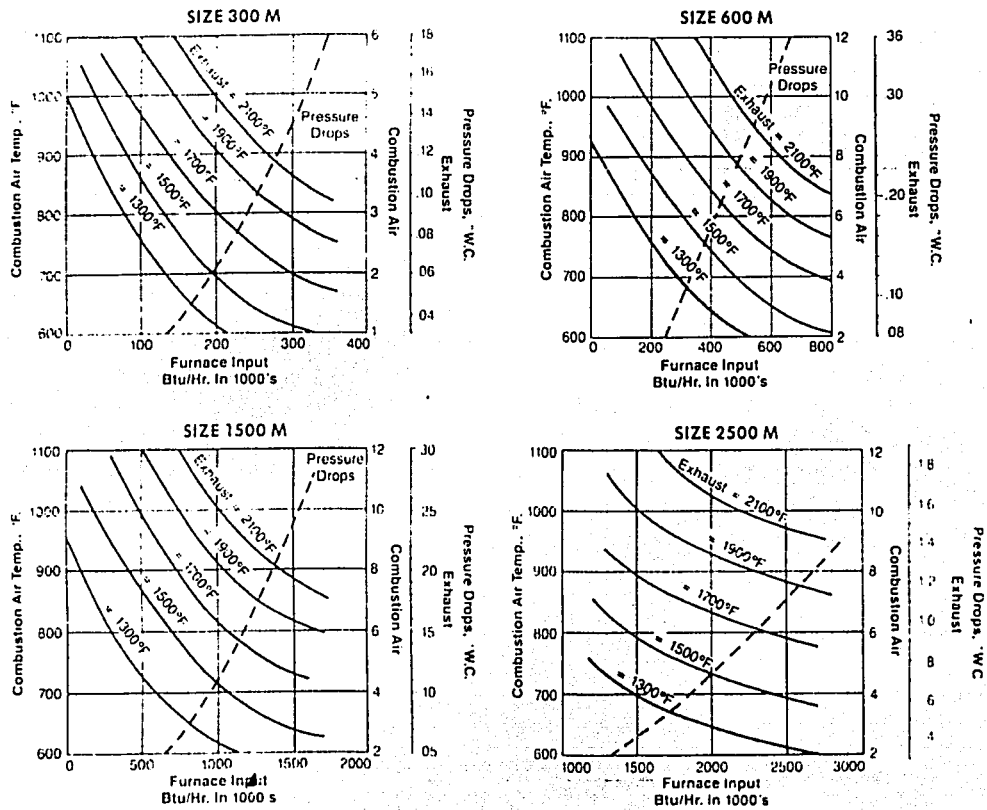
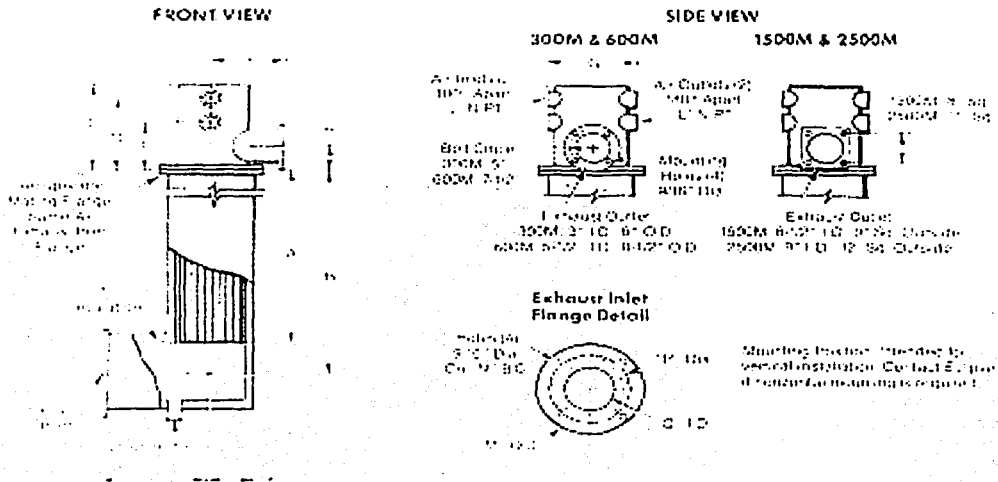


Figura 3.35.- Gráficas de un recuperador tubular a diferentes tamaños.

Por último presentamos las dimensiones del recuperador tubular, el que aparentemente es un recuperador simple sin embargo, con el esquema vemos que tiene especificaciones en cada una de sus partes, con lo que de paso resaltamos el hecho que esto es un punto importante en el análisis de un recuperador.

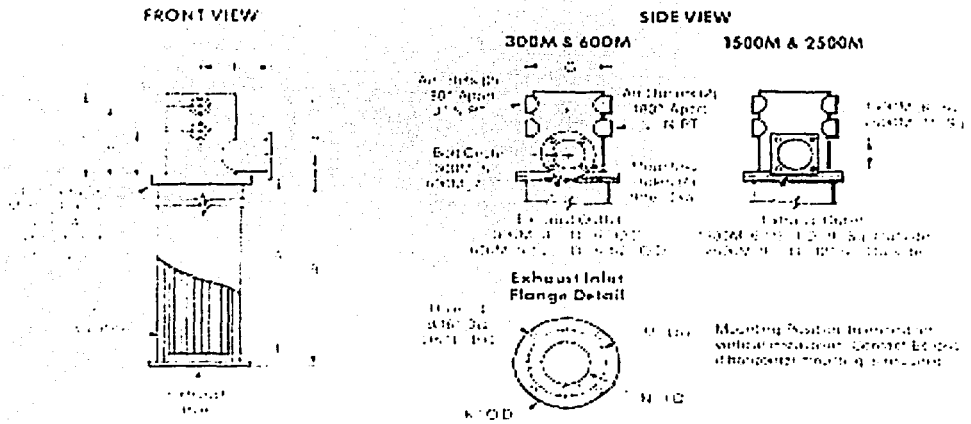
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

DIMENSIONS—STYLE "DL"



Dimensions in Inches														
Size	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	U
300M	16	18	12-1/2	14	11-1/2	7	7-1/2	2	2-1/2	2	2	12-1/2	11-1/2	6
600M	24	28	18-1/2	21	17-1/2	11	11-1/2	3	3-1/2	3	3	18-1/2	17-1/2	7
1500M	36	42	27-1/2	31	26-1/2	17	17-1/2	5	5-1/2	5	5	27-1/2	26-1/2	11-1/2
2500M	48	56	36-1/2	41	34-1/2	23	23-1/2	7	7-1/2	7	7	36-1/2	34-1/2	15

STYLE "ST"



Dimensions in Inches													
Size	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N
300M	16	18	12-1/2	14	11-1/2	7	7-1/2	2	2-1/2	2	2	12-1/2	11-1/2
600M	24	28	18-1/2	21	17-1/2	11	11-1/2	3	3-1/2	3	3	18-1/2	17-1/2
1500M	36	42	27-1/2	31	26-1/2	17	17-1/2	5	5-1/2	5	5	27-1/2	26-1/2
2500M	48	56	36-1/2	41	34-1/2	23	23-1/2	7	7-1/2	7	7	36-1/2	34-1/2

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 3.35.- Esquemas de un recuperador tubular con diferentes modelos.

La tabla presenta la relación entre numerosos atributos indicativos de los tipos más comunes de cambiadores de calor industriales, en forma de matriz. Esta matriz permite hacer comparaciones rápidas al seleccionar tipos competitivos de intercambiadores de calor. Las características que se dan en la tabla para cada tipo de cambiador de calor son: rango permisible de temperatura, capacidad de transferir humedad, capacidad para resistir grandes diferencias de temperatura, disponibilidad en unidades paquete, facilidad de adaptación, consideraciones por su tamaño y combinaciones permisibles de los fluidos de transferencia de calor.

Tabla 3.4.-Comparación de tipos de equipo de recuperación de calor.<sup>1</sup>

	Baja temperatura Bajo 0-250°F	T. intermedia 250-1200°F	Alta temperatura 1200-2000°F	Recupera humedad	Permite diferencia de temperaturas amplias	Se dispone de unidades como un paquete	Puede ser adaptado	Ausencia de contaminación cruzada	Tamaño compacto	Cambiator de calor gas a gas	Cambiator de calor gas a liquido	Cambiator de calor liquido a liquido	Se permiten gases corrosivos con construcción especial
Recuperador de radiación			Φ		Φ	1	Φ	Φ					Φ
Recuperador de convección		Φ	Φ		Φ	Φ	Φ	3		Φ			Φ
Regenerador <sup>6</sup>	Φ	Φ			Φ	Φ	Φ	Φ		Φ			Φ
Rotatorio metálico	Φ	Φ				Φ	Φ	3	Φ	Φ			Φ
Rotatorio hidrocópico	Φ			2		Φ	Φ		Φ	Φ			
Rotatorio de cerámica		Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ			Φ
Cambiator de calor de tubo con aletas	Φ	Φ			Φ	Φ	Φ	Φ	Φ		Φ		4
Cambiator de cubierta tubular y tubo	Φ	Φ			Φ	Φ	Φ	Φ	Φ		Φ	Φ	
Calderas de calor de desperdicio <sup>6</sup>	Φ	Φ				Φ	Φ	Φ			Φ		4
Tubos de calor	Φ	Φ			5	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ			Φ

1. Disponibles comercialmente como unidad paquete solo en pequeñas capacidades.
2. Sujeto a controversia. Algunos autores aseguran recuperación de humedad. No se recomienda confiar en ello.
3. Con el agregado de una sección de purga, se puede limitar la contaminación cruzada a menos de 1%.
4. Se puede construir de materiales resistentes a la corrosión, pero hay que considerar la posibilidad de daños extensos al equipo, causados por fugas o roturas de tubos.
5. Las temperaturas y diferenciales de temperatura permitidos están limitadas por las propiedades de equilibrio de fases del fluido interno.
6. Se incluyen otro tipo de equipos que permiten el ahorro de energía para comparar las ventajas y desventajas con respecto a los recuperadores de calor.

<sup>1</sup> Guía para aprovechamiento del calor de desperdicio.

# CAPÍTULO IV. BALANCE ENERGÉTICO.

## CAPITULO IV. BALANCE ENERGÉTICO

### 4. Balances de calor.

Como se mencionó en el primer capítulo una de las formas importantes que nos permitirá tener un parámetro para llevar a cabo la conservación de la energía son los balances de calor. Un balance térmico es un análisis de un proceso que muestra de donde viene el calor y a dónde va; esta es una herramienta vital para establecer las consecuencias monetarias de las pérdidas de calor y de los proyectos de utilización de calor de desperdicio. El balance térmico para un horno o cualquier equipo debe derivarse a partir de las mediciones hechas durante periodos efectivos de la operación.

La energía que entra a los equipos de proceso en los cuales se pueden emplear los recuperadores es como energía química en forma de combustibles fósiles. Por lo que la revisión de los procesos de combustión nos da un panorama general de algunos aspectos a considerar.

#### 4.1 Fundamento de la combustión.

Una característica deseable en la combustión es el quemar con la flama azul, lo anterior es preferible en los procesos porque esto crea una combustión más rápida, la flama es más pequeña y esto permite una mayor liberación de calor en un horno determinado. Entre los combustibles más usados tenemos a los hidrocarburos los cuales existen en un gran número de series: parafinas, oleofinas, diolcofinas, aromáticos, acetilenos, cicloparafinas etc. Cada compuesto de esta serie tiene un peso molecular y una relación hidrógeno / carbono característico. Algunos de los combustibles de estas series presentan problemas en el quemado con flama azul, como el incremento del peso molecular al punto donde el quemado a flama azul es muy difícil.<sup>1</sup>

El metano (PM- 16) es un combustible ideal. El butano (PM- 58) otro miembro de la serie de las parafinas tiende mucho más a un quemado con flama amarilla. Por lo que el quemar con presencia de flama azul no implicará en algunos casos una combustión más eficiente. El color de las flamas varía, porque las reacciones de combustión causan ionización en el cuerpo de la flama y el material ionizado imparte esos colores característicos.

La cantidad de aire no tiene efectos sobre el color de la flama. La mezcla combustible aire para el combustible en particular determina el color de la flama, azul, azul-amarilla, o amarilla. La flama amarilla como tal no indica ineficiencia en el quemado. El aceite puede ser quemado muy eficientemente con una flama brillante amarillo con blanco. Por lo que la creencia de que debe existir forzosamente la presencia de una flama azul es equivocada.

En los sistemas de combustión existen consideraciones debido a los altos niveles de temperatura, además existen áreas del tratamiento térmico donde se precisa la uniformidad de la temperatura y esto puede ser completamente crítico y el exceso de aire tiene que ser usado como una forma para mantener esta uniformidad.

<sup>1</sup> Artículo. - Save energy at your heater.

## 4.1.1 Exceso de aire.

Aproximadamente el 5% de todo el combustible quemado es desperdiciado por información errónea, descuidos, procedimientos de prueba erróneos, diseño de quemadores y operación pobres, pérdidas excesivas por radiación desde hornos y otras razones causan estos altos niveles de desperdicio. Un buen programa para determinar y controlar estos excesos de aire puede anular el desperdicio.

El quemado controlado de combustible representa una oxidación exotérmica la cual depende normalmente del aire (por él oxígeno). El aire contiene 20.95% en volumen de oxígeno cuando esta seco, sin embargo nunca está seco naturalmente, por lo tanto contiene menos oxígeno.

*Las reacciones químicas requieren un exceso de un reactante para la terminación rápida, por lo tanto el aire en exceso se tiene que usar.*

Normalmente se demanda bastante aire en exceso, pero "bastante" no es una definición simple. Para algunos servicios, hornos y procesos, 5% de aire en exceso es bueno, pero para otros, se requiere más aire en exceso para controlar la temperatura del horno, la transferencia de calor, tamaño y localización de la flama, y la uniformidad de la aplicación de calor a los tubos del horno. Estas condiciones de operación gobiernan la eficiencia de operación la cual esta basada solamente sobre la cantidad de aire en exceso presente en las varias porciones del sistema.

Por algunas razones que no son claras, los puntos muestreados para la medida del aire en exceso son usualmente localizados en la chimenea posiblemente porque la eficiencia térmica del calentador está basada en el análisis del gas de chimenea y su temperatura.

Ya que el exceso de aire es la mayor fuente de pérdida de combustible, debe tomarse mucho cuidado en las mediciones. Típicamente esto se hacía con un analizador portátil Orsat (analizador de gases de combustión  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ) desafortunadamente pruebas repetidas por varios años confirman que por varias razones el Orsat es una gran fuente de información equivocada y ya no puede ser de confianza. El análisis de gases puede mejorar cuando el análisis es hecho con un analizador electrónico, el cual tiene que ser calibrado de una forma precisa con una muestra de gases conocida. Un gran número de instrumentos están disponibles en la actualidad.

Todos los analizadores checan el oxígeno contenido en los gases de chimenea. La precisión es importante para determinar los gases de combustión ( $CO$ ,  $CO_2$ ), porque si un gas de combustión está presente, indica que hay pérdidas de combustible las cuales necesitan ser corregidas.

El exceso de aire es determinado a partir del oxígeno contenido del gas de chimenea. La pregunta es ¿cuál es la cantidad ideal a usar?, no puede ser hecha una simple definición numérica para cada arreglo horno/quemador. Es un problema separado de absorción de calor, distribución de calor y condición de flama.

Para cada calentador, el mínimo aire en exceso, y por lo tanto, la economía máxima, es la cantidad más pequeña la cual permite satisfactoriamente la operación del proceso, afectada por la distribución de calor, condición de flama, anulación de sobrecalentamiento de los tubos. Normalmente el aire en exceso del horno será del orden del 20% máximo.<sup>2</sup>

Si esto no es posible los quemadores tendrán que modificarse o reemplazarse. Sin embargo reemplazar tendrá que ser el último recurso y podrá ser indeseable, por que se tendrá que tener una información completa acerca de las dificultades que se pueden presentar al operar el nuevo quemador y solo de esta manera nos dará la oportunidad de proveer o sugerir los procedimientos para su corrección.

A veces el diseño de los quemadores puede ser erróneo desde un principio y haber trabajado así durante un largo periodo antes de que se notara el problema por lo que al hacerse el nuevo diseño podrá elegirse inicialmente uno que supla un diseño básico y sea más específico a nuestro proceso.

En el diseño de los quemadores las aplicaciones indebidas son una de las mayores fuentes de operaciones ineficientes. Frecuentemente esto es debido a que el diseño del quemador es malo por restricciones en el factor costo inicial y principalmente.

Otra de las formas para disminuir el exceso de aire es mejorando la mezcla del equipo de combustión moderno, lo que da como resultado un mínimo exceso de aire con una alta eficiencia en la combustión. Se puede extraer tanta energía como es posible termodinámicamente del sistema para llevar a cabo una eficiencia térmica máxima. Varios diseños nuevos de calentadores muestran extracciones máximas de gases de combustión por incorporación de grandes zonas de precalentamiento sin fuego dejando a los gases salir a temperaturas mínimas. Esto, en conjunción con otros servicios de recuperación mejorará el proceso desde el punto de vista térmico.

El principal beneficio del exceso de aire de combustión es que un gran volumen de productos de chimenea resulta proveer el contacto y la transferencia de calor por convección con la carga del horno. Sin embargo, desde el punto de vista térmico la operación de exceso de aire es por completo ineficiente (se tiene una mayor cantidad de masa que calentar).

#### 4.1.2 Precalentamiento de aire de combustión.

En un sistema de recuperación de calor equipado de un recuperador del tipo que podía precalentar el aire de combustión a temperaturas alrededor de 1300°C. La diferencia en temperatura entre el horno y el aire de combustión entrante es importante desde el punto de vista de la eficiencia del sistema. La concentración de oxígeno en aire de combustión puede variar de 21% por el volumen (aire normal) a  $\pm 2\%$  lo que no implica un cambio significativo.

<sup>2</sup> Artículo.- C. L. Brown, Preheat process combustion air, Hydrocarbon Processing, June 1978 pp115.



La energía química liberada durante el proceso de combustión se usa internamente para elevar la temperatura de los productos de combustión. Cuanto más pequeña es la pérdida de calor, tanto mayor resultará el aumento de temperatura. En el caso límite que no exista pérdida de calor (lo cual sabemos que no es posible en la práctica) hacia los alrededores ( $Q=0$ ), la temperatura de los productos alcanzará un máximo, conocido como temperatura de flama adiabática.

Las características de la flama fueron encontradas muy diferentes con aire de combustión de alta temperatura (en el exceso de  $1000^{\circ}\text{C}$ ) en diversos combustibles que con el aire de combustión cerca de la temperatura ambiente. Las flamas con aire de combustión altamente precalentado son mucho más estables y homogéneas (temporal y espacial) con respecto al aire de combustión de temperatura ambiente. Los resultados experimentales se han complementado con simulaciones numéricas. Los resultados calculados mostraron las características de la flama similares a las obtenidas experimentalmente. El comportamiento termal y químico de las flamas de alta temperatura de la combustión con aire depende de las características del combustible, la temperatura de precalentamiento y la concentración de oxígeno en el aire.

Las flamas de alta temperatura del aire proporcionan un flux mucho más alto de calor que el aire normal, lo que ayuda a ahorrar energía y la reducción subsecuente de gases invernadero al ambiente. La tecnología de la combustión con aire de alta temperatura proporciona ahorros significativos de energía (hasta 60%), al bajar las dimensiones del equipo (sobre 30%) y de la reducción de los agentes contaminadores (sobre 25%). Los ahorros de energía se traducen en la reducción del  $\text{CO}_2$  y de otros gases invernadero al ambiente. Al hablar de la combustión con aire de alta temperatura, estamos implícitamente hablando de conversión avanzada de energía y control de la contaminación.

La introducción al concepto de precalentamiento del aire de combustión o los reactivos ha sido significativa en casi todos los tipos de sistemas de combustión en la práctica. Se ha reconocido que los ahorros significativos en combustible pueden ocurrir con la recuperación de la energía de los gases de salida del horno usando un recuperador, un regenerador o algún otro método del intercambio de calor. El precalentamiento del aire de combustión que usa los gases de salida de un horno proporciona muchas ventajas, por ejemplo, realza eficiencia y la estabilidad de flama, y reduce la emisión de contaminantes y ahorra energía.

En los recuperadores se lograba tener aire de precalentamiento de baja temperatura con respecto a los regeneradores, sin embargo el desarrollo de nuevos recuperadores muestra una mejoría en las temperaturas de precalentamiento de aire.

La temperatura máxima de la flama con la recirculación del calor es afectada por la cantidad de calor recirculada a la flama, el poder calorífico del combustible. El significado de una entalpía en exceso como algunos autores piensan no es del todo cierto ya que esta entalpía adicionada al sistema por los gases de combustión al aire ayudará a mejorar ciertas características del sistema. sin embargo esta entalpía en exceso no podría llevarse a cabo si no se cuenta con el combustible que normalmente adicionamos, esta entalpía surgió del sistema mismo.

Se pueden emplear además, métodos para proporcionar los medios de aumentar la temperatura máxima de la flama. Por supuesto también se puede utilizar el oxígeno en lugar del aire para aumentar la temperatura de flama. Sin embargo, el costo aumenta con el uso del oxígeno. Ningún esfuerzo de desarrollar los sistemas de la combustión para una mayor eficiencia y los ahorros substanciales de la energía no deben estar a expensas de contaminación, de tamaño del equipo, de confiabilidad del sistema y de costos crecientes.

El mejor desarrollo en todas las clases de hornos usados como calderas, fundidoras, recalentadores, tratamientos térmicos, como se mencionó anteriormente, reduce costos de producción y mejora la calidad del producto. La reducción de la emisión de contaminantes es parte de los costos de producción. Los costos de combustible representan un elemento de costo importante en la operación del horno. Además el tratamiento de los gases de escape para reducir la emisión de contaminantes no es deseable pues éste aumenta las inversiones de capitales y los costos de mantenimiento agregados de equipo.

La distribución espacial del flux del calor, no es uniforme a lo largo de la flama o transversal a la flama o ambos. La temperatura máxima de la flama es limitada por la temperatura crítica del combustible usado y de los materiales usados para la construcción del horno. Aunque el aumento en la temperatura de la flama (que usa, por ejemplo, el aire precalentado o aire de combustión enriquecido con oxígeno) realza la eficiencia térmica, pero todavía puede seguir habiendo un problema de distribución no uniforme del flux de calor en el horno. Los progresos recientes en tecnología de la combustión del aire de alta temperatura han demostrado la distribución alta y uniforme del flux del calor en la cámara de combustión.

En la tecnología que están desarrollando laboratorios<sup>3</sup> como el Nipón Furnace Kogyo, que tiene un programa llamado HiTAC (por sus siglas en ingles High Temperature Air Combustion) el cual arrojó resultados como el que el aire de combustión precalentado bajo condición controlada da lugar a la distribución alta y uniforme de las temperaturas de la flama en la cámara de combustión de modo que la diferencia de la temperatura en la zona entera del horno sea extremadamente pequeña. La temperatura de la operación del horno se puede hacer muy cerca de los límites dictados por los materiales usados para la construcción del horno. Las temperaturas uniformes del horno se desean no solamente para una eficiencia térmica más alta sino también para mejorar el funcionamiento y control de proceso.

La tecnología desarrollada tiene un enorme potencial para la aplicación en muchas áreas. Algunas de las aplicaciones potenciales incluyen las siguientes:

- Hornos para fundido, tratamiento térmico, reformado petroquímico, fundido de vidrio, recalentado de acero, calentador de proceso, secadores, calderas, hornos de cerámica y destrucción térmica de la basura (incineradores municipales).
- Incinerador de residuos peligrosos.

<sup>3</sup> Artículo. - Ashwani k. Gupta. Flame characteristics...

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los desafíos en la combustión con aire de temperatura elevada, que en la vieja práctica era desarrollar un sistema para una aplicación específica, y mientras que esta tendencia está igual en principio, hay muchas condiciones adicionales impuestas ahora. El ingeniero debe poner atención a los costes de ciclo de vida útil, la disposición del producto después de la vida útil, emisiones ambientales, cuestiones de salud, cuestiones legales, confiabilidad, y la simplicidad de diagnóstico y mantenimiento. Los nuevos desafíos incluyen la determinación de las condiciones convenientes para la aplicación específica usando diferentes combustibles. Los estudios fundamentales sistemáticos proporcionarán las guías de consulta óptimas del diseño para la aplicación específica.

#### 4.2 Cálculo de la temperatura de flama.

Como ya vimos la temperatura de flama es la manifestación de la liberación de la energía química del combustible, con un recuperador de calor obtenemos un mayor beneficio con una temperatura de flama más alta ya que esto se vuelve un círculo armonioso, el precalentamiento de aire de combustión con la instalación del recuperador, dará una mayor temperatura de flama y también más estable, una temperatura de flama más elevada da como resultado una mayor cantidad de calor disponible y mejor aprovechamiento del mismo y con una temperatura de salida que nos permitirá realizar la recirculación del calor no utilizado inicialmente para el precalentamiento del aire.

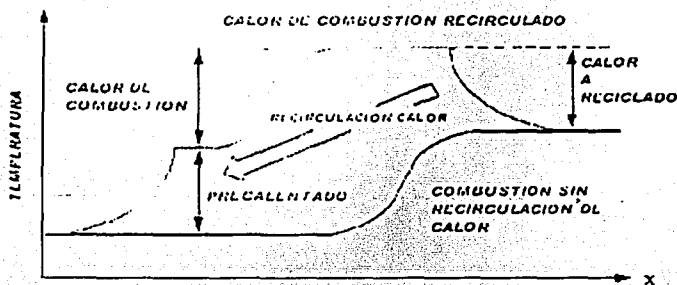


Figura 4.1.- Cambio de temperatura de flama con recirculación de calor.

Observamos en la figura 4.1 lo que mencionamos en el párrafo anterior, con una recirculación de calor (indicado con la flecha hacia abajo), obtenemos un aire precalentado con lo que incrementamos la temperatura de flama (obsérvese en la gráfica una ordenada más grande para la temperatura con el proceso de recirculación que sin este), por lo que la cantidad de calor de combustión es la suma de dos calores (la línea más clara la componen dos partes) por lo tanto mayor, que nos representará el beneficio de ahorro de combustible, pero empecemos paso por paso.

Una de las primeras cosas que debemos observar una vez determinado el combustible que vamos a utilizar en este caso gas natural (metano) es la reacción de combustión de este combustible, la reacción de combustión en este caso es la siguiente:



Una vez balanceada la reacción y tomando en cuenta que en una reacción siempre existirá un reactivo limitante y un reactivo en exceso (en este caso el aire) debemos calcular las moles que intervendrán en la reacción considerando ese exceso de aire si lo existiera, las moles (n) que cambiarán en este caso son las correspondientes al O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> en los reactivos y productos.

$$\text{Moles}_{\text{REALES}} = \text{Moles}_{\text{TEÓRICOS}} + \text{Moles}_{\text{POR EXCESO DE AIRE}}$$

Ya que hemos calculado los moles contando con el exceso de aire, el siguiente paso es calcular el calor de reacción a partir de los calores de formación a partir de su estado estándar (T=25°C y P= Atmosférica) ya que el combustible siempre ingresará a una temperatura ambiente (si el proceso no determina alguna temperatura requerida), por lo que estos datos no sufrirán ningún cambio.

$$\Delta H_R^\circ (T_0) = \sum n \Delta H_f^\circ \text{PRODUCTOS} - \sum n \Delta H_f^\circ \text{REACTIVOS}$$

Calculando este calor de reacción, se tendrá que obtener el calor que obtendremos de los productos de combustión que debe ser igual al calor de reacción a la temperatura de flama que según corresponda, sin embargo esto no es tan simple inicialmente ya que en el calculo de este calor. la entalpia y en especial la capacidad calorifica, es una función de la temperatura ya que los productos se encuentran a una temperatura superior a la temperatura ambiental, y en general estas son ecuaciones de mayor precisión entre más aumenta el grado de dicha ecuación.

$$\Delta H_{\text{PRODUCTOS}}(T) = \int_{T_0}^{Tf} C_p dT \quad C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Además de que debemos observar los estados que tienen los productos a la temperatura ambiente, en este caso el agua es el único producto que sufrirá un cambio de fase por lo que deberá sumarse el calor específico líquido y el calor de vaporización tomando en cuenta la temperatura de ebullición del agua.

$$\Delta H_{\text{PROD}} = M_{\text{O}_2} \int_{T_0}^{Tf} C_{p_{\text{O}_2}} dT + M_{\text{H}_2\text{O}} \left( \Delta H_{\text{VH}_2\text{O}} + \int_{T_0}^{T_b} C_{p_{\text{LIQ}}} dT + \int_{T_b}^{Tf} C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} dT \right) + M_{\text{CO}_2} \int_{T_0}^{Tf} C_{p_{\text{CO}_2}} dT + M_{\text{N}_2} \int_{T_0}^{Tf} C_{p_{\text{N}_2}} dT$$

Sin embargo hasta este punto no hemos considerado ninguna recuperación de calor de los gases de combustión a la salida, y por consiguiente ningún precalentamiento del aire, que es a final de cuentas el objetivo que perseguimos para ver si realmente es afectado el sistema y en que forma, como para esto debemos calcular el calor contenido en este aire precalentado dependiendo de la temperatura de precalentamiento que se tenga, esta temperatura deberá de ser lógicamente mayor a la temperatura ambiente (T<sub>0</sub>).

$$\Delta H_{\text{AIRE}} = M_{\text{O}_2} \int_{T_0}^{T_p} C_{p_{\text{O}_2}} dT + M_{\text{N}_2} \int_{T_0}^{T_p} C_{p_{\text{N}_2}} dT$$

La variación de la temperatura de precalentamiento no dependerá de la temperatura de flama que se tenga, sino de la transferencia de calor entre el calor suministrado de la reacción de combustión con el material al cual se le va a transferir el calor. El calor restante (que de otra forma sería desechado al ambiente) será el calor disponible (considerando pérdidas por convección y radiación) que podremos reutilizar en un equipo recuperador de calor.

Por lo anterior el calor de los gases de combustión a la salida no es más que la consideración que todo sistema tiene pérdidas de calor. Basándonos en la cantidad de calor de los gases de salida se tendrá la limitante de cuanto calor podrá ser cedido al aire para precalentarlo, tomando en cuenta que todo equipo de cambio de calor tiene una eficiencia máxima de transferencia, por lo que todo el calor disponible no puede ser utilizado totalmente, para calcular de una forma correcta la transferencia de calor cedido de los gases de salida al aire, debemos cuantificar las pérdidas de calor en el sistema y así encontrar la temperatura de precalentamiento. Para cuantificar el precalentamiento de aire tendremos que especificar las condiciones de un sistema completo, es decir del sistema térmico y el equipo de recuperación.

Retomando el precalentamiento de aire. Con el cálculo del calor contenido en el aire precalentado y sumándolo al calor de reacción obtendremos el calor total que esta ingresando al sistema con un recuperador de calor integrado en el sistema, este calor deberá ser igual al calor de productos a la temperatura de flama correspondiente.

$$\Delta H_R(T_0) + \Delta H_{\text{AIRE}}(T_p) = \Delta H_{\text{PROD}}(T_f)$$

Una vez realizada la hoja de cálculo se pueden obtener una cantidad de tablas que nos mostraran ciertos valores de precalentamiento con diferentes excesos de aire y analizar como se comportan estas variables con respecto a la eficiencia.

Para el cálculo de la eficiencia, esta es función de tres temperaturas, la temperatura de flama, temperatura de los gases a la salida del horno ( $T_g$ ) y la temperatura de entrada del combustible  $T_0$  (por lo general la temperatura ambiente), esta eficiencia se refiere al equipo principal de transferencia la cual representaremos como  $\eta_h$  (por ser el caso de estudio un horno) y no a la eficiencia del recuperador,  $\eta_r$ :

$$\eta_h = \frac{T_f - T_g}{T_f - T_0}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En este punto ya contamos con las diferentes temperaturas de flama, calculadas con la hoja de calculo realizada y la temperatura de entrada pero la temperatura de los gases no, y como ya establecimos para obtener el calor real transferido necesitamos especificar un sistema completo, en este caso pondremos una temperatura de gases fija de acuerdo a los temperaturas obtenidas en la práctica en el estudio de los recuperadores, en este caso una temperatura dentro de los rango que maneja los gases de salida 1000 °C (1832°F).<sup>4</sup>

Además el fijar en este momento un valor de la temperatura de gases que no es del todo arbitrario, nos permitirá observar el comportamiento de eficiencia, que tiene en el exceso de aire su principal variable de impacto y en segundo lugar la temperatura de precalentamiento, sin duda la temperatura de los gases limita, la temperatura de precalentamiento, pero esta temperatura de gases para un sistema concreto no presentará variaciones considerables, por lo que es en cierto modo justificable en este punto colocar un valor propuesto por la literatura.

Lo que queremos observar es la variación de la temperatura de flama con respecto a las demás variables, puede que observemos valores de eficiencia muy elevados, que no representarán el verdadero funcionamiento del equipo, pero el comportamiento ascendente o descendente de la eficiencia no cambiará de ninguna manera, ya que la temperatura de los gases es un valor que se toma constante para los distintos precalentamientos a los diferentes excesos de aire.

Lo que sí podemos notar con claridad es que con una temperatura de precalentamiento mayor, la eficiencia del horno mejorará junto con los beneficios correspondientes, siempre y cuando se maneje la misma cantidad de exceso de aire, el cual en algunos casos para las tablas que se calcularon, hace que la eficiencia mostrada sea un guión, lo que indica que es imposible operar el equipo a estas condiciones de exceso de aire. Sería demasiado grande la cantidad materia que habría que calentar, (además que el nitrógeno no participa en la reacción de combustión y se tendría una masa muy grande del mismo) disminuyendo la temperatura de flama y el calor otorgado por el combustible por unidad de masa y al grado que no existiría eficiencia con estas condiciones.

#### *4.3 Diseño de un recuperador de calor.*

El planteamiento de los balances de energía es importante, sin embargo no es la única parte que debemos evaluar, también las características que debe tener nuestro equipo. Para la evaluación del cambiador necesitamos determinar cual será el probable funcionamiento termohidráulico de esa unidad para la carga de calor deseada, condiciones de proceso, resistencias de ensuciamiento y caída de presión. Todas las condiciones deben satisfacerse para que un recuperador cumpla con el servicio para el que fue construido, La evaluación de un recuperador implica la mejor utilización de los parámetros que tiene disponible el diseñador.

<sup>4</sup> Industrial Heating Equipment Association

#### 4.3.1 Consideraciones de diseño.

Para el diseño del recuperador, las condiciones de proceso, la carga de calor, flujos, temperaturas y caída de presión o velocidades máximas son especificadas. El proceso de diseño consiste en la determinación de las especificaciones geométricas, óptimas del equipo de acuerdo con la información de proceso, los requerimientos estructurales y de acuerdo con las restricciones de las diferentes normas aplicables en la actualidad.

##### Análisis preliminar.

Es imperativo realizar un análisis de las condiciones de proceso para poder decidir el número inicial de parámetros (localización de fluidos, diámetro y longitud y diámetro de los tubos, arreglo, etc.)

Es recomendable seguir los siguientes pasos para efectuar el análisis:

- Estimación probable del tamaño para conocer la magnitud probable del recuperador.

Determinar la localización de los fluidos de acuerdo a lo siguiente:

- El fluido con mayor presión debe ser colocado del lado de los tubos.
- El fluido corrosivo es colocado preferiblemente del lado de los tubos.
- El fluido con alta tendencia al ensuciamiento es colocado del lado de los tubos, por la mayor facilidad de mantenimiento.
- El colocar el fluido de mayor presión del lado de los tubos, proporciona la mejor utilización de la caída de presión para la transferencia de calor.

##### Criterios de diseño.

Para incrementar la transferencia de calor, cuando la caída de presión es menor que la máxima permitida se recomienda:

- Incrementar la longitud de los tubos, hasta lo máximo permitido.
- Disminuir el pitch de tubos hasta lo máximo permitido por la caída de presión y por las limitaciones de mantenimiento.
- Probar con superficies aumentadas (tubos con aletas).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

4.3.2 Descripción del procedimiento de cálculo.<sup>5</sup>

1. Determinar las temperaturas de entrada y salida del lado de la coraza y de los tubos.

En este caso según las recomendaciones los gases de salida van por los tubos y el aire a precalentar por el lado de la coraza, la temperatura de entrada para los fluidos será en las condiciones que nos otorgue el equipo de proceso y la temperatura ambiente (o la de un precalentamiento previo por cuestiones de proceso) y las de salida dependerán de las condiciones de entrada.

2. Calcular la diferencia media logarítmica de temperatura LMTD:

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

3. Calcule:

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{t_2 - t_1} \quad S = \frac{(t_2 - t_1)}{T_1 - t_1}$$

4. Determinar la diferencia media de temperatura corregida DT

$$DT = LMTD * FT$$

5. Determinar las temperaturas de bulbo del lado de los tubos y de la coraza,  $T_{bT}$  y  $T_{bS}$ :

$$T_{bT} = \frac{(t_1 + t_2)}{2} \quad T_{bS} = \frac{(T_1 + T_2)}{2}$$

6. A la temperatura de bulbo del lado de los tubos determine las propiedades del fluido:

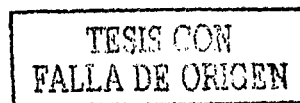
$S_{gr}$ ,  $\mu_{T(eps)}$ ,  $C_{pT}$  (Btu/lb °F),  $k_T$  (Btu/hr ft °F)

7. A la temperatura de bulbo del lado de la coraza determine las propiedades del fluido:

$S_{gs}$ ,  $\mu_{S(eps)}$ ,  $C_{pS}$  (Btu/lb °F),  $k_S$  (Btu/hr ft °F)

8. Determine los flujos de masa del lado de la coraza:  $W_S$  (lb/hr) y del lado de los tubos:  $W_T$  (lb/hr).

<sup>5</sup> Kern, D. Q., Procesos de transferencia de calor. CECSA.





9. Determine la carga de calor  $Q$ , usando los datos del lado de la coraza o del lado de los tubos. Para el caso de diseño.

$$Q = WC_p \Delta T$$

10. Elegir para el caso de diseño o suministrar los criterios de diseño siguientes:

- Número de pasos por el lado de los tubos,  $NP_T$
  - Longitud de los tubos,  $L$  (ft)
  - Diámetro interior de los tubos,  $DI$  (ft)
  - Diámetro exterior de los tubos,  $DE$  (ft)
  - Tipo de arreglo: triangular, cuadrado o rotado
  - Pitch de los tubos,  $P_T$  (ft)
  - Número de tubos del recuperador,  $N_T$
- Se puede modificar la longitud efectiva, usando  $L-0.5$ , en lugar de  $L$ , para el caso de diseño.
  - Ajustar el número de tubos de acuerdo a una tabla 4.1 y determine el diámetro de la coraza de acuerdo al número de pasos por el lado de los tubos.

*Cálculo del coeficiente de película del lado de los tubos.*

1. Calcular el área de flujo de los tubos,  $A_T$ :

$$A_T = \frac{\pi * DI^2 * N_T}{4 * NP_T}$$

2. Determinar el gasto másico de los tubos,  $G_T$ :

$$G_T = W_T / A_T$$

3. Determinar el número de Reynolds del lado de los tubos,  $RE_T$ :

$$RE_T = \frac{G_T * DI}{12 * \mu_f * 2.42}$$

4. Determinar el número de Prandtl:

$$Pr = C_p \mu / k$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

5. Calcular el coeficiente de película del lado de los tubos,  $HI_0$ :

$$HI_0 = 0.027 RE_T^{0.796} * (2.42 * C_T * \mu_T / k_T)^{1/3} * (12 * k_T / DI) * (DI/dl / DE)$$

6. Estime la temperatura de pared,  $t_w$ :

Para fluido caliente en la coraza:

$$t_w = \frac{t_1 + t_2}{2} + \frac{HI_0}{HI_0 + HI_o} * \left[ \frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right]$$

Para fluido caliente en el lado de los tubos:

$$t_w = \frac{t_1 + t_2}{2} + \frac{HI_o}{HI_0 + HI_o} * \left[ \frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right]$$

*Cálculo del coeficiente de película del lado de la coraza.*

1. Calcular el área de flujo de la coraza,  $A_s$ :

$$A_s = \frac{\pi * D_s^2}{4} - \frac{N_{tubos} * \pi * DI^2}{4}$$

2. Determinar el gasto másico de la coraza,  $G_s$ :

$$G_s = W_s / A_s$$

3. Determinar el número de Reynolds del lado de la coraza,  $RE_s$ :

$$RE_s = \frac{G_s * D_s}{12 * \mu_s * 2.42}$$

4. Determinar el número de Prandtl:

$$Pr_s = C_p \mu / k$$

5. Calcular el coeficiente de película del lado de la coraza,  $H_0$ :

$$H_0 = 0.027 RE_s^{0.796} * (2.42 * C_s * \mu_s / k_s)^{1/3} * (12 * k_s / DI) * (DI / DE)$$

*Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.*

1. El coeficiente global de transferencia,  $U_c$  se evalúa despreciando la resistencia de la pared de tubo:

$$U_c = \frac{HI_o * H_o}{HI_o + H_o}$$

2. Considerar un factor de obstrucción  $R_d$ :
3. Evaluar el coeficiente global de diseño,  $U_d$ :

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{U_c} + R_d$$

*Evaluación del área de transferencia requerida ( $A_{TC}$ ).*

La ecuación de Fourier establece:

$$Q = U_d \times A_{TC} \times \Delta T$$

Donde:

$Q$  = Calor a transferir, BTU/hr

$U_d$  = Coeficiente global de transferencia de calor, BTU/hr ft<sup>2</sup> °F

$A_{TC}$  = Área de transferencia de calor, ft<sup>2</sup>

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura = DT, °F

De aquí:

$$A_{TC} = Q / (U_d \times DT)$$

*Cálculo de la caída de presión del lado de los tubos.*

$\Delta P_T$  = caída de presión del lado de los tubos, psi

1. Calcular el factor de fricción de Fanning,  $f$ :

$$f = .0035 + 0.264 / Re^{.64}$$

Utilizando el  $Re_T$  obtenido en el lado de los tubos

2. Evaluar densidad del gas,  $\rho_{gT}$  (lb/ft<sup>3</sup>):

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

3. Conociendo la longitud del recorrido, L (ft); volumen real del gas,  $V_{gc}$  (ft<sup>3</sup>/hr) y el diámetro interior del tubo DI, (ft)
4. La ecuación para evaluar la caída de presión del lado de los tubos,  $\Delta P_T$  (psi):

$$\Delta P_T = 3.36 * 10^{-6} * f * L * d * V_{gc}^2 / D^5$$

*Cálculo de la caída de presión del lado de la coraza.*

$\Delta P_s$  =caída de presión del lado de la coraza, lb/ft<sup>2</sup>

1. Calcular el factor de fricción de Fanning, f :

$$f = .0035 + 0.264/Re^{0.64}$$

Utilizando el  $Re_s$  obtenido en el lado de la coraza

2. Evaluar Masa velocidad en el lado de la coraza,  $G_a$  (lb/hr ft<sup>2</sup>):
3. Evaluar densidad del gas en el lado de la coraza,  $\rho_{gs}$  (lb/ft<sup>3</sup>):
4. Conociendo el diámetro interior de la coraza  $D_s$ , (ft); Número de deflectores, N (adimensional); Diámetro equivalente;  $D_e$ (ft), Aceleración de la gravedad, g (ft/ hr<sup>2</sup>)
5. Para evaluar la caída de presión del lado de la coraza la ecuación es,  $\Delta P_T$  (psi):

$$\Delta P_s = f * G_a^2 * D_c * (N+1) / (2 * g * d * D_e)$$

Una vez calculado las características que debe tener nuestro equipo y determinado el funcionamiento termohidráulico de la unidad de calor deseada, condiciones de proceso, resistencias de ensuciamiento y caída de presión. Debemos realizar una evaluación del cambiador no nada más para verificar que todas las condiciones se satisfacen para el servicio por el cual fue construido el recuperador, sino para observar si en realidad no dejamos a un lado alguna consideración que hubiera podido modificar las condiciones del recuperador para un mejor funcionamiento.

\*\*\*\*\*

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROYECTO: ANÁLISIS DE AHORRO DE ENERGÍA MEDIANTE EL USO DE RECUPERADORES.

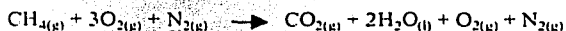
MEMORIA DE CALCULO: DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE FLAMA.

\*\*\*\*\*

DESARROLLADO POR: HERRERA TOLEDO RODOLFO ALBERTO

Cálculo de parámetros para la estimación de ahorro de combustible

1.-Reacción de combustión para el gas natural



Porcentaje de aire base molar

Aire: 21%  $\text{O}_2(\text{g})$  + 79%  $\text{N}_2(\text{g})$

Para calcular el calor de reacción debemos conocer las siguientes propiedades

$\Delta H_f$ : Entalpia de formación.

$\Delta H_f$ : temperatura estandar 25°C

$\Delta H_f/\text{C}(\text{H}_4(\text{R})) =$	-17.89 Kcal./gmol
$\Delta H_f/\text{O}_2(\text{R}) =$	0 kcal/gmol
$\Delta H_f/\text{N}_2(\text{R}) =$	0 kcal/gmol
$\Delta H_f/\text{C}(\text{CO}_2(\text{P})) =$	-94.05 kcal/gmol
$\Delta H_f/\text{H}_2\text{O}(\text{P}) =$	-57.8 kcal/gmol
$\Delta H_f/\text{O}_2(\text{P}) =$	0 kcal/gmol
$\Delta H_f/\text{N}_2(\text{P}) =$	0 kcal/gmol

$\pi$ : Coeficientes molares teoricos

$\text{M}(\text{C}(\text{H}_4(\text{R}))) =$	1
$\text{M}(\text{O}_2(\text{R})) =$	2
$\text{M}(\text{N}_2(\text{R})) =$	7.52
$\text{M}(\text{C}(\text{CO}_2(\text{P}))) =$	1
$\text{M}(\text{H}_2\text{O}(\text{P})) =$	2
$\text{M}(\text{O}_2(\text{P})) =$	0
$\text{M}(\text{N}_2(\text{P})) =$	7.52
TOTAL	10.52

$\Delta H_v$ : Entalpia de vaporización

$\Delta H_{v\text{H}_2\text{O}} =$

9717 cal/gmol

$T_b$  = Temperatura de ebullición

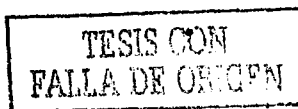
$T_{b\text{H}_2\text{O}} =$  373.2

Masa molar de los compuestos de la reacción

Masa molar	
$\text{PM}(\text{C}(\text{H}_4)) =$	
$\text{PM}(\text{CO}_2) =$	16.043 g/mol
$\text{PM}(\text{H}_2\text{O}) =$	44.010 g/mol
$\text{PM}(\text{O}_2) =$	18.015 g/mol
$\text{PM}(\text{N}_2) =$	31.999 g/mol
$\text{PM}_{\text{PROM}} =$	28.013 g/mol
$C_p$ : Capacidad	27.633

Coeficientes con el exceso de aire

$\text{M}(\text{C}(\text{H}_4(\text{R}))) =$	1
$\text{M}(\text{O}_2(\text{R})) =$	2
$\text{M}(\text{N}_2(\text{R})) =$	7.52
$\text{M}(\text{C}(\text{CO}_2(\text{P}))) =$	1
$\text{M}(\text{H}_2\text{O}(\text{P})) =$	2
$\text{M}(\text{O}_2(\text{P})) =$	0
$\text{M}(\text{N}_2(\text{P})) =$	7.52



Compuestos que intervienen en la reacción de combustión

	A	B	C	D	Cp(liq)
CpC <sub>14</sub> =	4.75	1.20E-02	3.03E-06	-2.63E-09	
CpO <sub>2</sub> =	6.732	1.51E-03	-1.79E-07		
CpN <sub>2</sub> =	6.529	1.49E-03	-2.27E-07		
CpCO <sub>2</sub> =	18.036	-4.47E-05	-1.58E+02		
CpH <sub>2</sub> O=	6.97	3.46E-03	-4.83E-07		18.04
Cp (CO <sub>2</sub> )=	0.235	6.23E-05	4443.2		
Cp <sub>X</sub> =A <sub>X</sub> + B <sub>X</sub> T + C <sub>X</sub> T <sup>2</sup> + D <sub>X</sub> T <sup>3</sup>					
					cal/gmol °K

% Exceso de aire

21% O<sub>2</sub>(R); 79% N<sub>2</sub>(R) = 0%

2.0.- Cálculo del calor de reacción

$$\Delta H_R^\circ(T^\circ) = \sum \pi \Delta H_f^\circ \text{ PRODUCTOS} - \sum \pi \Delta H_f^\circ \text{ REACTIVOS}$$

$$\Delta H_R^\circ(T^\circ) = -13389.76989 \text{ BTU/lb}$$

$$\Delta H_R^\circ(T^\circ) = -7.438761048 \text{ kcal/g}$$

3.0.- Cálculo del calor de los gases de combustión

$$\Delta H_c(T) = Cp\Delta T$$

$$\Delta H_{RcH_4} = 32.878151 \text{ kcal/g}$$

$$\Delta H_{RO_2} = 0.000000 \text{ kcal/g}$$

$$\Delta H_{RN_2} = 4.067470 \text{ kcal/g}$$

$$\Delta H_{RCO_2} = 0.013619 \text{ kcal/g}$$

$$\Delta H_{RH_2O} = 3.357766 \text{ kcal/g}$$

$$\Delta H_c(T) = 7.438855 \text{ kcal/g}$$

$$\Delta H_{cH_4} = 59180.67208 \text{ BTU/lb}$$

$$\Delta H_{O_2} = 0 \text{ BTU/lb}$$

$$\Delta H_{N_2} = 7321.445893 \text{ BTU/lb}$$

$$\Delta H_{CO_2} = 24.51490021 \text{ BTU/lb}$$

$$\Delta H_{H_2O} = 6043.978064 \text{ BTU/lb}$$

$$\Delta H_c(T) = 13389.93886 \text{ BTU/lb}$$

$$\Delta H_c = MCO_2 \cdot CpCO_2(T_f - T_0) + MH_2O \cdot CpH_2O(T_f - T_0) + MO_2 \cdot CpO_2(T_f - T_0) + MN_2 \cdot CpN_2(T_f - T_0)$$

Despejando la temperatura de flama: T<sub>f</sub>

$$T_f = [(\Delta H_R) / (MCO_2 \cdot CpCO_2 + MH_2O \cdot CpH_2O + MO_2 \cdot CpO_2 + MN_2 \cdot CpN_2) + T_0]$$

4.0.- Calculando la temperatura de flama: T<sub>f</sub>

Temperatura de entrada de combustible

$$T^\circ = 77 \text{ }^\circ\text{F} \quad 298 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_f = ?$$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Considerando la entalpía del aire con una T de precalentamiento

Temperatura de entrada del aire  
 $T_A = 77 \text{ }^\circ\text{F} = 298 \text{ }^\circ\text{K}$

$T_p$ : Temperatura de precalentamiento  
 $T_p = [^\circ\text{K}] = 77 \text{ }^\circ\text{F} = 298 \text{ }^\circ\text{K}$

Entalpía de aire  
 $\Delta H_{RO_2} = 0.000000 \text{ kcal/mol}$   
 $\Delta H_{R_{N_2}} = 0.000000 \text{ kcal/mol}$   
 $\Delta H_{AIRE}(T) = 0.000000 \text{ kcal/g} = 0 \text{ BTU/lb}$

$Q_{COMBUST} = 7.438761 \text{ kcal/g} = 13389.770 \text{ BTU/lb}$

Podemos obtener una aproximación directa para mejorar la iteración  
 $T_f = 2429.746824 \text{ }^\circ\text{K}$

Apoyándonos en la función objetivo

La  $T_f$  será cuando

$$\Delta H_R(T^\circ) - \Delta H_C(T_f) = 0 \quad \Delta H_R(T^\circ) = \Delta H_C(T_f) - 0.000094$$

$T_f$ : Temperatura de flama:  $T_f$

$T_f = 2200.329625 \text{ }^\circ\text{K} = 3501.193325 \text{ }^\circ\text{F}$

Temperatura de los gases de salida

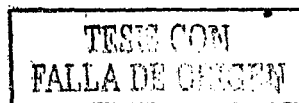
$T_g = 2300 \text{ }^\circ\text{F}$

\*\*\*\*\*

RESUMEN

Combustible	Gas Natural		
Por ciento de exceso de aire		% exceso	0%
Temperatura de flama		$T_f$	3501.193325 $^\circ\text{F}$
Calor del precalentamiento		$\Delta H_{AIRE}(T)$	0.000000 BTU/lb
Calor del combustible		$Q_{COMBUST}$	13389.76989 BTU/lb
Eficiencia del equipo de intercambio de calor		$\eta$	35.08%

\*\*\*\*\*



CAPÍTULO V.  
APLICACIÓN PRÁCTICA A UN HORNO CALCINADOR

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## CAPITULO V. APLICACIÓN PRÁCTICA EN UN HORNO CALCINADOR

Este último capítulo esta dedicado a la descripción de un caso en particular en la que se utiliza un recuperador de calor como equipo para ahorrar energía, ya que la única forma de observar si en realidad este puede ser un mecanismo para lo que se viene proponiendo en la conservación de energía o su uso eficiente es plantearlo en forma práctica.

### 5. Antecedentes del sistema del caso de estudio.

La firma industrial es en este caso la empresa Yeso Panamericano S. A de C. V. en la cual hace algunos años su horno calcinador solo contaba con una chimenea que ventaba al ambiente los gases de combustión a la salida de la misma. Sin embargo la conciencia que tomó la empresa con respecto a la cantidad de energía que se estaba perdiendo en los gases de salida además de la preocupación por la contaminación generada, llevó a la empresa a tomar la decisión de colocar un recuperador de calor hecho y diseñado específicamente para la aplicación del horno de calcinación. El recuperador se diseño en la compañía MAROCO S.A.

El recuperador extrae energía de los gases calientes de salida y transfiere esta energía recuperada al aire de entrada (por lo general a temperatura ambiente). Al comparar ciclos y cargas después de haber instalado el recuperador podrían medir directamente el efecto del recuperador. El primer cambio en el que se pensó únicamente fue el colocar el recuperador de calor (con las conexiones necesarias por supuesto) y pedir una cotización preliminar.

Sin embargo, como ya se mencionó un recuperador la mayoría de las veces implica gastos extras, debido a que con frecuencia se requiere del cambio o adaptación de otros componentes del sistema. En este caso el quemador fue el que inicialmente se pensó en modificar únicamente a las nuevas condiciones de operación que tendría el horno con esta recuperación de calor, para que no se afectará su capacidad, ya que al aumentar la temperatura del aire es necesario compensar el aumento en volumen, de lo contrario la capacidad del quemador se vería disminuida, pero mas adelante, se tomó la decisión de construir un nuevo quemador que brindara las condiciones de trabajo ideales tomando en cuenta el recuperador en este nuevo diseño.

#### 5.1 Descripción el sistema de la firma industrial.

Por las condiciones en que se encontraba el horno el cual tiene una geometría cilíndrica se consideró un recuperador que tuviera la misma forma y que se montara prácticamente por encima del horno. En el tercer capítulo se especificó que uno de los recuperadores que tienen un diseño compacto y nos presentan un montaje sencillo son los recuperadores tipo intercambiador (del tipo tubos y coraza) por lo que decidió basar el diseño en un recuperador de este tipo.

Otra de las cuestiones a considerar es el tipo de flujo que se va a tener, en el caso de los gases de combustión sabemos que al ser menos densos que el aire tienden a subir por lo que estos se moverán siempre en un sentido vertical y por consideraciones de diseño estos se desplazarán dentro de los tubos, así que el único criterio que se tenía que especificar era el tipo de flujo por el lado de la coraza, sabemos que los tipos de flujo que logran una mayor transferencia de calor es el flujo cruzado y el flujo a contracorriente.

Las dificultades para este caso era la altura del horno que sumada con la del recuperador no permitiría devolver una gran transferencia de calor al tener una salida de aire por la parte superior del recuperador ya que en una mayor longitud de tubería perderíamos una cantidad de calor considerable, (además de que es deseable el mayor tiempo de contacto entre los fluidos frío y caliente). Tomando en cuenta que las temperaturas de operación del recuperador no son muy elevadas, la entrada y salida quedaron en la parte inferior del recuperador, adicionando dentro de la coraza una mampara longitudinal que nos permitiera tener un recorrido más grande por parte del aire, y con esto un mayor intercambio de calor.

Por lo que la trayectoria indica que el recuperador tendrá un paso por los tubos y dos por la coraza, siendo el primer paso en flujo paralelo y el segundo paso a contracorriente por lo que el recuperador es de acuerdo a la clasificación realizada un recuperador de calor por convección con flujo en paralelo-contracorriente tipo 2-1 (dos pasos en la coraza y uno en los tubos).

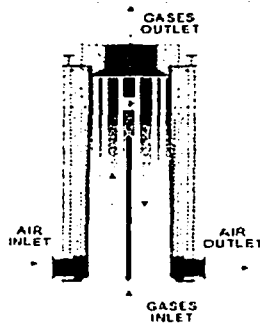


Figura 5.1.-Recuperador tipo2-1.

Aun cuando parece hasta cierto punto exagerado especificar estas tres cualidades, nos dan una idea bastante amplia de cómo trabaja el recuperador y de acuerdo a esto es como fue diseñado, es decir la manera en que se tomaron los diversos criterios para su diseño. El procedimiento de diseño térmico del recuperador comienza con la obtención de la composición en base masa de los gases de combustión a la salida del equipo de proceso, en este caso un horno de calcinación, principalmente componentes que ya conocemos de la reacción de combustión para la obtención de la temperatura de flama calculada en el capítulo anterior, observamos también en este capítulo que a mayor cantidad de exceso de aire existirá un mayor volumen lo que no es deseable térmicamente, por lo que en el diseño se tomó en cuenta en la composición un 10% de aire en exceso que permitía además en el proceso ya implementado sin el recuperador un buen rango de operación con una estabilidad de la flama adecuada.

Determinada la composición de los gases y los volúmenes de aire a manejar a las condiciones atmosféricas del lugar, (Puebla, Puebla) se determinaron los flujos máscicos de los fluidos del lado de los tubos (gases de combustión) y del lado de la coraza (aire).

También debemos conocer todas las temperaturas de entrada y salida al recuperador, las temperaturas de entrada de el aire en este caso no es a temperatura ambiente ya que viene precalentado de otra sección del proceso, esto no es mayor problema y hace que las dimensiones del recuperador sean menores por una carga térmica menor. La temperatura de los gases calientes es la proveniente del horno y la temperatura de salida de los gases de combustión tuvo que ser calculada apoyándonos en la expresión:

$$T_2 = T_1 - (M_a * C_{p_{aire}}) * (t_2 - t_1) / (M_{gc} * C_{p_{gc}})$$

El cálculo de las capacidades caloríficas se realizo con ecuaciones de n-grado a la temperatura de bulbo que se tienen del lado de los tubos y del lado de la coraza, respetando para el caso de los tubos la aportación de cada gas a la capacidad calorífica, de acuerdo con la composición máscica.

Conociendo todas las temperaturas se procedió a calcular la diferencia de temperaturas logarítmica media, por sus siglas en ingles LMTD, en la cual como ya mencionamos se tienen dos tipos de desplazamientos del lado de la coraza por lo que se tiene que calcular una LMTD para cada paso. En el caso de el flujo a contracorriente la LMTD debe ser corregida ya que se encuentran mayores diferencias de temperatura en este flujo que en paralelo el recuperador 2-1 es una combinación de ambos por lo que el factor FT, es la relación fraccionaria entre la diferencia de temperaturas verdadera y la LMTD en contracorriente y así obtenemos la verdadera diferencia de temperatura bajo estas condiciones de flujo.

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor se tuvieron que fijar el tamaño del diámetro de los tubos el cual por costo de fabricación con respecto a los espejos del recuperador se decidió que fueran de una dimensión de 2 in de diámetro nominal, ya que la coraza tuvo que ser dimensionada en base a las medidas que guardaba la chimenea que se tenía antes de la instalación del recuperador y este es un parámetro que se tuvo que dejar fijo en el diseño y no se pudo modificarse, para manipular las dimensiones a lo alto del recuperador lo que nos habría ofrecido un elemento más para una mejor propuesta.

Para comenzar el cálculo del coeficiente de película de ambos lados tanto tubos como coraza se calcularon las temperaturas de bulbo y se evaluaron las propiedades para la temperatura correspondiente, en el caso de la coraza para el aire solo se requiere buscar las propiedades del aire, pero en los tubos tenemos varios compuestos que fueron evaluados individualmente y luego se calculó la aportación de cada uno de ellos a las diferentes propiedades, obteniendo propiedades ponderadas.

En el lado de los tubos teniendo las propiedades necesarias, y calculando el área de tubo fácilmente y con la masa que fluirá en cada tubo obtenemos la masa velocidad y el siguiente paso es encontrar el número de Reynolds y de Prandtl, para calcular el coeficiente global de película del lado de los tubos.

Para el caso de la coraza ya se tienen las propiedades del aire, así como el flujo total de aire que fluirá por la coraza, pero el problema en este punto es determinar el área de flujo dentro de la coraza, ya que en un intercambiador de tubos y coraza el área de flujo de coraza se calcula de acuerdo al número de tubos, el diámetro límite exterior del haz de tubos y el espaciamiento central entre mamparas variable que en este caso no tenemos, por lo que el cálculo para el área de coraza lo obtenemos de realizar una analogía entre este cambiador con un intercambiador de doble tubo o al igual que se hace con un recuperador de tipo tubo con un tipo jaula el cual tomamos el área de todos los tubos como el único tubo.

Por lo anterior calculamos el diámetro de la coraza como un diámetro equivalente este diámetro es el que introduciremos en la fórmula para el cálculo del coeficiente de película de coraza. Primero debemos calcular el perímetro húmedo (es la suma de las circunferencias exteriores de los tubos que están en contacto con el fluido del ánulo (coraza), y después el área de flujo de coraza que la calculamos como el área total de coraza menos el área ocupada por los tubos, con este perímetro y esta área calculamos el radio hidráulico y este radio multiplicado por cuatro es la definición de nuestro diámetro equivalente.

Con el área de flujo de coraza podemos calcular la masa velocidad para el aire y con todos los datos obtener el Reynolds y el Prandtl más el diámetro equivalente podemos obtener el coeficiente de película del lado de la coraza.

Con los coeficientes de película de los dos lados, tubos y coraza, podemos calcular el coeficiente global de transferencia,  $U_c$ ; que se evalúa despreciando la resistencia que presenta la pared del tubo. Considerando un factor de obstrucción (por ensuciamiento del recuperador a través de su uso),  $R_d$ ; podemos evaluar el coeficiente global de diseño,  $U_d$ .

Una vez obtenido el coeficiente global de transferencia de calor de diseño, apoyados en la ecuación de Fourier, obtendremos el área de transferencia de calor requerida, dicho de otra manera el área en la que existirá un intercambio de calor de el fluido frío y el fluido caliente que es en este caso el área exterior de todos los tubos dentro de la coraza. Por lo que calculamos el largo que debería tener ese tubo para obtener el área requerida (lógicamente con la fórmula del área del tubo) y esta área dividida entre el número de tubos nos da finalmente la especificación del largo de los tubos que debe tener el recuperador.

Todo esto sirvió para obtener las dimensiones y valores faltantes en el diseño del recuperador lo que concluye la primera parte del diseño, pero esta parte es en el aspecto térmico, debemos asegurarnos, que hidráulicamente esto funciona ya que una caída de presión muy elevada costos de operación altos como pérdidas por fricción, por lo que también se realiza el cálculo de esta caída de presión por el lado de los tubos, como por el lado de la coraza.

La caída de presión se realiza calculando las pérdidas por fricción para ambos lados del recuperador utilizando la ecuación de Fanning, para encontrar este factor debemos utilizar el número de Reynolds en cada lado, el cual ya se había utilizado para cálculos anteriores, por lo que podemos calcular este factor de fricción sin ningún problema.

Para el lado de los tubos conocemos los valores para la longitud del recorrido, volumen real del gas y el diámetro interior del tubo, solo falta evaluar la densidad de los gases, pero contamos con el flujo volumétrico a condiciones reales de presión y temperatura, y con el flujo másico de estos gases, con lo que podemos calcular esta densidad de los gases y posteriormente con todos los datos calcular la caída de presión en el lado de los tubos.

Para el lado de la coraza, conociendo el diámetro interior de la coraza, Número de deflectores, Diámetro equivalente, Aceleración de la gravedad, y el número de deflectores (que en este caso no tenemos), calculando la densidad como en el caso de los tubos, y también la masa velocidad que ya conocíamos, además del factor de fricción, calculamos la caída de presión del lado de la coraza.

Si estas caídas de presión hubieran excedido los límites permitidos se podrían realizar los cambios propuestos en el capítulo anterior, considerados en los criterios de diseño, es costumbre diseñar con caídas de presión máximas de aproximadamente 6" C.A. (columna de agua para el caso de los gases por lo que tomamos esto como nuestro límite permitido, al no superar estos límites, damos por concluido el diseño hidráulico del recuperador.

Una vez concluido el diseño del recuperador la decisión sobre la inversión es simple ¿debe comprarse el equipo o no?, como mencionamos al final del capítulo anterior las opciones para una propuesta diferente están limitadas por varios aspectos del proceso existente como la forma geométrica, condiciones de proceso, dificultad en la fabricación de partes, y en este punto la pregunta es solamente comprar o no el equipo calculado, por lo que debemos hacer una cotización del equipo diseñado.

### 5.1.1 Cotización del recuperador de calor.

La cotización inicial del recuperador se hizo tomando en cuenta los siguientes aspectos:

#### 1.-Suministro de una unidad intercambiadora de calor.

##### 1.1 Características generales del recuperador de calor.

1.2 Unidad intercambiadora: La unidad consta de dos espejos para los tubos y dos registros de limpieza. La transferencia de calor se efectuará a través de tubos, que serán hechos de lámina C.R. doblada.

1.3 Materiales de construcción: La unidad intercambiadora se colocará en su chimenea, la carcasa se construirá de placa C.R. de 3/16" de espesor en el exterior y un foil de lámina C.R., cal. 22 en el interior, las cuales contendrán 2" de espesor de lana cerámica calidad LT. Serán dos carretes de 1200 mm de altura cada uno y se ensamblarán entre sí y con la chimenea por medio de bridas hechas de ángulo estructural rolado.

Los tubos de la unidad serán de 3" de diámetro ced. 10. de acero al carbón. Cada carrete contará con 43 tubos.

Los tubos se soportarán por medio de bridas hechas de placa C.R. de 1/4" de espesor.

Para unir la unidad a la chimenea se adaptarán una expansión y una reducción, ambas construidas en lámina C.R. cal. 16.

II.-Ductería para el aire de combustión

En esta cotización se están considerando 20.0 m de ducto de 10 pulg. de diámetro para el aire de combustión, incluye los cambios de dirección e interconexión entre los dos carretes. Esta ductería será construida con lámina C.R. cal. 16 y las secciones serán unidas con bridas hechas de placa C.R. de 1/4" de espesor.

III.-Corte de la chimenea actual

Es necesario para instalar la unidad y acoplarla a la chimenea, cortar esta última y soldarle la expansión y reducción requeridas.

Tabla 5.1 Características finales para cotización del recuperador de calor

Característica	Dimensión
Tipo de unidad	Paralelo-Contracor.
Temperatura máxima de operación	335°C
Medio de calentamiento	Gas natural.
Máximo calor transferido	383,388 BTU/hr
Características del aire manejado.	
Volumen de aire	4,750 CFM
Temperatura del aire	221 °F
Características del gas manejado.	
Volumen de gas	5,852CFM
Temperatura del gas	558 °F
Dimensiones del intercambiador aproximadas	
Largo exterior	4,267 mm
Ancho exterior	mm
Altura exterior	610 mm
Espesor de aislamiento	2 pulg.

Una vez determinados los costos que implica el adquirir e instalar el recuperador podemos analizar cuál será la rentabilidad del proyecto, así como verificar si existe el costo-beneficio que presenta el proyecto propuesto.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.2 Análisis de la inversión en el recuperador de calor.

La energía que se liberaba a la atmósfera antes de la colocación del recuperador ya había sido pagada y económicamente no es deseable descartar esta energía sino hasta que se haya extraído el último centavo tanto como sea posible. Termodinámicamente no podemos aprovechar toda la energía suministrada lo que implica una pérdida no solo de energía sino de capital, una porción puede ser recuperada con nuestro equipo propuesto, además, que los recuperadores pueden satisfacer cualquier requerimiento de energía a una temperatura superior a 200°F.

Es necesario identificar los usos posibles para la energía llamada de desperdicio: hacer un análisis económico de los costos y ahorros involucrados en cada una de las diferentes opciones y decidir entre estas sobre una base de la economía lograda en cada una. Una alternativa importante en cada caso es rechazar todas las opciones si ninguna resultara económica.

Los usos posibles para la recuperación de calor son varios podemos precalentar el aire, o agua de proceso o uso de instalaciones, para nuestro caso de estudio se precalentó el aire de combustión, y las temperaturas no son lo demasiado altas para calentar agua y trasladarla a otro lado de la planta. En vista de que el aire precalentado requiere menos combustible para producir la misma cantidad de calor se tiene como resultado un ahorro de combustible directo. Los beneficios de la instalación de un recuperador en el aspecto económico son mencionados en el primer capítulo y resumidos en la tabla 1.5.

El primer paso para pensar si podemos desarrollar la idea de colocar un recuperador de calor en un equipo o equipos térmicos es, una vez verificada la disponibilidad de calor ya mencionado anteriormente tener los recursos o poder conseguirlos para la compra del equipo.

Una cotización nos da una aproximación muy buena del costo de la inversión del equipo, y nos da además una visión de los costos con los cambios necesarios a considerar con la instalación de este equipo para mejorar el proceso que también tendrán que pagarse. Con la cotización (que obviamente también tiene un costo) obtendremos el costo total de los diferentes apartados, ya contemplados, y considerando costos no cubiertos en la cotización como transportación y viáticos de la gente que instalará el equipo así como la transportación del equipo mismo.

Ya que consideramos el costo del activo fijo que en este caso es uno solo (el recuperador), siempre en todo proyecto se busca medir si obtendremos algún beneficio económico de la realización del proyecto y es a final de cuentas el objetivo fundamental que se persigue ver si la instalación de un recuperador de calor es factible desde el punto de vista económico que es como se justifica un proyecto pero sin perder de vista que, como ya revisamos implica mucho más que un simple ahorro de capital.

En este caso para el proyecto de un horno de calcinación que no presenta temperaturas muy elevadas en los gases de salida, puede ser interesante observar que, si el proyecto a pesar de estas condiciones es viable, con un proceso que presente condiciones de mayor transferencia de calor el impacto de ahorro de combustible será más grande. Pero calculemos en primer lugar la viabilidad de nuestro caso de estudio.

Existen métodos de análisis que toman en consideración los costos y los beneficios totales a lo largo de la vida de la inversión y la programación de movimientos. Los métodos de este tipo son el método de los beneficios netos a valor presente.

La inversión en los sistemas de recuperación de calor de desperdicio, como muchas inversiones de capital requerirá generalmente de numerosos costos, distribuidos a lo largo de un determinado periodo de tiempo y resultará como ya mencionamos en un ahorro de costos también extendidos en el tiempo. Para evaluar correctamente la utilidad de estas inversiones, es necesario convertir estas erogaciones o recepciones a una base común ya que el capital gastado o recibido en diferentes periodos de tiempo no tiene valores iguales.

Los movimientos de efectivo que ocurren en diferentes tiempos se pueden convertir a una base común; es decir se descuentan por medio de fórmulas conocidas como de descuento, los precios de la cotización son considerados en el primer periodo de tiempo o mejor dicho en el periodo preoperatorio, por lo que los costos son valores presentes, sin embargo para los demás puntos en el cálculo económico se encuentran en un periodo distinto de tiempo.

La memoria de cálculo para obtener los costos-beneficios del proyecto para instalar el recuperador de calor parte del cálculo de la inversión, basada en las partidas ya mencionadas, para calcular los ingresos existe solamente una fuente, que es el ahorro de combustible que de otra manera tendríamos que comprar, para obtener la cantidad de combustible ahorrado, hacemos uso de la cantidad de calor contenida en el aire precalentado, este calor remplazara por así decirlo a la cantidad de calor que tendríamos que introducir al horno por la combustión del gas natural (combustible en el que se basó el análisis).

Sabemos que el gas natural produce aproximadamente  $1000 \text{ BTU}/\text{ft}^3$  por su poder calorífico, y que el calor contenido en el flujo de aire precalentado es de  $383,388 \text{ BTU}/\text{hr}$ , por lo tanto podemos (hablando en términos térmicos) obtener la cantidad de  $\text{ft}^3/\text{hr}$  de combustible que no está siendo consumido, dicho en otras palabras ese calor que contiene el aire precalentado es la cantidad de calor equivalente a cierto calor contenido en un volumen de gas natural, por lo que podemos tomar ese flujo de calor del aire como un flujo de calor de combustible, y conociendo el precio del gas natural en unidades de  $\$/\text{ft}^3$  obtendremos el flujo de ahorro de combustible en términos de  $\$/\text{hr}$ .

El cálculo del combustible ahorrado anualmente se calcula con las horas en las que se encuentra el equipo en funcionamiento, el recuperador depende del tiempo de producción que tenga el horno calcinador ya que serán las horas que entre en función el recuperador, siendo en este caso una operación continua de 24 horas al día, así que el recuperador siempre estará en uso. Ahora podemos calcular el ingreso anual de ahorro de combustible para cada año a lo largo de la vida del proyecto (10 años).



Para realizar un estado de resultados del recuperador propuesto y obtener la utilidad neta del proyecto no solamente se toman en cuenta el costo del equipo y el ingreso que estamos obteniendo, hacen falta calcular los costos como los son el mantenimiento tanto preventivo como correctivo, aún cuando ya hemos dicho que los costos de mantenimiento se reducen en los hornos por quemadores más limpios y que el mantenimiento de el recuperador es muy bajo, etc. debe tomarse en cuenta, de lo contrario se corren riesgo sobre todo si pedimos un préstamo para la obtención del recuperador y después tenemos que desembolsar una cantidad considerable sobre todo con un mantenimiento correctivo.

El mantenimiento preventivo entra dentro de la categoría de costo fijo ya que es la revisión que hacemos anualmente a la unidad y que ya esta programada, por el contrario el mantenimiento correctivo no sabemos cuando pueda surgir, por lo que se toma como un costo variable pero con una cantidad igual para todos los años del proyecto. Otro de los costos variables es la depreciación y la amortización, las cuales impactan directamente en el valor y precio del equipo e instalaciones hechas para este, como en este caso se calcularon todos los bienes (activos) en forma global podemos de igual forma calcular la depreciación y la amortización. Ya podemos calcular con esto los ingresos totales y los costos totales, y obtener la utilidad de operación, con el valor del impuesto que se debe pagar por la ganancia obtenida por el equipo, y considerando que al obtener una utilidad esta debe ser repartida entre los trabajadores de la firma industrial, debemos terminar el estado de resultados calculando finalmente la utilidad neta.

La segunda etapa del análisis económico consiste en realizar un balance de flujo de efectivo en el cual se incluyen la utilidad neta la depreciación y amortización y el valor de rescate que no es más que el valor que tendrá el equipo una vez terminada la vida del proyecto. Todos estos puntos anteriores representan las entradas del proyecto, las salidas serán la inversión y la reposición de activos que sería reponer válvulas, tuberías, etc. Con las entradas y salidas obtenemos el flujo de efectivo a lo largo de la vida del proyecto.

Finalmente calculamos el valor presente neto con los valores de flujo de efectivo para tener los ingresos en una base común y observar la cantidad de capital en valor presente que vamos a recuperar, además que observando que en los tres primeros años tenemos un flujo de efectivo negativo lo cual indica que en estos años no tenemos ganancia y empezamos a recuperar el capital hasta el cuarto año.

El método que nos ofrece la forma de medir si el proyecto es factible o no es el método de recuperación que determina el número de años requeridos para el capital invertido sea cubierto por los beneficios resultantes. Este número de años recibe el nombre de periodo de recuperación.

Podemos evaluar con facilidad este método calculando los costos de la inversión entre los beneficios anuales menos los costos anuales. La fórmula trata de darnos es el tiempo en que se tardan los beneficios en cubrir el monto de la inversión, pero este método tiene la desventaja que solo mide los parámetros sin tomar en cuenta mantenimientos, amortización utilidad, etc. si realizamos el método tal cual tendríamos:

$$\text{Periodo de recuperación} = \frac{\text{Costo de la inversión}}{\text{Beneficios anuales} - \text{Costos anuales}}$$

Lo cual nos daría un periodo de recuperación de 1.3 años y observando la tabla de valor presente nos damos cuenta que el periodo de recuperación se encuentra en el primer trimestre del tercer año de operación, por lo que no todos los métodos para medir el tiempo de recuperación indican una buena inversión.

El capital recuperado es más del doble del capital invertido por lo que la rentabilidad del proyecto quede demostrada de una manera muy evidente además que el tiempo de recuperación recomendado es aquel que no sea mayor a los tres años después del inicio de operación del proyecto, aquí, las ganancias se presentan en el cuarto año de vida del proyecto y esto implica tranquilidad en los dueños de la firma y da la confianza de invertir en proyectos de este tipo basados en el ahorro de energía a través de la recuperación de calor.

Debemos aclarar que los precios que se establecieron en la cotización fueron sin IVA (impuesto al valor agregado), pero este se tomó al realizar la suma total, de igual forma en el precio del combustible se tomo en cuenta el IVA, en este punto no se tiene un gran problema ya que en nuestro país el valor agregado no cambia comúnmente.

En lo que se refiere a la inflación, por supuesto alterará el resultado obtenido que se calculó no tomando en cuenta este aspecto, sin embargo el aumento de la inflación indicará también un aumento en el costo del combustible; no queremos decir con esto que los costos del combustible variarán proporcionalmente con la inflación.

Tal vez pueda presentarse el caso que los combustibles aumenten su precio más que el aumento de inflación, como generalmente pasa, en la actualidad se maneja un valor de inflación bajo, sin embargo los precios de la energía (electricidad, gasolina etc.) aumentan mensualmente en una proporción mayor, esto implicará un mayor flujo de efectivo (aún descontando el porcentaje de inflación) y el proyecto tendrá una mayor validez.

Si sucediera lo contrario como también recientemente sucedió el año pasado (2001) puede darse el caso que durante algunos meses baje el precio del combustible (que es muy extraño por todas las razones dadas de dificultad de obtención de las fuentes energéticas manifestadas en el primer capítulo) como sucedió con el gas doméstico (L.P.), aquí sí se afectará el flujo de efectivo disminuyendo la entrada que esperábamos, pero mantendremos la cantidad de volumen ahorrado, además que el combustible que entra al horno también será más barato por lo que tampoco estaremos teniendo una pérdida considerable.

Este último escenario es muy improbable en realidad, dado que, como ya vimos la necesidad de ahorrar energía surgió precisamente de la curva creciente en los precios de los combustibles, y lo mas probable es que los precios aumenten cada vez más mientras no se este dispuesto a realizar una reforma energética que involucre las fuentes alternativas y entre ellas la que tenemos más a la mano es la **energía de conservación**.

Los riesgos que se asumen a la hora de invertir en un proyecto de ahorro de energía en un recuperador de calor son casi nulos y la rentabilidad del proyecto es muy aceptable, pero es una consecuencia que beneficia no solo a unos cuantos como son: el o los dueños y los trabajadores (que obtienen cierta utilidad) sino la población en general, dado que hay beneficios que no se pueden evaluar directamente, como es el tener menores emisiones a la atmósfera. Es cierto que la ingeniería es responsable de hacer proyectos factibles y rentables, pero también lo es de cuidar los recursos que no cuidó durante mucho tiempo y que pensó que no se acabarían. Lo más importante es todo lo que conlleva el ahorro de la energía, un beneficio para todas las personas con el cuidado y mejor uso de los recursos aún disponibles.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

PROYECTO: ANALISIS DE AHORRO DE ENERGIA MEDIANTE EL USO DE RECUPERADORES.

MEMORIA DE CALCULO. RECUPERADOR DE CALOR

DESARROLLADO POR: HERRERA TOLEDO RODOLFO ALBERTO

1.0 DATOS

Presión barométrica: 0.7696 atm

1.1 Flujos Másicos

Gases de Combustión (Se quema gas natural):

Volumen real: 352320 CFH = 5872 CFM  
 Temperatura: 292 °C = 557.6 °F  
 Volumen corregido: 131014 CFH = 2184 CFM

Composición (Estimando base seca		10.0% xs aire) en % mol:	
		base húmeda	bh % masa
CO2 :	10.9%	9.1%	14.3%
H2O :	20.3%	16.9%	10.9%
N2 :	87.0%	72.3%	72.8%
O2 :	2.1%	1.7%	2.0%
Total :	100.0%	100.0%	100.0%

Peso molecular promedio: 27.8 lb/lbmol

Gasto másico (Mgc): 10158 lb/hr

Aire de Combustión:

Volumen real: 285000 CFH = 4750 CFM  
 Temperatura: 30 °C = 86 °F  
 Volumen corregido: 197620 CFH = 3294 CFM

Gasto másico de aire (Ma): 15854 lb/hr

1.2 Temperaturas

Temperatura entrada gases de comb.	$T_1 =$	292 °C =	558 °F
Temperatura de salida gases de comb.	$T_2 = ?$	°C =	? °F
	$(T_1 - T_2) = ?$	°C =	? °F
Temperatura de entrada aire de comb.	$t_1 =$	105 °C =	221 °F
Temperatura de salida aire de comb.	$t_2 =$	160 °C =	320 °F
	$(t_2 - t_1) =$	55 °C =	99 °F

2.0 BALANCE TERMICO

Cp de los gases involucrados.

(Cp en cal/g K; T en K)

$$Cp_x = A_x + B_x T + C_x T^2 + D_x T^3$$

	A	B	C	D
$Cp_{O_2} =$	6.713	-8.79E-07	4.17E-06	-2.54E-09
$Cp_{N_2} =$	7.44	-3.24E-03	6.40E-06	-2.79E-09
$Cp_{CO_2} =$	4.728	1.75E-02	-1.34E-05	4.10E-09
$Cp_{H_2O} =$	7.701	4.60E-04	2.25E-06	-8.59E-10

Para el cálculo de las capacidades caloríficas se emplea una temperatura promedio en el intervalo involucrado.

Para el aire se toma una T = 405.5 K

Para los gases de Combustión T = 282.5 K

Considerando los % en masa, se tiene:  
(1 cal/g K = 1 BTU/lb °F)

$$Cp(\text{aire}) = 0.244250 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}$$

$$Cp(\text{gases comb}) = 0.259970 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}$$

Para encontrar la temperatura de salida de los gases de combustión, de manera ta que el aire se caliente hasta 160 °C, se procede de la siguiente manera:

$$T_2 = T_1 - (M_a \times Cp(\text{aire}) \times (t_2 - t_1)) / (M_g \times Cp(\text{gases comb}))$$

$$T_2 = 412 \text{ } ^\circ\text{F} = 211 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los gases de combustión alcanzarán una temperatura de 211 °C

3.0 CALCULO DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA LOGARITMICA MEDIA (LMTD).

Para el flujo a contracorriente se tiene:

$$LMTD = (T_1 - t_2) - (T_2 - t_1) / \ln((T_1 - t_2) / (T_2 - t_1))$$

Calculo de FT para corregir LMTD  $f(R,S)$

Se tiene:

$$R = 1.466380633$$

$$T_1 = 292 \text{ } ^\circ\text{C} = 558 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$S = 0.294117647$$

$$T_2 = 211 \text{ } ^\circ\text{C} = 412 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$FT = 0.944996857$$

$$t_1 = 105 \text{ } ^\circ\text{C} = 221 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_2 = 160 \text{ } ^\circ\text{C} = 320 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$LMTD = 119 \text{ } ^\circ\text{C} =$$

$$214 \text{ } ^\circ\text{F A CONTRACORRIENTE}$$

$$105 \text{ } ^\circ\text{C} =$$

$$189 \text{ } ^\circ\text{F EN PARALELO}$$

$$DT = LMTD * F \quad DT = 112 \text{ } ^\circ\text{C} =$$

$$202 \text{ } ^\circ\text{F A CONTRACORRIENTE}$$

4.0 CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

4.1 Evaluación del coeficiente de película en el lado de los tubos.

(Por los tubos fluirán los gases de combustión)

$$h_i = 0.027 \times (k/D) \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33}$$

donde:

k = Conductividad térmica, BTU/hr ft °F

D = Diámetro interior del tubo, ft

Re = Número de Reynolds =  $DG/\mu$

G = Masa velocidad en el tubo, lb/hr ft<sup>2</sup>

$\mu$  = Viscosidad del fluido, lb/ft hr

Pr =  $\text{randtl} = C_p\mu/k$

Cp = Capacidad calorífica del fluido, BTU/lb °F

Se considera emplear  
en cédula 40

43 tubos de

2.00 " diám. nominal

Ntubos = 43

2.00 " diám. externo

1.78 " diám. interno

Por lo tanto D =

$$1.78 \text{ " } =$$

$$0.149 \text{ ft}$$

DE =

$$2.00 \text{ " } =$$

$$0.167 \text{ ft}$$

D = DI =

$$1.78 \text{ " } =$$

$$0.149 \text{ ft}$$

La masa total de gases que fluirán por lo tubos es:

$$M_{gc} = 10158 \text{ lb/hr}$$

La masa en cada tubo será:

$$M_{gca} = 236.2 \text{ lb/hr}$$

El área de flujo por tubo es:

$$A_1 = (\pi/4) \times D^2 = 0.017 \text{ ft}^2$$

La masa velocidad será:

$$G_{gc} = M_{gca}/A_1 = 13639 \text{ lb/hr ft}^2$$

Ahora se calcula el Número de Reynolds Re

Para conocer  $\mu$ , se calcula un promedio ponderado

	$\mu$ , lb/hr ft	bh % masa
CO <sub>2</sub> :	0.0581	14.3%
H <sub>2</sub> O :	0.0436	10.9%
N <sub>2</sub> :	0.0653	72.8%
O <sub>2</sub> :	0.0726	2.0%

$$\mu_{gc} = 0.0621 \text{ BTU/hr ft } ^\circ\text{F}$$

$$Re = D G_{gc} / \mu_{gc}$$

$$Re = 32629$$

Para calcular el Número de Prandtl se procede como sigue:

Para conocer k, se calcula un promedio ponderado

	k, BTU/hr ft °F	bh % masa
CO <sub>2</sub> :	0.0181	14.3%
H <sub>2</sub> O :	0.0187	10.9%
N <sub>2</sub> :	0.0180	72.8%
O <sub>2</sub> :	0.0185	2.0%

$$k_{gc} = 0.0181 \text{ BTU/hr ft } ^\circ\text{F}$$

El valor de  $C_p$  para los gases de combustión se evaluó en el balance térmico y tiene un valor de :

$$C_{p_{gc}} = 0.260 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}$$

$$Pr = C_{p_{gc}} \mu_{gc} / k_{gc} \quad Pr = 0.892$$

Con todos los parámetros evaluados anteriormente, se puede calcular el coeficiente de película para el lado de los tubos:

$$h_i = 0.027 \times (k/D) \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33}$$

$$k = k_{gc} = 0.0181 \text{ BTU/hr ft } ^\circ\text{F}$$

$$D = 0.149 \text{ ft}$$

$$Re = 32629$$

$$Pr = 0.891514355$$

$$h_i = 12.930 \text{ BTU/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Corrigiendo el coeficiente de película para que esté referido al área de la parte exterior del tubo (ya que se evalúa referido a la parte interna) se tiene:

$$h_{io} = h_i (D_i/D_e)$$

\*\*\*\*\*

$$h_{io} = 11.521 \text{ BTU/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

\*\*\*\*\*

#### 4.2 Evaluación del coeficiente de película en el lado de la coraza.

$$h_o = 0.027 \times (k/D) \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33}$$

En este caso es necesario evaluar un diámetro equivalente  $D_e$ , y utilizarlo en lugar de  $D$

$$D_e = 4 r_h$$

$$r_h = \text{radio hidráulico} = \text{área de flujo/perímetro húmedo} \\ = A_{fc}/Ph$$

El perímetro húmedo ( $Ph$ ) es la suma de las circunferencias exteriores de los tubos que están en contacto con el fluido del ánulo (coraza)



$$D_{int} (\text{coraza}) = D_s \quad 495 \text{ mm} = \quad 1.62 \text{ ft}$$

$$A_{fc} = (\pi/4) * (D_{int})^2 - N_{tubos} * (\pi/4) * DE^2$$

$$= \quad 1.13 \quad \text{ft}^2$$

$$Ph = \quad N_{tubos} * \pi * DE \quad = \quad 22.5 \quad \text{ft}$$

Por lo tanto

$$De = \quad 0.201 \quad \text{ft}$$

Ahora se procede a calcular la masa velocidad

La masa total de aire que fluirá por la coraza es:

$$Ma = \quad 15854 \text{ lb/hr}$$

La masa velocidad para el aire es:

$$Ga = Ma/A_{fc} \quad Ga = \quad 13989 \text{ lb/hr ft}^2$$

Para el aire se tienen los siguientes datos (temperatura promedio):

$$\mu_a = \quad 0.0508 \text{ lb/ft hr}$$

$$k_a = \quad 0.0226 \text{ BTU/hr ft } ^\circ\text{F}$$

$$C_{pa} = \quad 0.244 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}$$

Con los datos anteriores se pueden evaluar Re y Pr

$$Re = Ga De / \mu_a \quad Re = 55423$$

$$Pr = C_{pa} \mu_a / k_a \quad Pr = 0.549$$

Ahora es posible evaluar, ho

$$ho = 0.027 \times (k/D) \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33}$$

\*\*\*\*\*

$$ho = \quad 15.479 \text{ BTU/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

\*\*\*\*\*

El coeficiente global de transferencia de calor  $U_c$ , se evalúa como sigue:  
(despreciando la resistencia de la pared del tubo)

$$U_c = h_{io} \times h_o / (h_{io} + h_o)$$



\* \*\*\*\*\* \*  
 \* U<sub>c</sub> = 6.605 BTU/hr ft<sup>2</sup> °F \*  
 \* \*\*\*\*\* \*

Considerando el factor de obstrucción R<sub>d</sub>, se evalúa un coeficiente global de diseño U<sub>d</sub>, que toma en cuenta el ensuciamiento de las paredes de los tubos a través de los cuales se lleva a cabo la transferencia de calor.

$$1/U_d = 1/U_c + R_d$$

Para el servicio al que se destina la unidad intercambiadora, se puede considerar R<sub>d</sub> = 0.003

\* \*\*\*\*\* \*  
 \* U<sub>d</sub> = 6.476 BTU/hr ft<sup>2</sup> °F \*  
 \* \*\*\*\*\* \*

5.0 EVALUACION DEL AREA DE TRANSFERENCIA REQUERIDA (A<sub>TC</sub>)

La ecuación de Fourier establece:

$$Q = U_d \times A_{TC} \times \Delta T$$

donde:

- Q = Calor a transferir, BTU/hr
- U<sub>d</sub> = Coeficiente global de transferencia de calor, BTU/hr ft<sup>2</sup> °F
- A<sub>TC</sub> = Area de transferencia de calor, ft<sup>2</sup>
- ΔT = Diferencia de temperatura = DT, °F

de aquí:

$$A_{TC} = Q / (U_d \times DT)$$

El calor a transferir se puede conocer a partir del balance térmico.

$$Q = M_a C_{pa} (t_2 - t_1) = M_{gc} C_{pgc} (T_1 - T_2)$$

O calcularse con los Cp's en función de T como sigue:

$$Q = M \int C_p \Delta T, \quad t_1, t_2 \text{ para el air} \quad \begin{matrix} t_1 = & 378 & \text{°K} \\ t_2 = & 433 & \text{°K} \end{matrix}$$

$$Q = 383388.0 \text{ BTU/hr}$$

De cálculos anteriores se tiene:

$$dT = \text{LMTD} = 202 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Ud = 6.476 \text{ BTU/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Por lo tanto:

$$A_{TC} = 293.2 \text{ ft}^2$$

Longitud de tubo

$$L_{total} = 559.9 \text{ ft}$$

$$N_{tubos} = 43 \text{ tubos}$$

$$L_{tubo} = 13.02 \text{ ft} = 3969 \text{ mm}$$

$$V_{aire} = 4191.240695 \text{ fpm}$$

$$V_{gases \text{ comb}} = 7884.511712 \text{ fpm} \quad 0.501 \text{ " C.A.}$$

## 6.0 CALCULO DE LAS CAIDAS DE PRESION.

### 6.1 Caída de presión del lado de los tubos

La ecuación para evaluar la caída de presión es:

$$\Delta P = 3.36E(-6) \times f \times L \times \rho \times V_{gc}^2 / D^5$$

donde:

$\Delta P$  = caída de presión, psi

$f$  = factor de fricción de Fanning =  $0.0035 + 0.264 / (Re^{0.64})$

$L$  = longitud del recorrido, ft

$\rho$  = densidad del gas, lb/ft<sup>3</sup>

$V_{gc}$  = volumen real del gas, ft<sup>3</sup>/hr

$D$  = diámetro interior del tubo = DI, ft

Para los gases de combustión se tienen los siguientes datos:

$$Re = 32629$$

de aquí:

$$f = 0.00384111$$

$$L = 13.0 \text{ ft}$$

$$\rho = M_{gc} / V_{gc}$$

$$\begin{aligned} M_{gc} &= 10158 \text{ lb/hr} \\ V_{gc} &= 352320 \text{ ft}^3/\text{hr} \\ d &= 0.0288 \text{ lb/ft}^3 \\ D &= 1.782 \end{aligned}$$

Con todos los parámetros anteriores se tiene:

$$\Delta P = 3.36E(-6) \times f \times L \times d \times (V_{gc}/N_{tubos})^2/D^5$$

$$\Delta P = 0.018100377 \text{ psi}$$

$$= 0.501 \text{ "C.A.}$$

### 6.2 Caída de presión del lado de la coraza.

La caída de presión del lado de la coraza se evalúa por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{cor} = f \times Ga^2 \times D_c \times (N+1)/(2 \times g \times \rho \times D_e)$$

donde:

$\Delta P$  = Caída de presión, lbf/ft<sup>2</sup>

$f$  = factor de fricción de Fanning =  $0.0035 + 0.264/(Re^{0.64})$

$G_a$  = Masa velocidad en el lado de la coraza, lb/hr ft<sup>2</sup>

$D_c$  = Diámetro interior de la coraza, ft

$N$  = Número de deflectores, adimensional

$g$  = Aceleración de la gravedad, ft/ hr<sup>2</sup>

$\rho$  = Densidad, lb/ft<sup>3</sup>

$D_e$  = Diámetro equivalente, ft

De cálculos anteriores se tiene, para el lado de la coraza:

$$Re = 55423$$

$$\text{de aquí, } f = 0.003743022$$

$$G_a = 13989 \text{ lb/hr ft}^2$$

$$D_c = 1.62 \text{ ft}$$

$$N = 0$$

$$g = 418000000 \text{ ft/hr}^2$$

$\rho = 0.0556 \text{ lb/ft}^3$

$D_e = 0.2013 \text{ ft}$

Por lo tanto:

$\Delta P = 0.1270 \text{ lb/ft}^2 = 0.0009 \text{ psi}$

$= 0.0244 \text{ }^\circ\text{CA}$

\*\*\*\*\*  
RESUMEN

	Gases de Comb.	Aire
Flujo Volumétrico real (CFH):	352320	285000
Flujo Volumétrico estándar (CFH):	131014	197620
Flujo másico (lb/hr):	10158	15854
Temperatura de entrada ( $^\circ\text{C}$ ):	292	105
Temperatura de salida ( $^\circ\text{C}$ ):	211	160

Número de tubos:		43
Diámetro nominal:	CALIBRE 12	2.00 "
Diámetro externo:		2.00 "
Diámetro interno:		1.78 "
Diámetro interno de la coraza:		495 mm
Factor de Obstrucción $R_d =$	0.003	

Resultados:

$h_{io} =$	11.52 BTU/hr $\text{ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$	$Q =$	383388 BTU/hr
$h_o =$	15.48 BTU/hr $\text{ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$	LMTD =	202 $^\circ\text{F}$
$U_c =$	6.60 BTU/hr $\text{ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$	$dP =$	0.5014 "CA
$U_d =$	6.48 BTU/hr $\text{ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$	(en los tubos)	
		$dP =$	0.0244 "CA
		(en la coraza)	

$A_{TC} = 293.2 \text{ ft}^2$   
 $L = 13.0 \text{ ft} = 3969 \text{ mm}$

(Longitud requerida de los tubos para obtener  $A_t$ )

Velocidad gases de combustión :	7885 ft/min
Velocidad aire :	4191 ft/min

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

PROYECTO: ANALISIS DE AHORRO DE ENERGIA MEDIANTE EL USO DE RECUPERADORES.

MEMORIA DE CALCULO. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL RECUPERADOR DE CALOR

\*\*\*\*\*

DESARROLLADO POR: HERRERA TOLEDO RODOLFO ALBERTO

**1. Costos de la inversión**

Precio de recuperador con la instalación del mismo

- I.- Suministro de unidad intercambiadora de calor
- II.- Ducteria para el aire de combustión
- III.- Corte de la chimenea actual
- IV.- Soporteria de la unidad intercambiadora
- V.- Instalación de la unidad y de los ductos

Costo total de las partidas anteriores	\$	56,560.00
VI.- Cambio del quemador actual	\$	23,880.00
Costo total de todas las partidas	\$	80,440.0

Costos adicionales en instalación por integracion del recuperador al sistema

Suministro e instalación de tubería para aire	\$	27,000.00
Canal estructural del piso del soporte de la unidad	\$	8,600.00
Instrumentos y dispositivos de control	\$	12,048.00
Desmontaje de su quemador actual	\$	750.00
Montaje e instalacion del nuevo quemador	\$	750.00
Transportación de personal, material y equipo	\$	13,800.00
Instalación no realizada por quemador nuevo	\$	25,163.00
Costo total de partidas adicionales	\$	37,785.0

Calculando el costo total del equipo e instalación \$ 135,958.8

**2. Calculo de ahorro de combustible**

La cantidad de calor obtenida por la recuperación es:

Q = 383388.0102 BTU/hr

Poder calorífico del gas natural

Pc = 1000 BTU/ft3

Los ft3/hr. de combustible que estan ahorrándose son:

383.3880102 ft3/hr

El precio del gas natural es:

0.037601124 \$/ft3

El capital ahorrado es:  
14.41581996

S/hr

**3. Capital recuperado anualmente**  
\$

126,282.58

**Ingresos por combustible ahorrado**

Año	Tamaño de la capacidad		\$/año
2002	Instalación del recuperador	S	-
2003	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
2004	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
2005	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
2006	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
2007	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
2008	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
2009	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
2010	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
2011	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
2012	Capacidad del horno maxima permitida	S	126,282.58
		<b>TOTAL</b>	<b>S 1,262,825.8</b>

ESTADO DE RESULTADOS DE RECUPERADOR DE CALOR AL 15 DE JULIO DEL 2002											
CONCEPTO	AÑO										
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Ingresos Totales	0	126283	126283	126283	126283	126283	126283	126283	126283	126283	126283
<i>Par combustible</i>	0	126283	126283	126283	126283	126283	126283	126283	126283	126283	126283
Costos Totales	17618	17618	17618	17618	17618	17618	17618	17618	17618	17618	17618
<i>Costos Variables</i>	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413
Mantenimiento Correctivo	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413	2413
<i>Costos Fijos</i>	15205	15205	15205	15205	15205	15205	15205	15205	15205	15205	15205
Mantenimiento Preventivo	1609	1609	1609	1609	1609	1609	1609	1609	1609	1609	1609
Depreciación y Amortización	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596
Utilidad de Operación	-17618	108665	108665	108665	108665	108665	108665	108665	108665	108665	108665
Impuesto Sobre la Renta	0	38033	38033	38033	38033	38033	38033	38033	38033	38033	38033
Reparto de Utilidades	0	10866	10866	10866	10866	10866	10866	10866	10866	10866	10866
Utilidad Neta	-17618	59766	59766	59766	59766	59766	59766	59766	59766	59766	59766

ESTADO DE FLUJO EFECTIVO DE RECUPERADOR DE CALOR AL 15 DE JULIO DEL 2002											
CONCEPTO	AÑO										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Entradas	-4022	73361	73361	73361	73361	73361	73361	73361	73361	73361	81405
Utilidad Neta	-17618	59766	59766	59766	59766	59766	59766	59766	59766	59766	59766
Depreciación y Amortización	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596	13596
Valor de Rescate	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	8044
Salidas	135958.8	0	0	0	0	6797.938	0	0	0	0	0
Inversiones	135958.8	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
Reposición de Activos	*****	*****	*****	*****	*****	6798	*****	*****	*****	*****	*****
Flujo efectivo	-139981	73361	73361	73361	73361	66564	73361	73361	73361	73361	81405

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



VALOR PRESENTE NETO			
AÑO	FLUJO EFECTIVO (\$)	FLUJO EFECTIVO DESCONTADO (\$)	FLUJO EFECTIVO ACUMULADO (\$)
PREOPERATIVO	-139980.75	-139980.75	-139980.75
1	73361.46	67539.55	-72441.20
2	73361.46	62179.67	-10261.53
3	73361.46	57245.14	46983.61
4	73361.46	52702.21	99685.82
5	66563.53	44023.78	143709.60
6	73361.46	44669.31	188378.90
7	73361.46	41124.38	229503.28
8	73361.46	37860.78	267364.07
9	73361.46	34856.18	302220.25
10	81405.46	35608.66	337828.91
VALOR PRESENTE NETO =		337828.91	

Tiempo de recuperación de capital

3.215 años

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Conclusiones.

### CONCLUSIONES.

La mayoría de las reservas energéticas ya están siendo utilizadas, es innegable que el tema referente a la conservación de energía tiene una repercusión mundial. Ya no es posible mantenerse inmune ante la situación que se está generando desde hace algunos años, sin contabilizar los daños irreparables que se hicieron al medio ambiente. La conclusión en este aspecto es que en la actualidad se está valorando de una manera importante el ahorro de la energía, el punto clave fue a partir de la crisis petrolera, por lo cual fue necesario la implementación de programas de ahorro de energía, y lo seguirá siendo sin duda alguna mientras no se encuentre una solución más adecuada como puede ser las fuentes alternativas, que actualmente por su costo no pueden competir con las fuentes convencionales.

La energía de conservación, clasificada dentro de las fuentes alternativas nos representa una de las formas que está más a la mano para llevar a cabo el ahorro de energía, y su contribución sea mucha o poca debe ser tomada en cuenta. Sabemos que esta energía de conservación se toma a partir de energía no utilizada y que al no funcionar como un producto que se puede adquirir es difícil su propagación, ya que es un medio descentralizado y representa un sacrificio inicial económico.

Podemos concluir con certeza que dentro de nuestro país es mucho el esfuerzo que se tiene que realizar todavía, en varios puntos que se relacionan con el ahorro de energía como la reglamentación, no existen normas referentes a los equipos de recuperación de calor y por consiguiente la información que se tiene no contempla los beneficios de ahorro de energía que acarrearán estos equipos, los ahorros de energía térmica solo se están estimando para calentadores domésticos, es inconcebible que no se tenga una norma energética de estos equipos, ya que solo se mencionan dentro de otras normas como: Equipo diseñado para transferir el calor de los gases residuales al fluido de trabajo, como si el uso de estos no fuera importante. Esta es una de las tantas barreras a las que se enfrenta la energía de conservación.

Es cierto que existen diferentes formas en que se puede ahorrar energía, pero es difícil tratar de estudiar cada una de ellas con profundidad, los recuperadores de calor son una opción muy buena para la conservación de energía, sobre todo la recuperación indirecta que es el método más eficiente de recuperación de calor por medio del ahorro de combustible, a lo largo del desarrollo del trabajo, pero sobre todo por lo tratado en el capítulo cuatro, se debe llegar a la conclusión que los recuperadores de calor ayudan a incrementar la temperatura de flama por el precalentamiento del aire de combustión que se obtuvo de los gases de salida del horno calcinador, así como la eficiencia térmica del horno calcinador y mejora la distribución de flux de calor a lo largo de la zona de calentamiento resultado de una flama más estable. Con esto beneficiarán aspectos como la calidad del producto y también al tener una mejor combustión los cuidados por mantenimiento del horno calcinador serán menores, existirá un menor grado de ensuciamiento.

## Conclusiones.

---

Sobre el diseño, es difícil decir uno mismo que hizo la mejor elección, pero de acuerdo al sistema existente concluimos que no se podía pensar en un recuperador que tuviera una transferencia de calor por radiación ya que las temperaturas de operación no son muy elevadas, sabiendo que a mayor temperatura se favorece más el mecanismo de radiación este recuperador se planteó por el mecanismo de convección, el recuperador de acuerdo al diseño del capítulo cinco presenta una transferencia de calor con caídas de presión aceptables lo que nos lleva a decir que el diseño es una buena propuesta para que la firma Yeso Panamericano S.A. obtenga el ahorro de energía deseado.

Podemos concluir que el sistema propuesto va a realizar un ahorro de energía, solo falta el último aspecto, que se tuvo que analizar, y el más importante para la realización del proyecto es saber si realmente el ahorro de energía propuesto trajo las ganancias necesarias. En base a la evaluación económica que se realizó en el último capítulo podemos concluir que una vez calculada la utilidad neta observamos la rentabilidad del proyecto, por lo que esta clase de inversiones muestran claramente la posibilidad que nos brinda el uso de los recuperadores de calor para el ahorro de energía.

Tal vez no se mostró en el trabajo de una manera profunda el grado de beneficio ambiental que acarrea consigo la instalación de una unidad recuperadora de calor, pero podemos concluir que en este aspecto el recuperador de calor impacta directamente sobre la contaminación y se puede ver con un simple hecho, antes de la instalación del equipo estos gases tienen que ser venteados al ambiente a temperaturas elevadas y después de su instalación, estos gases, presentan una temperatura mucho menor, y las emisiones de CO<sub>2</sub> (que es un gas invernadero) se reducen al tener un menor consumo de combustible.

## Bibliografía.

### **BIBLIOGRAFÍA.**

Academia Mexicana de Ingeniería, Implicaciones económicas y tecnológicas de los programas de ahorro de energía. CONACYT, 1992.

European Federation of Chemical Engineering  
Innovacion in process energy utilization, 1<sup>st</sup> edition.

Industrial Heating Equipment Association, Combustion technology manual, 5th edition.

Keenan, J., Termodinámica. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Keneth G. kreider, Michael b. Mcneil Guía para el aprovechamiento de calor de desperdicio, administración Federal de energía 1990.

Kenney, W. F., Energy conservation in the process industries, Academic Press, Inc., 1984

Kern. D. Q., Procesos de transferencia de calor, CECSA, 1984.

Manzini, F. M. Martínez 1999 Using Final Energies to Plan a Sustainable Future for Mexico, Energy. 2000

Perry, J. H., Manual del Ingeniero Químico. McGraw Hill Company Inc. New York.

Plan Nacional de Desarrollo Industrial, Secretaria de Patrimonio y Fomento Industrial, México, 1979.

Robert Stobaugh, Energía del futuro, ed CECSA, 1983

Sánchez A. M. M. Trigueros. E. Vázquez. J. Tagiteña Science Communication and a more efficient use of energy, Pags. 333. [Proc. of the World Energy Council 16th Congress]. 1995

Streicher Alain Academia Mexicana de Ingeniería Implicaciones Económicas y Tecnológicas de los programas de ahorro de energía a nivel nacional y a nivel empresa, CONACYT, 1992.

Welty, James. Transferencia de calor aplicada a la ingeniería., Limusa, 1990.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Bibliografía.

---

### HEMEROGRAFÍA

C. L. Brown, Preheat process combustion air, Hydrocarbon Processing, June 1978 pp115.

Don Figenschier, LMTD correction factor for single pass cross flow heat exchangers, Journal of heat transfer, May 1996, pp 279.

John Zink, Waste heat exchanger increases efficiency, Oil & gas Journal, Ago 1985 pp 111-115.

Manzini, M. Martínez. Reduction of Greenhouse Gases Using Renewable Energies in Mexico 2025. International Journal of Hydrogen Energy. 2000.

Memoria de labores PEMEX 1998.

Memoria de labores PEMEX 1999.

Robert D. Reed, Save energy at your heater, Hydrocarbon Processing July 1973 pp119

Programa de Energía. Diario Oficial. México, 2 de febrero de 1981.

The use of mixers in heat recovery systems design, Chemical Engineering Science, Jan 1997, pp183.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**DIRECCIONES ELECTRÓNICAS.**

<http://www.apiheattransfer.com>

Instituto Americano del Petróleo (API Heat Transfer), 20 Diciembre 2001.

<http://www.conae.gob.mx/index.shtml>

Comisión Nacional de Ahorro de energía, 20 Diciembre 2001.

<http://recuperators.com>

Recuperadores de calor , 8 Febrero 2002.

<http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones>

Mayra A. Martínez, Otra Mirada a la Energía, 17 Febrero 2002.

<http://www.pemex.com>

Petróleos Mexicanos, 21 febrero 2002

<http://www.kalfrisa.com>

Energía y medio ambiente, 14 marzo 2002.

<http://www.wtb.tue>.

H.P.v.Kemenade, recuperadores de calor (tipo de flujo), 15 Marzo 2002.

<http://www.hamon.com>

Recuperadores por convección, 15 Marzo 2002.

<http://www.abco.dk/espaniol.htm>

Calentadores e intercambiadores, 15 Marzo 2002.

<http://www.metallurgi.kth.se/htc/skiva/presentations/gupta.pdf>

Aswani Gupta, Flame characteristics and challenges with high temperature air combustion

15 marzo 2002.

<http://www.hindustanradiators.com>

Equipo de transferencia de calor (Heat Transfer Equipment), 16 Marzo 2002

<http://www.eclipse-inc.com>

Eclipse, Soluciones Térmicas Innovadoras, 16 Marzo 2002.

<http://www.gaschem.html>

Combustión Gas Natural, 22 marzo 2002.

<http://ojps.aip.org/ASMEJournals/HeatTransfer>

Journal de transferencia de calor, 30 Marzo 2002.

# ANEXOS.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**AHORROS ESTIMADOS POR LA APLICACIÓN DE LAS NOM-ENER<sup>1</sup>**

Dirección de Normalización, Certificación y Verificación.  
Comisión Nacional para el Ahorro de Energía México.

**Ahorros en Energía Eléctrica**

Ahorro en GWh

NOM de Eficiencia Energética	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
NOM-001-ENER-2000 Bombas verticales		18.5	37.3	56.5	76.1	96.0	102.5	109.1	115.8	122.7	129.8	137.1
NOM-004-ENER-1995 Bombas centrífugas		5.4	11.0	16.8	22.4	28.6	29.3	30.1	30.8	31.6	32.1	33.2
NOM-005-ENER-2000 Lavadoras de ropa electrodomésticas			8.0	16.4	25.2	34.5	78.1	160.7	247.8	339.6	436.5	538.7
NOM-006-ENER-1995 Sistemas de bombeo		578.0	1156.0	1734.0	2312.0	2312.0	2312.0	2312.0	2312.0	2312.0	2312.0	2312.0
NOM-007-ENER-1995 Alumbrado en edificios		103.0	210.0	324.0	324.0	445.0	566.9	678.2	807.8	943.2	1084.2	1230.0
NOM-008-ENER-2001 Edificios no residenciales								45.0	92.7	143.3	196.9	253.7
NOM-010-ENER-1996 Bombas sumergibles				11.4	23.0	34.9	47.0	59.3	71.6	84.0	96.1	108.1
NOM-011-ENER-1996 Acondicionadores tipo central				18.5	38.6	60.9	84.7	110.8	139.3	170.0	204.0	241.1
NOM-013-ENER-1996 Alumbrado en vialidades				10.1	10.4	10.8	11.2	17.3	17.7	8.7	19.2	19.9
NOM-014-ENER-1997 Motores monofásicos				35.0	70.0	106.0	140.0	175.0	210.0	258.0	298.0	339.0
NOM-015-ENER-1997 Refrigeradores electrodomésticos	199.4	403.7	618.9	1005.4	1412.3	1840.8	2292.1	2767.2	3267.5	3794.3	4349.1	4933.3
NOM-016-ENER-1997 Motores trifásicos	162.5	328.3	497.1	669.9	845.8	1025.3	1298.3	1395.0	1585.4	1779.6	1977.8	2179.8
NOM-017-ENER-1997 Lámparas fluorescentes				4.5	7.0	13.7	21.1	33.7	51.4	78.8	119.7	138.4
NOM-018-ENER-1997 Aislantes térmicos para edificaciones				58.0	60.3	62.7	65.2	67.9	70.8	73.4	76.3	79.4
NOM-021-ENER/SCF/ECOL-2000 Acondicionadores de aire tipo cuarto	79.9	186.2	298.0	415.5	538.8	668.3	804.2	1601.1	1211.5	1433.3	1670.5	1923.1
NOM-022-ENER/SCF/ECOL-2000 Aparatos de refrigeración comercial								157.9	328.4	512.6	711.5	926.3
<b>AHORRO TOTAL</b>	<b>441.8</b>	<b>1623.1</b>	<b>2836.7</b>	<b>4375.9</b>	<b>5766.0</b>	<b>6739.5</b>	<b>7762.6</b>	<b>9120.3</b>	<b>10559.8</b>	<b>12095.1</b>	<b>13714.0</b>	<b>15393.1</b>
<b>AHORRO ANUAL</b>	<b>441.8</b>	<b>1181.4</b>	<b>1213.5</b>	<b>1539.2</b>	<b>1390.1</b>	<b>973.5</b>	<b>1023.0</b>	<b>1357.7</b>	<b>1439.5</b>	<b>1535.3</b>	<b>1618.9</b>	<b>1679.1</b>

<sup>1</sup> Fuente: Estudio Costo-Beneficio, CONAE



## Ahorro en MW

NOM de Eficiencia Energética	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
NOM-001-ENER-2000 Bombas verticales		7.0	13.0	20.0	27.0	34.0	36.3	38.7	41.2	43.8	46.4	49.1
NOM-004-ENER-1995 Bombas centrífugas		3.4	6.2	9.6	13.0	26.0	40.0	54.0	69.0	82.4	96.8	111.1
NOM-005-ENER-2000 Lavadoras de ropa electrodomesticas		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NOM-006-ENER-1995 Sistemas de bombeo		10.3	20.6	30.9	41.2	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5
NOM-007-ENER-1995 Alumbrado en edificios		4.1	5.6	7.2	10.1	27.0	30.0	33.0	37.0	41.0	45.0	50.0
NOM-008-ENER-2001 Edificios no residenciales								11.0	22.7	35.0	48.1	62.0
NOM-010-ENER-1996 Bombas sumergibles				1.9	4.0	8.0	12.0	17.0	21.0	26.0	30.1	34.6
NOM-011-ENER-1996 Acondicionadores tipo central				1.4	3.0	6.0	10.0	14.0	18.0	22.0	27.0	33.0
NOM-013-ENER-1996 Alumbrado en viviendas				2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	3.9	4.1	4.3	4.4
NOM-014-ENER-1997 Motores monofásicos				22.0	44.0	73.0	132.0	169.0	191.0	213.0	235.0	257.0
NOM-015-ENER-1997 Refrigeradores electrodomesticos	40.0	82.0	125.0	204.0	286.0	373.0	465.0	561.0	662.0	769.0	882.0	1000.0
NOM-016-ENER-1997 Motores trifásicos	52.0	105.0	159.0	214.0	270.0	328.0	386.0	446.0	507.0	569.0	632.0	697.0
NOM-017-ENER-1997 Lamparas fluorescentes				1.8	2.8	2.9	3.1	3.2	3.4	3.6	3.8	3.9
NOM-018-ENER-1997 Aislantes termicos para edificaciones				2.6	5.2	5.4	5.6	5.8	6.1	6.3	6.6	6.8
NOM-021-ENER SCE/EEC OL-2001 Acondicionadores de aire tipo cuarto	6.7	15.6	24.9	34.7	45.0	63.0	82.0	116.0	152.0	191.0	232.0	277.0
NOM-022-ENER SCE/EEC OL-2001 Aparatos de refrigeración comercial								19.0	39.0	61.0	85.0	111.0
<b>AHORRO TOTAL</b>	<b>98.7</b>	<b>227.4</b>	<b>354.3</b>	<b>552.9</b>	<b>753.6</b>	<b>1000.2</b>	<b>1256.0</b>	<b>1541.8</b>	<b>1824.8</b>	<b>2118.7</b>	<b>2425.6</b>	<b>2748.4</b>
<b>AHORRO ANUAL</b>	<b>98.7</b>	<b>128.7</b>	<b>126.9</b>	<b>198.6</b>	<b>200.7</b>	<b>246.6</b>	<b>255.8</b>	<b>285.8</b>	<b>283.0</b>	<b>293.9</b>	<b>306.9</b>	<b>322.8</b>

## Ahorros en Energía Térmica

NOM de Eficiencia Energética	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
NOM-003-ENER-2000 Calentadores de agua de uso doméstico		30514	62095	94783	128614	163929	213639	277950	344513	413405	484708	558507
<b>AHORRO TOTAL</b> (Miles de kg de gas LP)		30514	62095	94783	128614	163929	213639	277950	344513	413405	484708	558507
<b>AHORRO ANUAL</b> (Miles de kg de gas LP)		30514	31581	32687	33831	35314	49709	64311	66652	68892	71303	73798
<b>AHORRO TOTAL</b> (m <sup>3</sup> de gas LP)		54489	110886	169256	229669	292732	381498	496340	615202	738224	865551	997335
<b>AHORRO ANUAL</b> (m <sup>3</sup> de gas LP)		54489	56396	58370	60413	63062	88767	114842	118861	123022	127327	131784

NOM de Eficiencia Energética			
NOM-002-ENER-1995 Calderas paquete			Se estima un ahorro anual aproximado de 29 000 miles de m <sup>3</sup> de gas natural
NOM-009-ENER-1995 Aislamientos térmicos industriales			Se estima un ahorro anual aproximado de 38 600 m <sup>3</sup> de gas LP
NOM-012-ENER-1996 Calderas de baja capacidad			Se estima un ahorro anual aproximado de 138 000 litros de diesel

## TEMPERATURAS DE FLAMA ADIABÁTICA

Memoria de cálculo para la temperatura de flama  
Con diferentes temperaturas de precalentamiento de aire

Temperatura de precalentamiento = 77°F				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3501.14	0	13389.77	35.08%
5%	3382.77	0	13389.77	32.75%
10%	3272.48	0	13389.77	30.43%
15%	3169.59	0	13389.77	28.12%
20%	3073.08	0	13389.77	25.80%
25%	2982.51	0	13389.77	23.49%
30%	2897.34	0	13389.77	21.18%
35%	2817.08	0	13389.77	18.87%
40%	2741.33	0	13389.77	16.56%
45%	2669.70	0	13389.77	14.26%
50%	2601.87	0	13389.77	11.96%
60%	2476.38	0	13389.77	7.35%
70%	2363.24	0	13389.77	2.77%
80%	2260.09	0	13389.77	-
90%	2165.92	0	13389.77	-
100%	2079.59	0	13389.77	-
110%	2000.17	0	13389.77	-
120%	1926.84	0	13389.77	-
130%	1858.93	0	13389.77	-
140%	1795.85	0	13389.77	-
150%	1737.11	0	13389.77	-
200%	1495.00	0	13389.77	-

Temperatura de precalentamiento =104°F (40°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3530.56	0.059873	13497.54	35.63%
5%	3412.49	0.062867	13502.93	33.35%
10%	3302.60	0.065860	13508.32	31.08%
15%	3199.94	0.068854	13513.71	28.82%
20%	3103.82	0.071848	13519.10	26.56%
25%	3013.61	0.074841	13524.48	24.30%
30%	2928.79	0.077835	13529.87	22.05%
35%	2848.87	0.080829	13535.26	19.80%
40%	2773.43	0.083822	13540.65	17.56%
45%	2702.11	0.086816	13546.04	15.32%
50%	2634.58	0.089810	13551.43	13.08%
60%	2509.98	0.095797	13562.20	8.63%
70%	2397.00	0.101784	13572.98	4.18%
80%	2294.32	0.107771	13583.76	-
90%	2200.58	0.113759	13594.54	-
100%	2114.66	0.119746	13605.31	-
110%	2035.62	0.125733	13616.09	-
120%	1962.64	0.131721	13626.87	-
130%	1895.06	0.137708	13637.64	-
140%	1832.30	0.143695	13648.42	-
150%	1773.85	0.149683	13659.20	-
200%	1532.99	0.179619	13713.08	-

Temperatura de precalentamiento =140°F (60°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3569.21	0.140246	13642.21	36.34%
5%	3452.05	0.147258	13654.83	34.13%
10%	3342.72	0.154270	13667.46	31.93%
15%	3240.61	0.161283	13680.08	29.73%
20%	3144.88	0.168295	13692.70	27.54%
25%	3055.28	0.175307	13705.32	25.36%
30%	2970.92	0.182320	13717.95	23.18%
35%	2891.45	0.189332	13730.57	21.01%
40%	2816.44	0.196344	13743.19	18.85%
45%	2745.53	0.203357	13755.81	16.70%
50%	2678.38	0.210369	13768.43	14.55%
60%	2554.51	0.224393	13793.68	10.27%
70%	2442.20	0.238418	13818.92	6.01%
80%	2340.15	0.252443	13844.17	1.77%
90%	2246.99	0.266467	13869.41	-
100%	2161.61	0.280492	13894.66	-
110%	2083.07	0.294516	13919.90	-
120%	2010.57	0.308541	13945.14	-
130%	1943.43	0.322566	13970.39	-
140%	1881.08	0.336590	13995.63	-
150%	1823.02	0.350615	14020.88	-
200%	1583.81	0.420738	14147.10	-

Temperatura de precalentamiento = 176°F (80°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3608.41	0.221232	13787.99	37.05%
5%	3491.84	0.232294	13807.90	34.90%
10%	3383.08	0.243355	13827.81	32.76%
15%	3281.50	0.254417	13847.72	30.63%
20%	3186.41	0.265479	13867.63	28.51%
25%	3097.18	0.276540	13887.54	26.40%
30%	3013.29	0.287602	13907.45	24.29%
35%	2934.26	0.298663	13927.36	22.20%
40%	2859.67	0.309725	13947.27	20.11%
45%	2789.17	0.320787	13967.19	18.04%
50%	2722.41	0.331848	13987.10	15.97%
60%	2599.26	0.353971	14026.92	11.86%
70%	2487.63	0.376095	14066.74	7.78%
80%	2386.20	0.398218	14106.56	3.73%
90%	2293.62	0.420341	14146.38	-
100%	2208.78	0.442464	14186.21	-
110%	2130.73	0.464588	14226.03	-
120%	2058.70	0.486711	14265.85	-
130%	1992.00	0.508834	14305.67	-
140%	1930.06	0.530957	14345.49	-
150%	1872.39	0.553080	14385.31	-
200%	1634.82	0.663696	14584.42	-

Temperatura de precalentamiento = 212°F (100°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3647.61	0.302825	13934.86	37.74%
5%	3531.86	0.317966	13962.11	35.66%
10%	3423.67	0.333108	13989.36	33.58%
15%	3322.63	0.348249	14016.62	31.51%
20%	3228.05	0.363390	14043.87	29.45%
25%	3139.31	0.378531	14071.13	27.41%
30%	3055.88	0.393673	14098.38	25.37%
35%	2977.29	0.408814	14125.63	23.35%
40%	2903.13	0.423955	14152.89	21.34%
45%	2833.03	0.439096	14180.14	19.34%
50%	2766.66	0.454238	14207.40	17.35%
60%	2644.22	0.484520	14261.91	13.41%
70%	2533.26	0.514803	14316.41	9.50%
80%	2432.45	0.545085	14370.92	5.62%
90%	2340.45	0.575368	14425.43	1.79%
100%	2256.15	0.605650	14479.94	-
110%	2178.60	0.635933	14534.45	-
120%	2107.03	0.666215	14588.96	-
130%	2040.77	0.696498	14643.47	-
140%	1979.24	0.726780	14697.97	-
150%	1921.96	0.757063	14752.48	-
200%	1686.01	0.908475	15025.03	-

Temperatura de precalentamiento =248°F (120°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3687.32	0.385018	14082.80	38.43%
5%	3572.12	0.404269	14117.45	36.40%
10%	3464.49	0.423520	14152.11	34.38%
15%	3363.99	0.442771	14186.76	32.37%
20%	3269.91	0.462022	14221.41	30.38%
25%	3181.66	0.481272	14256.06	28.40%
30%	3098.69	0.500523	14290.71	26.43%
35%	3020.54	0.519774	14325.36	24.48%
40%	2946.81	0.539025	14360.02	22.54%
45%	2877.11	0.558276	14394.67	20.61%
50%	2811.12	0.577527	14429.32	18.69%
60%	2689.41	0.616029	14498.62	14.91%
70%	2579.12	0.654531	14567.92	11.16%
80%	2478.92	0.693032	14637.23	7.45%
90%	2387.49	0.731534	14706.53	3.79%
100%	2303.72	0.770036	14775.83	0.17%
110%	2226.67	0.808538	14845.14	-
120%	2155.56	0.847040	14914.44	-
130%	2089.73	0.885541	14983.74	-
140%	2028.61	0.924043	15053.05	-
150%	1971.71	0.962545	15122.35	-
200%	1737.38	1.155054	15468.87	-



Temperatura de precalentamiento = 284°F (140°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3727.38	0.467804	14231.82	39.10%
5%	3612.59	0.491194	14273.92	37.13%
10%	3505.53	0.514584	14316.02	35.16%
15%	3405.56	0.537975	14358.12	33.21%
20%	3312.00	0.561365	14400.23	31.28%
25%	3224.23	0.584755	14442.33	29.37%
30%	3141.72	0.608145	14484.43	27.46%
35%	3064.02	0.631535	14526.53	25.58%
40%	2990.70	0.654926	14568.64	23.71%
45%	2921.40	0.678316	14610.74	21.85%
50%	2855.80	0.701706	14652.84	20.00%
60%	2734.80	0.748486	14737.05	16.36%
70%	2625.17	0.795267	14821.25	12.76%
80%	2525.60	0.842047	14905.46	9.21%
90%	2434.74	0.888828	14989.66	5.71%
100%	2351.49	0.935608	15073.86	2.26%
110%	2274.94	0.982389	15158.07	-
120%	2204.29	1.029169	15242.27	-
130%	2138.89	1.075949	15326.48	-
140%	2078.18	1.122730	15410.68	-
150%	2021.65	1.169510	15494.89	-
200%	1788.92	1.403412	15915.91	-

Temperatura de precalentamiento = 320°F (160°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3767.49	0.551177	14381.89	39.76%
5%	3653.29	0.578735	14431.49	37.84%
10%	3546.79	0.606294	14481.10	35.93%
15%	3447.36	0.633853	14530.71	34.04%
20%	3354.30	0.661412	14580.31	32.17%
25%	3267.01	0.688971	14629.92	30.31%
30%	3184.97	0.716530	14679.52	28.47%
35%	3107.70	0.744088	14729.13	26.65%
40%	3034.81	0.771647	14778.73	24.84%
45%	2965.91	0.799206	14828.34	23.05%
50%	2900.69	0.826765	14877.95	21.27%
60%	2780.40	0.881883	14977.16	17.77%
70%	2671.44	0.937000	15076.37	14.32%
80%	2572.47	0.992118	15175.58	10.92%
90%	2482.18	1.047236	15274.79	7.57%
100%	2399.46	1.102353	15374.01	4.28%
110%	2323.40	1.157471	15473.22	1.04%
120%	2253.21	1.212589	15572.43	-
130%	2188.24	1.267706	15671.64	-
140%	2127.92	1.322824	15770.85	-
150%	2071.78	1.377942	15870.06	-
200%	1840.64	1.653530	16366.12	-

Temperatura de precalentamiento = 356°F (180°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3807.82	0.635129	14533.00	40.42%
5%	3694.21	0.666885	14590.16	38.54%
10%	3588.27	0.698642	14647.33	36.69%
15%	3489.37	0.730398	14704.49	34.85%
20%	3396.82	0.762155	14761.65	33.04%
25%	3310.01	0.793911	14818.81	31.24%
30%	3228.43	0.825668	14875.97	29.46%
35%	3151.60	0.857424	14933.13	27.70%
40%	3079.12	0.889181	14990.29	25.95%
45%	3010.62	0.920937	15047.46	24.22%
50%	2945.79	0.952693	15104.62	22.51%
60%	2826.20	1.016206	15218.94	19.14%
70%	2717.90	1.079719	15333.26	15.82%
80%	2619.55	1.143232	15447.59	12.57%
90%	2529.82	1.206745	15561.91	9.37%
100%	2447.62	1.270258	15676.23	6.23%
110%	2372.05	1.333771	15790.56	3.14%
120%	2302.31	1.397284	15904.88	0.10%
130%	2237.77	1.460797	16019.20	-
140%	2177.86	1.524309	16133.53	-
150%	2122.09	1.587822	16247.85	-
200%	1892.53	1.905387	16819.47	-

Temperatura de precalentamiento = 392°F (200°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3848.82	0.719654	14685.15	41.06%
5%	3735.34	0.755637	14749.92	39.23%
10%	3629.96	0.791620	14814.69	37.43%
15%	3531.60	0.827602	14879.45	35.65%
20%	3439.55	0.863585	14944.22	33.89%
25%	3353.23	0.899568	15008.99	32.15%
30%	3272.10	0.935551	15073.76	30.42%
35%	3195.71	0.971533	15138.53	28.72%
40%	3123.64	1.007516	15203.30	27.03%
45%	3055.54	1.043499	15268.07	25.37%
50%	2991.09	1.079481	15332.84	23.72%
60%	2872.21	1.151447	15462.37	20.47%
70%	2764.56	1.223412	15591.91	17.29%
80%	2666.81	1.295378	15721.45	14.16%
90%	2577.65	1.367343	15850.99	11.10%
100%	2495.97	1.439309	15980.53	8.10%
110%	2420.88	1.511274	16110.06	5.16%
120%	2351.60	1.583239	16239.60	2.27%
130%	2287.48	1.655205	16369.14	-
140%	2227.97	1.727170	16498.68	-
150%	2172.57	1.799136	16628.21	-
200%	1944.6666	2.15896277	17275.9029	-

Temperatura de precalentamiento = 428°F (220°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3889.09	0.804746	14838.31	41.69%
5%	3776.68	0.844983	14910.74	39.91%
10%	3671.87	0.885220	14983.17	38.16%
15%	3574.03	0.925458	15055.59	36.43%
20%	3482.49	0.965695	15128.02	34.72%
25%	3396.64	1.005932	15200.45	33.04%
30%	3315.97	1.046170	15272.88	31.37%
35%	3240.02	1.086407	15345.30	29.72%
40%	3168.37	1.126644	15417.73	28.09%
45%	3100.66	1.166881	15490.16	26.48%
50%	3036.59	1.207119	15562.58	24.89%
60%	2918.41	1.287593	15707.44	21.76%
70%	2811.42	1.368068	15852.29	18.70%
80%	2714.27	1.448543	15997.15	15.71%
90%	2625.67	1.529017	16142.00	12.78%
100%	2544.51	1.609492	16286.85	9.91%
110%	2469.90	1.689966	16431.71	7.10%
120%	2401.07	1.770441	16576.56	4.35%
130%	2337.37	1.850915	16721.42	1.65%
140%	2278.25	1.931390	16866.27	-
150%	2223.23	2.011865	17011.13	-
200%	1996.80	2.414238	17735.40	-

Temperatura de precalentamiento = 464°F (240°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama °F	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$ BTU/lb	$Q_{\text{COMBUST}}$ BTU/lb	Eficiencia Térmica
0%	3930.07	0.890397	14992.48	42.31%
5%	3818.24	0.934917	15072.62	40.58%
10%	3713.98	0.979437	15152.76	38.88%
15%	3616.67	1.023957	15232.89	37.20%
20%	3525.64	1.068476	15313.03	35.54%
25%	3440.27	1.112996	15393.16	33.90%
30%	3360.05	1.157516	15473.30	32.29%
35%	3284.53	1.202036	15553.43	30.69%
40%	3213.29	1.246556	15633.57	29.12%
45%	3145.98	1.291076	15713.71	27.57%
50%	3082.29	1.335595	15793.84	26.03%
60%	2964.81	1.424635	15954.11	23.02%
70%	2858.47	1.513675	16114.38	20.08%
80%	2761.92	1.602715	16274.66	17.20%
90%	2673.87	1.691754	16434.93	14.40%
100%	2593.23	1.780794	16595.20	11.65%
110%	2519.10	1.869834	16755.47	8.97%
120%	2450.72	1.958873	16915.74	6.35%
130%	2387.44	2.047913	17076.01	3.78%
140%	2328.71	2.136953	17236.28	1.27%
150%	2274.05	2.225992	17396.56	-
200%	2049.18	2.671191	18197.91	-

Temperatura de precalentamiento =500°F (260°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	3971.30	0.976601	15147.65	42.92%
5%	3860.00	1.025431	15235.55	41.24%
10%	3756.30	1.074261	15323.44	39.58%
15%	3659.52	1.123091	15411.33	37.95%
20%	3568.98	1.171921	15499.23	36.34%
25%	3484.09	1.220751	15587.12	34.75%
30%	3404.33	1.269581	15675.02	33.19%
35%	3329.24	1.318411	15762.91	31.65%
40%	3258.41	1.367241	15850.80	30.13%
45%	3191.50	1.416071	15938.70	28.62%
50%	3128.18	1.464901	16026.59	27.14%
60%	3011.40	1.562562	16202.38	24.24%
70%	2905.70	1.660222	16378.17	21.41%
80%	2809.76	1.757882	16553.96	18.65%
90%	2722.26	1.855542	16729.75	15.96%
100%	2642.13	1.953202	16905.53	13.34%
110%	2568.48	2.050862	17081.32	10.78%
120%	2500.54	2.148522	17257.11	8.27%
130%	2437.68	2.246182	17432.90	5.83%
140%	2379.34	2.343842	17608.69	3.45%
150%	2325.04	2.441502	17784.47	1.11%
200%	2101.71	2.929803	18663.42	-

Temperatura de precalentamiento =536°F (280°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4012.65	1.063351	15303.80	43.52%
5%	3901.97	1.116519	15399.50	41.88%
10%	3798.82	1.169686	15495.20	40.27%
15%	3702.57	1.222854	15590.91	38.69%
20%	3612.53	1.276021	15686.61	37.12%
25%	3528.11	1.329189	15782.31	35.59%
30%	3448.80	1.382356	15878.01	34.07%
35%	3374.14	1.435524	15973.71	32.58%
40%	3303.73	1.488691	16069.41	31.11%
45%	3237.20	1.541859	16165.12	29.66%
50%	3174.26	1.595026	16260.82	28.23%
60%	3058.17	1.701362	16452.22	25.43%
70%	2953.13	1.807697	16643.62	22.71%
80%	2857.77	1.914032	16835.03	20.06%
90%	2770.82	2.020367	17026.43	17.48%
100%	2691.21	2.126702	17217.83	14.96%
110%	2618.03	2.233037	17409.24	12.52%
120%	2550.53	2.339372	17600.64	10.13%
130%	2488.08	2.445707	17792.04	7.80%
140%	2430.13	2.552042	17983.45	5.53%
150%	2376.20	2.658377	18174.85	3.31%
200%	2154.39	3.190053	19131.87	-



Temperatura de precalentamiento = 572°F (300°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4054.23	1.150640	15460.92	44.11%
5%	3944.13	1.208172	15564.48	42.52%
10%	3841.54	1.265704	15668.04	40.95%
15%	3745.81	1.323236	15771.60	39.41%
20%	3656.27	1.380768	15875.15	37.89%
25%	3572.33	1.438300	15978.71	36.40%
30%	3493.47	1.495832	16082.27	34.93%
35%	3419.24	1.553364	16185.83	33.49%
40%	3349.23	1.610896	16289.38	32.06%
45%	3283.10	1.668429	16392.94	30.66%
50%	3220.53	1.725961	16496.50	29.28%
60%	3105.13	1.841025	16703.61	26.59%
70%	3000.73	1.956089	16910.73	23.97%
80%	2905.97	2.071153	17117.84	21.42%
90%	2819.56	2.186217	17324.96	18.94%
100%	2740.45	2.301281	17532.08	16.54%
110%	2667.75	2.416345	17739.19	14.19%
120%	2600.69	2.531409	17946.31	11.91%
130%	2538.65	2.646473	18153.42	9.69%
140%	2481.08	2.761537	18360.54	7.53%
150%	2427.52	2.876601	18567.65	5.43%
200%	2207.23	3.451921	19603.23	-

Temperatura de precalentamiento = 608°F (320°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4096.03	1.238462	15619.00	44.69%
5%	3986.50	1.300385	15730.46	43.14%
10%	3884.46	1.362309	15841.93	41.61%
15%	3789.26	1.424232	15953.39	40.12%
20%	3700.21	1.486155	16064.85	38.65%
25%	3616.74	1.548078	16176.31	37.20%
30%	3538.33	1.610001	16287.77	35.78%
35%	3464.52	1.671924	16399.23	34.38%
40%	3394.93	1.733847	16510.69	33.00%
45%	3329.18	1.795770	16622.16	31.65%
50%	3266.98	1.857694	16733.62	30.31%
60%	3152.27	1.981540	16956.54	27.71%
70%	3048.51	2.105386	17179.46	25.19%
80%	2954.34	2.229232	17402.39	22.74%
90%	2868.48	2.353078	17625.31	20.36%
100%	2789.87	2.476925	17848.23	18.06%
110%	2717.64	2.600771	18071.16	15.82%
120%	2651.02	2.724617	18294.08	13.64%
130%	2589.39	2.848463	18517.00	11.52%
140%	2532.20	2.972310	18739.93	9.46%
150%	2478.99	3.096156	18962.85	7.45%
200%	2260.21	3.715387	20077.47	-

Temperatura de precalentamiento = 644°F (340°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4138.09	1.326810	15778.03	45.26%
5%	4029.06	1.393151	15897.44	43.75%
10%	3927.57	1.459491	16016.85	42.27%
15%	3832.89	1.525832	16136.27	40.81%
20%	3744.34	1.592172	16255.68	39.38%
25%	3661.34	1.658513	16375.09	37.98%
30%	3583.38	1.724853	16494.51	36.60%
35%	3510.00	1.791194	16613.92	35.25%
40%	3440.80	1.857534	16733.33	33.91%
45%	3375.45	1.923875	16852.74	32.60%
50%	3313.61	1.990215	16972.16	31.32%
60%	3199.59	2.122896	17210.98	28.81%
70%	3096.47	2.255577	17449.81	26.38%
80%	3002.88	2.388258	17688.63	24.02%
90%	2917.56	2.520939	17927.46	21.74%
100%	2839.46	2.653620	18166.29	19.53%
110%	2767.69	2.786301	18405.11	17.38%
120%	2701.51	2.918982	18643.94	15.30%
130%	2640.28	3.051663	18882.76	13.28%
140%	2583.47	3.184344	19121.59	11.31%
150%	2530.62	3.317025	19360.42	9.40%
200%	2313.34	3.980431	20554.54	0.60%

Temperatura de precalentamiento =680°F (360°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4180.18	1.415677	15937.99	45.82%
5%	4071.81	1.486461	16065.40	44.35%
10%	3970.88	1.557245	16192.81	42.91%
15%	3876.71	1.628029	16320.22	41.50%
20%	3788.66	1.698813	16447.63	40.11%
25%	3706.13	1.769597	16575.04	38.75%
30%	3628.61	1.840380	16702.45	37.41%
35%	3555.65	1.911164	16829.87	36.10%
40%	3486.86	1.981948	16957.28	34.81%
45%	3421.89	2.052732	17084.69	33.54%
50%	3360.43	2.123516	17212.10	32.30%
60%	3247.09	2.265084	17466.92	29.88%
70%	3144.59	2.406651	17721.74	27.53%
80%	3051.59	2.548219	17976.56	25.27%
90%	2966.81	2.689787	18231.39	23.07%
100%	2889.21	2.831354	18486.21	20.95%
110%	2817.90	2.972922	18741.03	18.90%
120%	2752.15	3.114490	18995.85	16.90%
130%	2691.33	3.256058	19250.67	14.97%
140%	2634.90	3.397625	19505.50	13.09%
150%	2582.40	3.539193	19760.32	11.27%
200%	2366.60	4.247032	21034.43	2.91%

Temperatura de precalentamiento =716°F (380°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4222.56	1.505057	16098.87	46.38%
5%	4114.76	1.580309	16234.33	44.94%
10%	4014.37	1.655562	16369.78	43.54%
15%	3920.73	1.730815	16505.24	42.17%
20%	3833.16	1.806068	16640.69	40.82%
25%	3751.10	1.881321	16776.15	39.50%
30%	3674.02	1.956574	16911.60	38.20%
35%	3601.49	2.031826	17047.06	36.93%
40%	3533.10	2.107079	17182.51	35.68%
45%	3468.52	2.182332	17317.97	34.45%
50%	3407.42	2.257585	17453.42	33.25%
60%	3294.76	2.408091	17724.33	30.91%
70%	3192.89	2.558596	17995.24	28.66%
80%	3100.47	2.709102	18266.15	26.48%
90%	3016.23	2.859608	18537.06	24.37%
100%	2939.12	3.010113	18807.97	22.33%
110%	2868.27	3.160619	19078.88	20.36%
120%	2802.95	3.311125	19349.79	18.45%
130%	2742.53	3.461630	19620.70	16.60%
140%	2686.48	3.612136	19891.61	14.81%
150%	2634.33	3.762642	20162.52	13.07%
200%	2420.01	4.515170	21517.08	5.12%

Temperatura de precalentamiento = 752°F (400°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4265.12	1.594942	16260.66	46.92%
5%	4157.89	1.674689	16404.21	45.53%
10%	4058.05	1.754436	16547.75	44.16%
15%	3964.92	1.834183	16691.30	42.82%
20%	3877.85	1.913930	16834.84	41.51%
25%	3796.25	1.993677	16978.39	40.23%
30%	3719.62	2.073424	17121.93	38.97%
35%	3647.50	2.153171	17265.48	37.74%
40%	3579.52	2.232918	17409.02	36.53%
45%	3515.32	2.312665	17552.57	35.35%
50%	3454.58	2.392413	17696.11	34.18%
60%	3342.60	2.551907	17983.20	31.93%
70%	3241.36	2.711401	18270.29	29.75%
80%	3149.52	2.870895	18557.38	27.65%
90%	3065.81	3.030389	18844.47	25.62%
100%	2989.19	3.189883	19131.56	23.67%
110%	2918.74	3.349378	19418.65	21.77%
120%	2853.86	3.508872	19705.74	19.95%
130%	2793.88	3.668366	19992.83	18.18%
140%	2738.20	3.827860	20279.92	16.47%
150%	2686.41	3.987354	20567.01	14.81%
200%	2473.55	4.784825	22002.46	7.24%

Temperatura de precalentamiento = 788°F (420°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4307.87	1.685326	16423.36	47.46%
5%	4201.21	1.769592	16575.04	46.10%
10%	4101.91	1.853858	16726.71	44.77%
15%	4009.30	1.938125	16878.39	43.47%
20%	3922.72	2.022391	17030.07	42.20%
25%	3841.58	2.106657	17181.75	40.95%
30%	3765.39	2.190923	17333.43	39.73%
35%	3693.70	2.275190	17485.11	38.54%
40%	3626.11	2.359456	17636.79	37.36%
45%	3562.29	2.443722	17788.47	36.22%
50%	3501.92	2.527989	17940.15	35.09%
60%	3390.61	2.696521	18243.51	32.91%
70%	3289.99	2.865054	18546.87	30.81%
80%	3198.72	3.033586	18850.23	28.79%
90%	3115.54	3.202119	19153.58	26.84%
100%	3039.42	3.370652	19456.94	24.96%
110%	2969.49	3.539184	19760.30	23.15%
120%	2905.01	3.707717	20063.66	21.39%
130%	2845.39	3.876249	20367.02	19.70%
140%	2790.08	4.044782	20670.38	18.06%
150%	2738.63	4.213314	20973.74	16.48%
200%	2527.22	5.055977	22490.53	9.27%

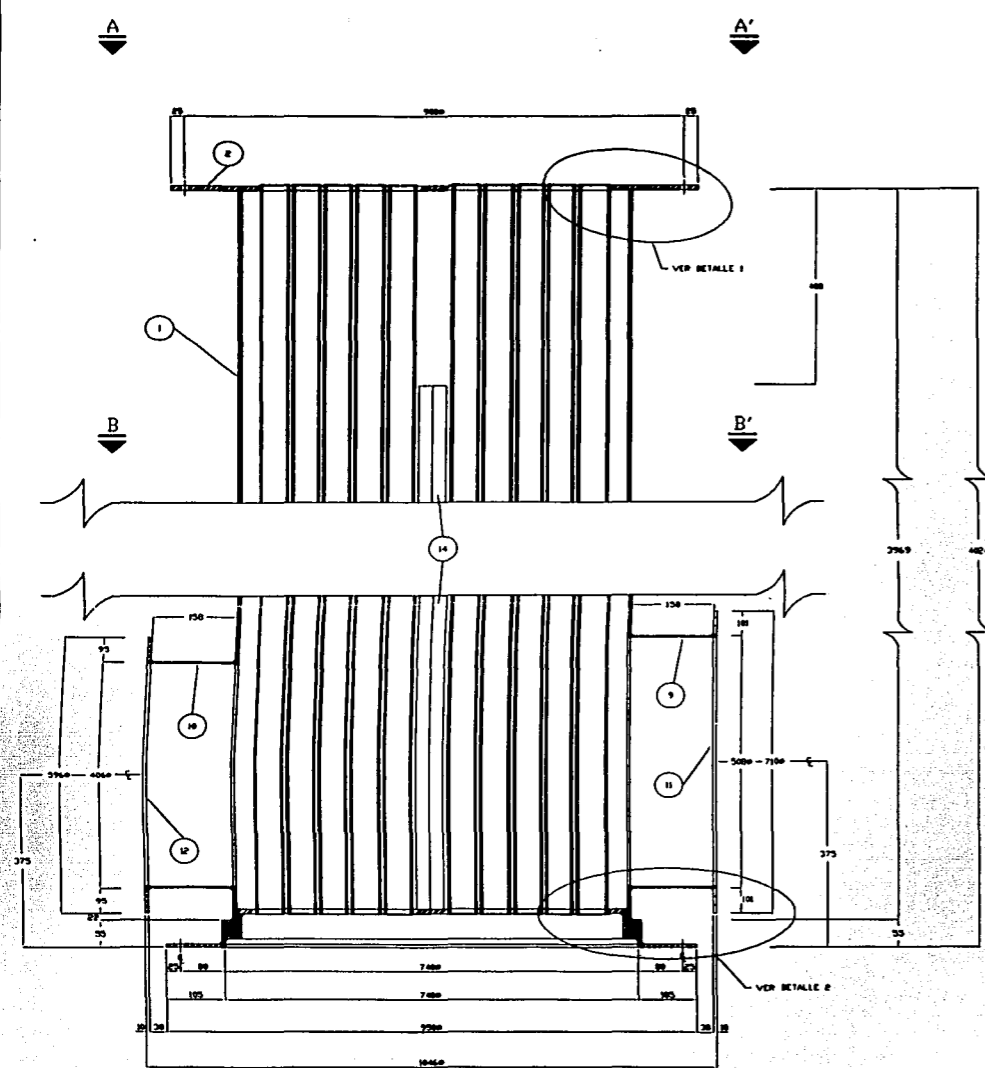
Temperatura de precalentamiento =824°F (440°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4350.80	1.776202	16586.93	47.99%
5%	4244.71	1.865012	16746.79	46.66%
10%	4145.96	1.953822	16906.65	45.37%
15%	4053.86	2.042632	17066.51	44.10%
20%	3967.77	2.131442	17226.37	42.86%
25%	3887.09	2.220253	17386.22	41.65%
30%	3811.34	2.309063	17546.08	40.47%
35%	3740.06	2.397873	17705.94	39.31%
40%	3672.87	2.486683	17865.80	38.18%
45%	3609.43	2.575493	18025.66	37.07%
50%	3549.42	2.664303	18185.52	35.98%
60%	3438.78	2.841923	18505.23	33.87%
70%	3338.79	3.019543	18824.95	31.85%
80%	3248.09	3.197164	19144.66	29.90%
90%	3165.43	3.374784	19464.38	28.02%
100%	3089.80	3.552404	19784.10	26.21%
110%	3020.32	3.730024	20103.81	24.47%
120%	2956.27	3.907644	20423.53	22.79%
130%	2897.04	4.085265	20743.25	21.17%
140%	2842.09	4.262885	21062.96	19.60%
150%	2790.99	4.440505	21382.68	18.09%
200%	2581.03	5.328606	22981.26	11.22%



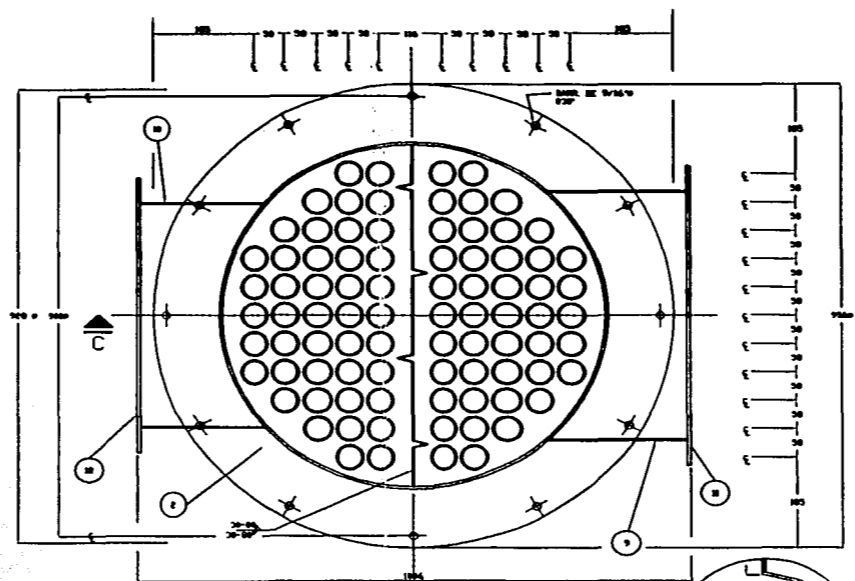
Temperatura de precalentamiento =860°F (460°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4393.91	1.867564	16751.38	48.50%
5%	4288.39	1.960942	16919.47	47.21%
10%	4190.18	2.054320	17087.55	45.95%
15%	4098.60	2.147698	17255.63	44.72%
20%	4012.99	2.241076	17423.71	43.52%
25%	3932.77	2.334455	17591.79	42.35%
30%	3857.46	2.427833	17759.87	41.20%
35%	3786.60	2.521211	17927.95	40.07%
40%	3719.80	2.614589	18096.03	38.98%
45%	3656.74	2.707967	18264.11	37.90%
50%	3597.09	2.801346	18432.19	36.85%
60%	3487.12	2.988102	18768.35	34.81%
70%	3387.74	3.174858	19104.51	32.85%
80%	3297.61	3.361615	19440.68	30.98%
90%	3215.48	3.548371	19776.84	29.17%
100%	3140.33	3.735127	20113.00	27.43%
110%	3071.30	3.921884	20449.16	25.76%
120%	3007.67	4.108640	20785.32	24.15%
130%	2948.83	4.295397	21121.48	22.59%
140%	2894.25	4.482153	21457.65	21.09%
150%	2843.49	4.668909	21793.81	19.65%
200%	2634.96	5.602691	23474.61	13.09%

Temperatura de precalentamiento =896°F (480°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4437.03	1.959404	16916.70	49.01%
5%	4332.26	2.057374	17093.04	47.76%
10%	4234.58	2.155345	17269.39	46.53%
15%	4143.51	2.253315	17445.74	45.33%
20%	4058.38	2.351285	17622.08	44.17%
25%	3978.63	2.449255	17798.43	43.02%
30%	3903.75	2.547225	17974.78	41.91%
35%	3833.30	2.645196	18151.12	40.82%
40%	3766.90	2.743166	18327.47	39.75%
45%	3704.21	2.841136	18503.81	38.71%
50%	3644.92	2.939106	18680.16	37.69%
60%	3535.61	3.135047	19032.85	35.73%
70%	3436.85	3.330987	19385.55	33.84%
80%	3347.29	3.526928	19738.24	32.02%
90%	3265.68	3.722868	20090.93	30.28%
100%	3191.01	3.918808	20443.63	28.61%
110%	3122.43	4.114749	20796.32	27.01%
120%	3059.21	4.310689	21149.01	25.46%
130%	3000.76	4.506630	21501.70	23.97%
140%	2946.54	4.702570	21854.40	22.53%
150%	2896.12	4.898511	22207.09	21.15%
200%	2689.02	5.878213	23970.55	14.89%

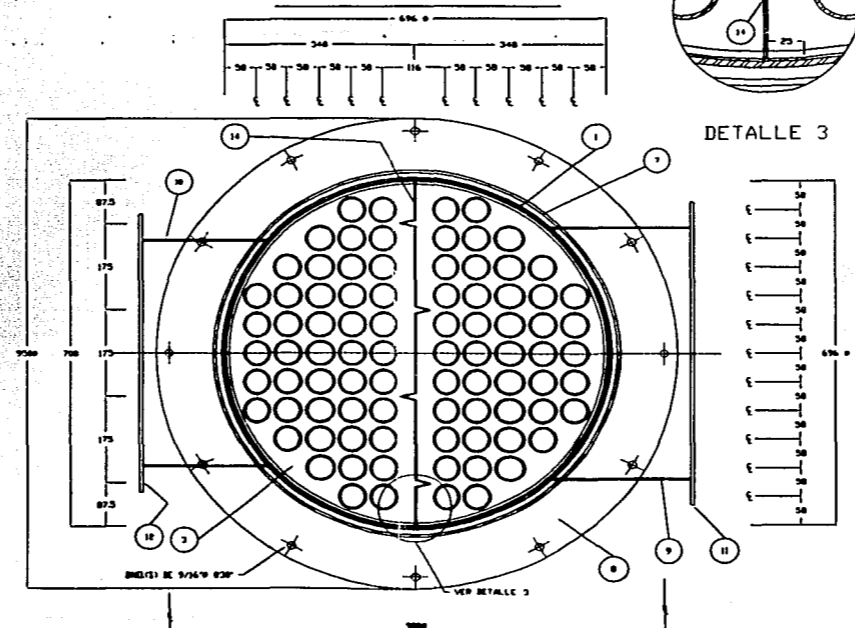
Temperatura de precalentamiento =932°F (500°C)				
% Exceso de aire	Temp. de flama	$\Delta H_{\text{AIRE}}(T)$	$Q_{\text{COMBUST}}$	Eficiencia
	°F	BTU/lb	BTU/lb	Térmica
0%	4480.68	2.051717	17082.86	49.52%
5%	4376.29	2.154303	17267.51	48.29%
10%	4279.16	2.256888	17452.17	47.10%
15%	4188.60	2.359474	17636.82	45.93%
20%	4103.95	2.462060	17821.48	44.80%
25%	4024.65	2.564646	18006.13	43.69%
30%	3950.20	2.667232	18190.79	42.61%
35%	3880.17	2.769818	18375.44	41.55%
40%	3814.16	2.872403	18560.10	40.52%
45%	3751.85	2.974989	18744.75	39.51%
50%	3692.91	3.077575	18929.40	38.52%
60%	3584.27	3.282747	19298.71	36.62%
70%	3486.12	3.487918	19668.02	34.79%
80%	3397.11	3.693090	20037.33	33.04%
90%	3316.02	3.898262	20406.64	31.37%
100%	3241.83	4.103433	20775.95	29.76%
110%	3173.70	4.308605	21145.26	28.21%
120%	3110.90	4.513777	21514.57	26.73%
130%	3052.83	4.718948	21883.88	25.30%
140%	2998.97	4.924120	22253.19	23.92%
150%	2948.89	5.129292	22622.49	22.59%
200%	2743.21	6.155150	24469.04	16.62%



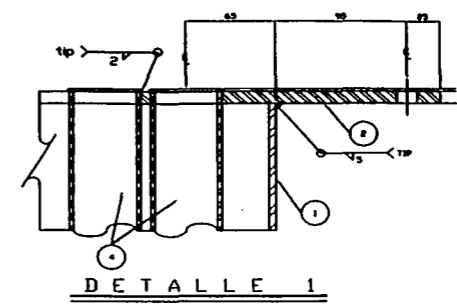
CORTE C-C'



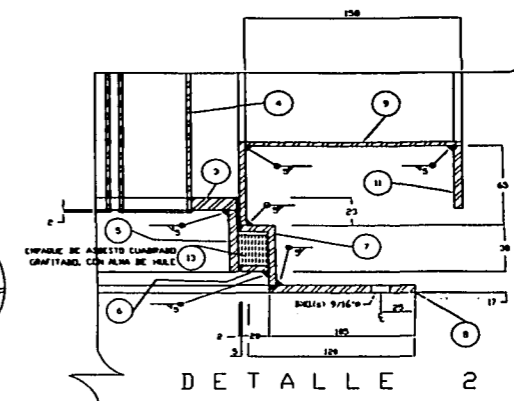
VISTA A-A'



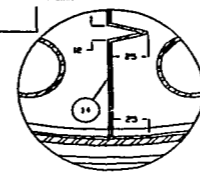
CORTE B-B'



DETALLE 1



DETALLE 2



DETALLE 3



DETALLE 4

SEPARACION TIPICA ENTRE TUBOS

CANT	REF	DESCRIPCION	MATERIAL
15	24	PZAS	TORNILLO HEX DE 1/2" X 2" DE LENG C/TCA Y ROLDANA
14	1	PZA	LAMINA CAL 14 DE 3000 MM X 912 MM DE DESARROLLO
13	1	PZA	2725 MM DE DESARROLLO TOTAL
13	1	PZA	EMPAQUE DE ASBESTO GRAFITADO CON CENTRO DE HULE I
12	1	PZA	BRIDA HECHA EN PLACA DE 3/8" DE 396 MM Ø EXT. 406 I
11	1	PZA	BRIDA HECHA EN PLACA DE 3/8" DE 710 MM Ø EXT. 509 I
10	1	PZA	TUBO ROLADO EN LAM 14 DE 495 MM Ø EXT. Y 226 MM Ø
9	1	PZA	TUBO ROLADO EN LAM 14 DE 508 MM Ø EXT Y 270 MM Ø
8	1	PZA	CEN 12 BARRIDOS DE 9/16" SEPARADOS 30° EN UN RADIO
7	1	PZA	BRIDA HECHA EN PLACA DE 1/4" DE 950 MM Ø EXT Y 740
6	1	PZA	UN RADIO EXTERIOR DE 2599 MM DE DESARROLLO
5	1	PZA	ANGULO ROLADO EN PLACA DE 3/16" DE 25 X 49 MM. P/B
4	1	PZA	BRIDA HECHA EN PLACA DE 3/16", 708 MM Ø INT. 740 MM Ø
3	1	PZA	DE DESARROLLO TOTAL
2	1	PZA	SOLETA DE 2" X 1/4" ROLADA CON RADIO EXT. DE 348 MM Ø
1	1	PZA	TUBO TIPO FLUX DE 2" Ø EXT. CALIBRE 12 DE 3624 MM Ø
			TRINCLON DE CORTES SEGUN CORTE B-B'
			ESPEJO CONSTRUIDO CON PLACA DE 3/8" DE 696 MM Ø. CI
			UNION DE CORTES SEGUN VISTA A-A'
			ESPEJO CONSTRUIDO EN PLACA DE 3/8" DE 950 MM Ø CON
			Y 2643 MM LENG. (VER NOTA 1)
			CARRETE CONSTRUIDO CON PLACA DE 3/16", DE 710 MM Ø I
			DE S C R I P C I O N

LISTA DE MATERIALES

NOTA 1: ESTA PIEZA SE FORMA SOLDANDO CARRETES DE 1207 MM DE LONG. (1 PZA) Y 1200 MM DE LONG. (2 PZAS) FERMADOS POR PLACAS DE 4 PIES DE ANCHO.

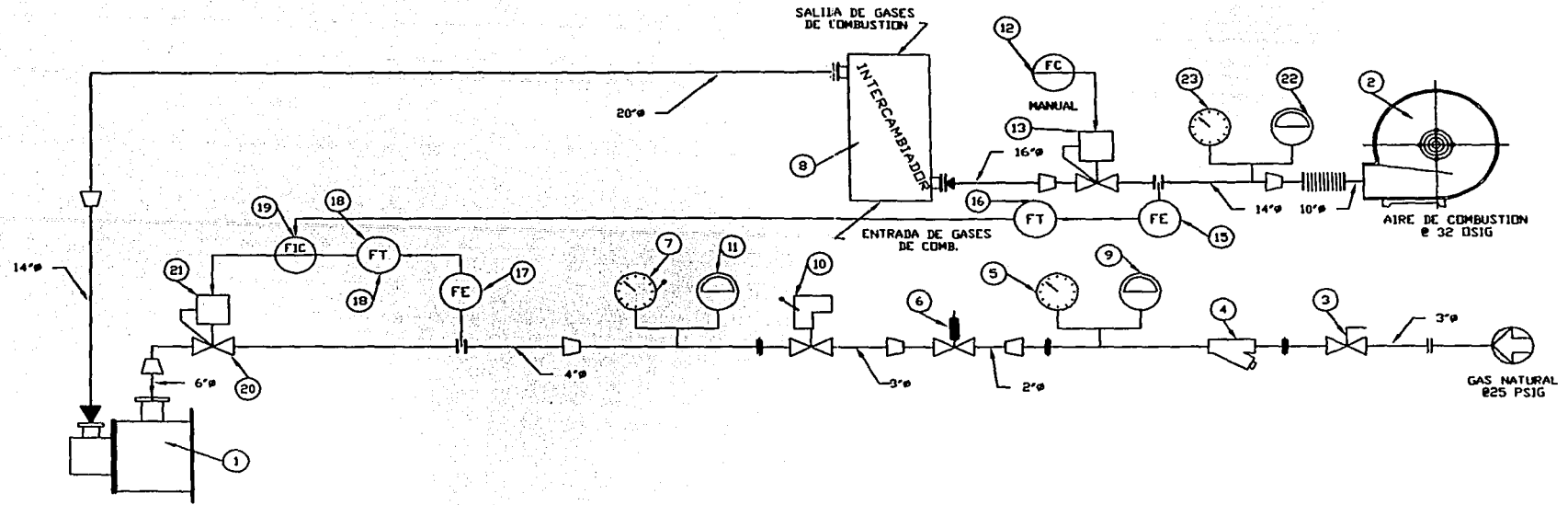
PLANO No.	TITULO
	PLANOS DE REFERENCIA

NO. DE DIB.	FECHA	REVISOR	REVISOR	APROBADO
1				

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
Facultad de Estudios Superiores

YESO PANAMERICANO S.A. DI  
UNIDAD RECUPERADORA DE I  
ENSAMBLE DE TUBOS Y COF

TESIS CON FALLA DE ORIG



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

23	MANDMETRO PDR (YPSA)
22	LIMITE DE BAJA PRESION DE AIRE (PDR YPSA)
21	ACTUADOR ELECTRICO MCA. HONEYWELL MOD. M7284C1000 CON ENTRADA 4-20 MA
20	VALVULA DE CONTROL TIPO FVA (PDR YPSA) SALIDA 4 -20 MA
19	CONTROL DE RELECCION MCA. HONEYWELL MOD DC-300C-00A CON ENTRADA AUXILIAR -
18	TRANSMISOR DE FLUJO CON SALIDA 4-20 MA Y EXTRACTOR DE RAIZ CUADRADA (PDR YPSA)
17	MEDIDOR TIPO PLACA DE ORIFICIO (PDR YPSA)
16	TRANSMISOR DE FLUJO CON SALIDA DE 4-20 MA Y EXTRACTOR DE RAIZ CUADRADA
15	ELEMENTO DE MEDICION TIPO ANUBAR DE 14"Ø
14	VALVULA DE MARIPOSA ATOMATICA DE 14"Ø MCA. HAUCK BRIDADA
13	ACTUADOR ELECTRICO MCA HONEYWELL MOD. M940 (PDR YPSA)
12	CONTROL DE FLUJO DE AIRE MANUAL (PDR YPSA)
11	LIMITE DE BAJA PRESION DE GAS (PDR YPSA)
10	VALVULA SHUT-OFF REST MANUAL MCA. MAXON MOD. 808 DE 3"Ø (PDR YPSA)
9	LIMITE DE ALTA PRESION DE GAS (PDR YPSA)
8	UNIDAD RECUPERADORA DE CALOR PARA PRECALENTAR EL AIRE DE COMB. A 160°C
7	MANDMETRO (PDR YPSA)
6	REGULADOR DE PRESION FISHER MOD. 99 DE 2"Ø Y RESORTE AZUL (PDR YPSA)
5	MANDMETRO (PDR YPSA)
4	FILTRO TIPO Y DE 3"Ø (PDR YPSA)
3	VALVULA MACHO DE 3"Ø (PDR YPSA)
2	TURBOVENTILADOR PARA AIRE DE COMBUSTION MCA. HAUCK MOD. TBA-32 (PDR YPSA) PRESION EFECTIVA EN EL QUEMADOR (23,723,150 BTU/Hr EFECTIVAS EN CD. DE PUEBLA) CUANDO OPERA CON AIRE A 8 OSIG DE
1	QUEMADOR MCA. HAUCK MOD. BBG-114 CON CAPACIDAD NOMINAL DE DE 27,000,000 BTU/Hr
REF	DESCRIPCION

LISTA DE MATERIAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO					YESO PANAMERICANO S.A. DE C.V.								
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza					DIAGRAMA MECANICO DE COMBUSTION								
DIBUJO R.H.T.		ESC. SIN		DIBUJO No.		Proyecto		Esc: SIN		Acot: SIN		Fecha: JULIO-2002	
REVISO C.L.CH.		ACOT. SIN				Reviso: C.L.CH.							
APROBO C.L.CH.		FECHA JULIO-2002				Aprobo: C.L.CH.							
D.T. YP-195		REV. No. 0											

XXX V