

**EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS EN LA PLANTA DE FUNDICIÓN
DE LA EMPRESA DE HERRAJES FANTAXIAS LTDA**

**GERARDO ANTONIO GORDILLO MUÑOZ
REYNALDO VALERO MATEUS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2.005

**EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS EN LA PLANTA DE FUNDICIÓN
DE LA EMPRESA DE HERRAJES FANTAXIAS LTDA**

**GERARDO ANTONIO GORDILLO MUÑOZ
REYNALDO VALERO MATEUS**

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Químico

Director

**HUMBERTO ESCALANTE HERNANDEZ
Ph.D. INGENIERO QUÍMICO**

Codirector

**JULIO ELIAS PEDRAZA
Ph.D. INGENIERO METALURGICO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2.005

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 FUNDICIÓN DE LOS METALES	3
1.1.1 Tipos de Fundiciones para Metales no Ferrosos	4
1.1.2 El Zamak	6
1.2 HORNOS INDUSTRIALES	7
1.2.1 Hornos para Fundir Metales	8
1.2.2 Hornos de Crisol	9
1.2.3. Tipos de Horno de Crisol	11
1.3 PROCESO DE COMBUSTIÓN	12
1.3.1. Combustibles Industriales	14
1.4 DESEMPEÑO DE LOS HORNOS INDUSTRIALES	16
1.5 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN HORNO CRISOL	17
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	21
2.1 ESTUDIO TEORICO DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS POR FANTAXÍAS LTDA E IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA QUE SE PRESENTA EN LA SECCIÓN DE FUNDICIÓN	22
2.1.1. Descripción de la Empresa	22
2.1.2. Descripción de los Hornos Tipo Crisol de la Empresa FANTAXIAS LTDA	27
2.1.3. Descripción de los Hornos HC	29
2.1.4. Sistema de Control en los Hornos	30
2.2 DEFINICION DE VARIABLES DE PROCESO	31

2.2.1 Balance de Masa en el Horno Tipo Crisol	38
2.2.2 Balance de Energía en el Horno Tipo Crisol	41
2.3. PROPUESTA PARA APROVECHAR DE LA EMPRESA EL EXCEDENTE DE ENERGÍA PRODUCIDA EN LOS HORNOS	43
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	45
3.1 RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO A LAS VARIABLES DE OPERACIÓN	45
3.2 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA EN LOS HORNOS	51
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Recolección de datos para el cálculo de los balances de masa y energía	33
Tabla 2. Análisis próximo del gas natural	33
Tabla 3. Formato para el registro diario del consumo de gas	33
Tabla 4. Hoja de registros de consumo de gas diario	34
Tabla 5. Formato para el registro de temperaturas	37
Tabla 6. Balance molar para la reacción de combustión	40
Tabla 7. Nomenclatura usada en el balance de energía	41
Tabla 8. Análisis próximo del gas natural	46
Tabla 9. Hoja de registros de consumo de gas de la sección de Fundición	46
Tabla 10. Temperaturas promedios de las superficies de los hornos	49
Tabla 11. Análisis de gases de chimenea para los hornos tipo HC	49
Tabla 12. Valores recomendados de los parámetros obtenidos en la medición de gases	51
Tabla 13. Formato de inspección del estado de los hornos HC	54
Tabla 14. Resultados obtenidos debido al aumento del espesor del aislante	58
Tabla 15. Resultados obtenidos para diferentes ajustes del exceso de aire en los Hornos HC	61
Tabla 16. Disminución de las pérdidas de energía en los hornos debido a la introducción de mejoras	62
Tabla 17. Propiedades del aceite térmico ISO 22 TERPEL	78
Tabla 18. Especificaciones del serpentín de la unidad de calentamiento	80
Tabla 19. Composición química y condiciones de trabajo del baño Níquel mate	80

Tabla 20. Especificaciones de diseño del serpentín del baño de galvanizado	81
Tabla 21. Relación entre los diámetros de tuberías y velocidades para un caudal de 50 l/min	83
Tabla 22. Valores de Factor f a diferentes temperaturas del aceite	85
Tabla 23. Longitudes equivalentes de los accesorios utilizados en el circuito térmico	85
Tabla 24. Datos necesarios en la selección de la bomba del circuito térmico	87
Tabla 25. Instrumentación requerida por el sistema térmico	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del horno de crisol fijo no basculable	10
Figura 2. Diagrama de transmisión de calor en el interior del horno de crisol	18
Figura 3. Etapas del proyecto	21
Figura 4. Distribución de la producción de la Empresa FANTAXÍAS	23
Figura 5. Diagrama de bloques del proceso de producción piezas metálicas	24
Figura 6. Hornos Tipo crisol con cabina y un solo crisol	27
Figura 7. Hornos Tipo crisol atmosférico, sin cabina y dos crisoles	28
Figura 8. Interior del Horno HC3	29
Figura 9. Panel de control	30
Figura 10. Esquema del proceso de fundición de zamak en un horno crisol	31
Figura 11. Superficies del horno	36
Figura 12. Superficie adyacente al trabajador dividida en nodos	37
Figura 13. Punto de muestreo de gases de chimenea	38
Figura 14. Esquema del balance de masa para el sistema combustible-aire	39
Figura 15. Esquema de balance de calor	41
Figura 16. Esquema de circuito térmico	45
Figura 17. Consumo de gas por día	47
Figura 18. Distribución energética en los hornos HC de la Empresa FANTAXÍAS	53
Figura 19. Temperatura teórica de las paredes del horno vs. espesor de aislante para lana de vidrio	55
Figura 20. Temperatura teórica de la tapa del horno vs. Espesor de aislante para diversos materiales	57

Figura 21. Cubierta aislada sobre superficie del crisol	59
Figura 22. Relación del O ₂ en el gas de chimenea con el aire en exceso	60
Figura 23. Interfaz del Macro para el cálculo de eficiencia energética de los Hornos HC	71
Figura 24. Hoja para el cálculo del balance de masa	72
Figura 25. Hoja que contiene las constantes para el cálculo de los Cp	73
Figura 26. Hoja que contiene las temperaturas superficiales del horno, para realizar el cálculo de Pérdidas energéticas a través de las paredes	74
Figura 27. Corte transversal del Horno de crisol modificado	79
Figura 28. Esquema del Circuito Térmico en la empresa FANTAXÍAS	91

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Descripción de la hoja de cálculo del funcionamiento de los hornos tipo crisol de la empresa FANTAXÍAS LTDA	69
Anexo B. Circuito térmico: alternativa para la recuperación de los calores residuales de la combustión	75

RESUMEN

TÍTULO*: EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS EN LA PLANTA DE FUNDICIÓN DE LA EMPRESA DE HERRAJES FANTAXÍAS LTDA.

AUTORES: Gerardo Antonio Gordillo Muñoz
Reynaldo Valero Mateus**

PALABRAS CLAVES: Fantaxías Ltda, Horno Crisol, Ahorro de Energía, Gases de chimenea, Circuito Térmico.

DESCRIPCIÓN: El ahorro de energía no es algo nuevo. El éxito económico de un proceso requiere el uso eficiente de la energía. En este estudio, se evaluó el funcionamiento de la sección de fundición de la empresa Fantaxías Ltda., la cual se dedica a la producción de piezas metálicas en fundición de zamak. Para la elaboración de sus productos, Fantaxías Ltda. Cuenta en su sección de fundición con cinco hornos tipo crisol que operan con gas natural como combustible.

El estudio se dividió en tres etapas. La primera etapa contempló el seguimiento de las variables de operación de los hornos crisol de la sección de fundición; en la segunda etapa se realizaron los balances de masa y energía al sistema horno crisol; en la tercera etapa se identificaron los principales focos de pérdida que permitieron el planteamiento de modificaciones para mejorar la eficiencia de los hornos.

Finalmente se diseñó una alternativa para la utilización de la energía residual de los gases de chimenea a la salida de los hornos, que actualmente se arroja al ambiente, para emplearla como fuente de calentamiento indirecto de los baños de galvanizado, por medio de la instalación de un circuito térmico.

Los resultados muestran, que mediante la aplicación de las mejoras propuestas se reduce el consumo de gas natural en un 36%, respecto al consumo actual de la planta.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías FísicoQuímicas. Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Hernández

ABSTRACT

TITLE^{*}: EVALUATION OF HEAT LOSSES IN THE MELTING'S SECTION OF THE FANTAXÍAS LTDA COMPANY

AUTHORS: Gerardo Antonio Gordillo Muñoz
Reynaldo Valero Mateus^{**}

KEY WORDS: Fantaxías Ltda, Pot Furnace, Energy Saving, Flue Gas, Thermal oil heat transfer system.

DESCRIPTION: Energy conservation is not new. The economic success of any competitive process requires the efficient use of energy. In this study, it was evaluated the performance of the melting's section of the Fantaxías Ltda Company; their main activity is design and manufacturing of metallic pieces in zamak. For the elaboration of their products, Fantaxías has in their melting's section five pot furnaces, that operate with natural gas as fuel.

In the first part of the study, it was decided the points of data collection and the main variables of the pot furnace were measured; in the second part, the energy and mass balances of the pot furnaces were made; in the third part, the main focuses of losses were identified, that allowed to design an appropriate solution for the pot furnace and increase energy efficiency.

Finally, it was designed a thermal oil heat transfer system, that recover a part of the residual heat of the flue gases leaving the furnace; this energy is used to heat the galvanized bath.

The results indicate that the consumption of natural gas can reduce in 36%, by means of the application of the improvements, when comparing with actual natural gas consume.

* Degree work

** Facultad de Ingenierías FísicoQuímicas. Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Hernández

INTRODUCCIÓN

El elevado consumo de energía de las industrias y los costos de producción y obtención de la misma son factores que han contribuido a mirar el ahorro y la eficiencia energética como los parámetros fundamentales en la búsqueda de soluciones inteligentes para mejorar las operaciones de producción de una planta.

FANTAXÍAS Ltda. es una empresa dedicada a la fabricación de hebillas y herrajes para uno de los sectores mas fuertes en Bucaramanga, como lo es la industria del cuero, el calzado y la confección. Es de carácter privado y ha sido durante 15 años fuente de empleo para los santandereanos.

En la elaboración de los distintos artículos, la empresa FANTAXÍAS realiza procesos de microfundición, que les permiten mayor versatilidad de producto, elevar la rapidez de la producción y entregar manufactura renovada en menor tiempo

Para el desarrollo de los procesos de microfundición actualmente la empresa FANTAXÍAS cuenta en su Sección de Fundición con 5 hornos de tipo crisol los cuales operan con gas natural como combustible.

El principal problema que presentan los procesos de microfundición es la baja eficiencia de los hornos empleados, ya que solo una pequeña parte de la energía aportada por el combustible se invierte en la fundición y mantenimiento de la aleación fundida, en tanto que la energía restante se pierde en los gases de combustión y a través de las superficies del horno

El proyecto se dividió en dos partes. La primera contempló seguimiento de la operación de los hornos (sección de fundición) durante 6 semanas; dicho seguimiento incluyó registros de consumo de combustible, al igual que mediciones de temperatura en las paredes de los hornos para la evaluación de pérdidas por radiación y convección. Luego con equipo externo se efectuó un muestreo de gases de chimenea. Esta recopilación de datos de operación real, garantiza la representatividad del estudio en condiciones normales de operación de la planta. La segunda parte consistió en la determinación de focos de pérdida que permitieron el planteamiento de mejoras en el diseño de los hornos y el estudio de alternativas que logren disminuir las pérdidas de calor y aumenten la eficiencia térmica en estos equipos.

Para finalizar, se entregó a la empresa una alternativa de ahorro energético, la cual consiste en la instalación de un circuito térmico que aproveche la energía residual de los gases de chimenea para el calentamiento de los baños de galvanizado, junto con una serie de recomendaciones que les servirán como herramienta para una posible reestructuración que conduzca a un mejor aprovechamiento de la energía.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos sobre aspectos básicos de fundición de metales, hornos industriales en particular el horno de crisol, desempeño de hornos, combustible y combustión, y finalmente mecanismos de transferencia de calor. Toda esta información fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.

1.1. FUNDICIÓN DE LOS METALES

En la fundición de metales la materia prima es llevada desde un estado sólido a un estado líquido, por medio del aporte de calor proporcionado por energía eléctrica o combustibles fósiles. A veces son añadidos elementos aleantes que cambian la composición química del metal, dándole de esta manera nuevas propiedades mecánicas.¹

El metal líquido es vertido en moldes. Una vez enfriado el metal, la pieza fundida es extraída del molde y limpiada. El molde es reutilizado, reciclado o destinado a botadores, dependiendo de sí se trata de molde permanente o no permanente.

Dependiendo de la materia prima (es decir, aquellos metales que son ingresados al equipo en el cual se van a fundir) los procesos de fundición se clasifican en 2 grandes grupos:

a). Fundición ferrosa: son materia prima de este proceso todo tipo de piezas de hierro, ya sea las rechazadas por controles de calidad o en buen estado pero en desuso, normalmente llamada chatarra.

¹ <http://www.sofofa.cl/ambiente/documentos/Rubros%20Fundiciones.pdf>.

b). Fundición no ferrosa: son materia prima de este proceso además de los metales básicos, las aleaciones de material a fundir (bronce, aluminio, cobre, zinc, etc.), con frecuencia suministrada en lingotes de elevada pureza.

1.1.1. Tipos de fundiciones para metales no ferrosos²

Los procesos de fundición más frecuentemente usados en las fundidoras de metales no ferrosos son:

a. Fundición a la arena:

Existen dos métodos diferentes por los cuales la fundición a la arena se puede producir. Se clasifica en función de tipo de modelo usado, ellos son: modelo removible y modelo desechables.

En el método empleando modelo removible, la arena comprimida alrededor del modelo el cual se extrae más tarde de la arena. La cavidad producida se alimenta con metal fundido para crear la fundición. Los modelos desechables son hechos de poliestireno y en vez de extraer el modelo de la arena, se vaporiza cuando el metal fundido es vaciado en el molde.

El molde debe poseer las siguientes características:

- Debe ser lo suficientemente fuerte para sostener el peso del metal.
- Debe resistir la acción de la erosión del metal que fluye con rapidez durante la colada.
- Debe generar una cantidad mínima de gas cuando se llena con el metal fundido. Los gases contaminan el metal y pueden alterar el molde.
- Debe construirse de modo que cualquier gas que se forme pueda pasar a través del cuerpo del molde mismo, más bien que penetrar el metal.

² CAPELLO, Eduardo, Tecnología de la fundición, Editorial Gustavo Gili S.A.

- Debe ser suficientemente refractario para soportar la alta temperatura del metal y poderse desprender con limpieza del colado después del enfriamiento.

b. Fundición por Inyección:

La fundición en esta forma y tratándose de gran cantidad de piezas, exige naturalmente un número considerable de moldes. Es evidente que el costo de cada pieza aumenta con el precio del molde.

En las técnicas modernas para la fundición de pequeñas piezas, se aplican máquinas con moldes de metal, que duran mucho tiempo, pudiendo fundirse en ellos millares de piezas, el metal se inyecta en el molde a presión, por cuya razón este sistema se denomina por inyección. El peso de las piezas que se pueden fundir por inyección en moldes mecánicos, varía entre 0.5 gramos hasta 8 kilos. Por lo general se funden por inyección piezas de Zinc, Estaño, Aluminio, y Plomo con sus respectivas aleaciones.

La parte más delicada de la máquina para fundir por inyección es el molde. Este molde tiene que ser hecho con mucho cuidado y exactitud, tomando en cuenta los coeficientes de contracción y las tolerancias para la construcción de las piezas, de acuerdo con el metal y la temperatura con la que se inyecta.

La cantidad de piezas que pueden fundir en un molde y con una sola máquina es muy grande, además, en una hora pueden fabricarse de 200 a 2000 piezas según su tamaño y forma, por lo tanto, repartiendo el costo del molde, de la máquina, así como también los gastos de mano de obra para la mantenimiento del equipo y teniendo en cuenta la gran producción, a de verse que las piezas fundidas en serie por inyección resultan de bajo costos.

c. Fundición Centrifuga:

La fundición centrifuga es el proceso de hacer girar el molde mientras se solidifica el metal, utilizando así la fuerza centrifuga para acomodar el metal en el molde. Se obtienen mayores detalles sobre la superficie de la pieza y la estructura densa del

metal adquiere propiedades físicas superiores. Las piezas de forma simétricas se prestan particularmente para este método, aun cuando se pueden producir otros muchos tipos de piezas fundidas.

Por fundición centrífuga se obtienen piezas más económicas que por otros métodos. Los corazones en forma cilíndricas y rebosaderos se eliminan. Las piezas tienen una estructura de metal densa con todo y las impurezas que van de la parte posterior al centro de la pieza pero que frecuentemente se maquinan. Por razón de la presión extrema del metal sobre el metal, se pueden lograr piezas de secciones delgadas también como en la fundición estática.

Los moldes permanentes se han hecho frecuentemente en la fundición centrífuga de magnesio. Desde entonces las piezas de fundición de magnesio son forzadas nuevamente al molde, las piezas se enfrían mas rápidamente y el aire o gas atrapados se eliminan entre el molde y el material.

Aunque en la fundición centrífuga hay limitaciones en el tamaño y forma de piezas fundida, se pueden hacer desde anillos de pistón de pocos gramos de peso y rodillo para papel que pesen arriba de 40 toneladas, Blocks de maquinas en aluminio.

1.1.2. EL ZAMAK

Las aleaciones a base de Zinc presentan dos familias básicas, las cuales son la Zamak y las aleaciones de Zinc con alto contenido de aluminio. Las Zamak fueron desarrolladas hacia 1920 en fundiciones a presión y desde entonces, se han utilizado ampliamente, el zamak es una aleación que contiene fundamentalmente zinc y aluminio. Contiene también algo de cobre y magnesio lo que le confiere excelentes propiedades (mayor dureza, resistencia a la tensión, a la corrosión, al creep) para obtener piezas por inyección a presión en grandes volúmenes con alta precisión y reproducibilidad de detalles.

Características principales de la aleación comercial ZAMAK-5³

- *Composición:* Aluminio 4%, Cobre 1%, Magnesio 0.05%, Resto Zinc.
- *Resistencia a la tracción:* 32-34 Kg/mm²
- *Dureza Brinell:* 95
- *Densidad:* 6.7 g/cm³
- *Temperatura de fusión:* 386 °C

Usos del Zamak⁴

Electrodomésticos, soporte de espejos, herrajes y hebillas, artículos de oficina manijas, cerraduras, jaladeras, componentes sanitarios, componentes de automoción, componentes eléctricos, componentes electrónicos, piezas acabadas y semi-acabadas, etc.

1.2. HORNOS INDUSTRIALES

Entendemos por hornos industriales los equipos o dispositivos utilizados en la industria en los que se calientan las piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente. El calentamiento puede servir para diferentes aplicaciones, como:

- Fundir.
- Ablandar para una operación de conformado posterior.
- Tratar térmicamente para impartir determinadas propiedades.
- Recubrir las piezas con otros elementos.

³ <http://www.gurelan.es/zamak.html>

1.2.1. Hornos para Fundir Metales

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y diseño. Varían desde los pequeños hornos de crisol que contienen unos cuantos kilogramos de metal a hornos de hogar abierto con capacidades de hasta 200 toneladas. El tipo de horno usado para un proceso de fundición queda determinada por los siguientes factores:

- Necesidades de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible y elevarla a la temperatura de vaciado requerida.
- La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga, como precisión de su composición.
- La producción requerida del horno.
- El costo de operación del horno.

Pueden clasificarse convenientemente en cuatro grupos principales, según el grado de contacto que tenga lugar entre la carga y combustible o sus productos de combustión.

- **Hornos de cubilote:** en los cuales la carga se encuentra en contacto íntimo con el combustible y los productos de combustión. El horno mas importante en este grupo es el de cubilote.
- **Hornos hogar:** en los que la carga esta aislada del combustible pero en contacto con los productos de la combustión. Este tipo de hornos es el horno hogar abierto para la fabricación de acero.
- **Hornos de crisol:** en que la carga se encuentra aislada tanto del combustible como de los productos de la combustión. El principal es el horno que se emplea un crisol que puede calentarse ya sea por coque, gas o petróleo.
- **Hornos eléctricos:** Pueden ser de tipo de acero o de inducción.

⁴ http://www.funmak.com/esp/zamak_esp.htm

La selección del tipo y tamaño de horno dependerá de la aplicación (por ej. si es para fusión o mantención), del número de aleaciones, la producción diaria de cada aleación, la mayor pieza a ser fundida, la continuidad de alimentación de metal, el tipo de combustible. En la fundición de metales no ferrosos, los hornos más utilizados son los hornos de crisol.

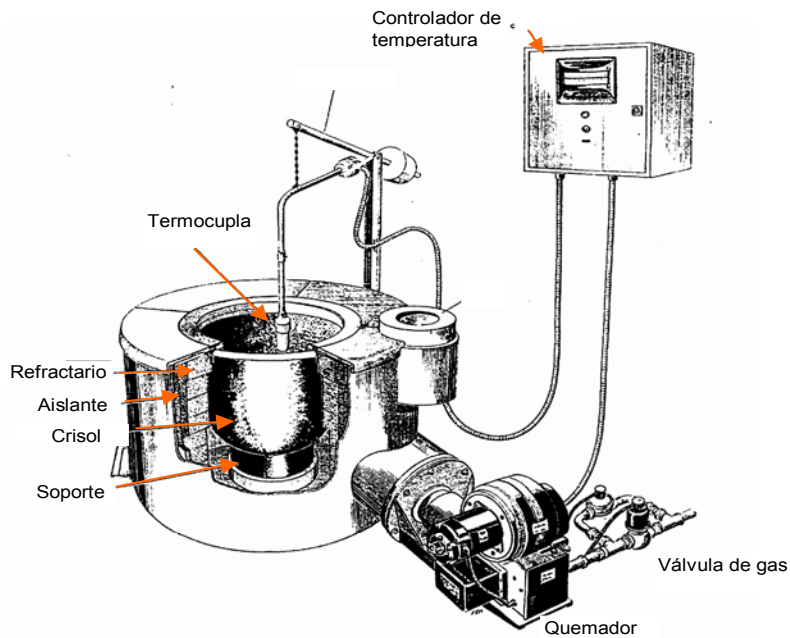
1.2.2. Hornos de Crisol

El proceso de fundir los metales en crisol es uno de los más antiguos y sencillos. Se emplea todavía mucho en las funderías modernas, y probablemente se seguirá usando porque el costo inicial es barato y el metal se funde fuera del contacto con el combustible. El horno de crisol es un equipo utilizado principalmente para la fusión de metales no ferrosos. En la figura 1. se presenta un horno crisol fijo no basculable. En este equipo el metal a ser fundido se encuentra en el interior de un crisol fabricado de grafito, carburo de silicio o de hierro. Este crisol se posiciona en el interior de la cámara de combustión cilíndrica, que a su vez está formada internamente por un revestimiento refractario y externamente por una carcasa de chapa de acero. El revestimiento refractario normalmente se confecciona a partir de ladrillos especiales y posee la finalidad de resistir el elevado calor existente en el interior de la cámara de combustión, mientras que la carcasa tiene la finalidad de sustentar todo el conjunto. El interior de la cámara de combustión debe ser perfectamente cilíndrico para permitir la distribución uniforme del calor.

El crisol se posiciona en el centro de la cámara de combustión y se apoya sobre un pedestal, también confeccionado a partir de material refractario. Sobre el horno existe una tapa para evitar las pérdidas de calor e impedir la salida libre de la llama.

Otra característica importante es que el metal prácticamente no entra en contacto con la fuente de calentamiento (hecho por vía indirecta), y por esto, está sujeto a poca contaminación.⁵

Figura 1. Esquema del horno de crisol fijo no basculable



Las ventajas de los hornos de crisol son su capacidad de cambiar las aleaciones rápidamente, pérdidas bajas de la oxidación, y sus costes de mantenimiento bajos. Las desventajas incluyen bajo rendimiento (tan bajo como el 12%), altas emisiones y limitaciones del tamaño.

⁵ <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller2BAE/hornosind.PDF>.

1.2.3. TIPOS DE HORNO DE CRISOL⁶

Los diferentes tipos de horno de crisol se pueden definir de la siguiente manera:

1. Hornos – Pozo

El crisol es removido del horno y llevado hasta los moldes para vaciar el metal. Este horno se puede construir sobre o bajo el nivel del suelo. En ambos casos el horno es fijo. Suele calentarse por coque que se carga alrededor y por encima de los crisoles (que se sierran con una tapa de refractario) para producir la fusión y el sobrecalentamiento sin necesidad de cargar mas coque.

Los crisoles son de capacidad variable, pueden contener hasta aproximadamente 160 Kg. de acero, aunque son mas corrientes las capacidades de 49 a 90 Kg.: para latones, la capacidad suele ser de 70 Kg. Los crisoles grandes exigen algún mecanismo de elevación que permita sacarlos del horno, mientras los mas pequeños pueden ser manejados con tenazas por uno o dos hombres.

2. Hornos basculables (de crisol fijo)

Son hornos movibles apoyados sobre un sistema de sustentación. Usualmente se les utiliza cuando es necesaria una producción relativamente grande de una aleación determinada. El metal es transferido a los moldes en una cuchara o un crisol precalentado, con la excepción de casos especiales en que es vaciado directamente. El tipo original de horno basculante, con capacidades de 70 a 750 kg de latón, bascula en torno a un eje central. Su desventaja es que el punto de descarga acompaña el movimiento basculante. Para superar este inconveniente se desarrolló un horno basculante de eje en la piquera, con capacidad de 200 a 750 kg de latón, y el modelo moderno es basculado por pistones hidráulicos, otorgando la ventaja de un mayor control en la operación de vaciado.

⁶ HOWARD, Ed. Aguilar, Tratado práctico de Fundición. Pág.139-142.

3. Hornos de crisol fijo no basculables

En los hornos de crisol fijo no basculables (horno estáticos de crisol fijo) existe un solo crisol fijo al horno y que sobresale de la cámara de calefacción, por lo que los gases de combustión no pueden tener ningún contacto con el caldo; como no es posible bascularlos para colar, su contenido de caldo solo puede pasarse a los moldes sacándolo del crisol del horno con una cuchara; son adecuados cuando se necesita tomar pequeñas cantidades de metal a intervalos frecuentes, como, p.ej., cuando se cuele en coquillas. Pueden emplearse como hornos de espera con la sola misión de mantener el metal en estado líquido, pero en algunos casos también se efectúa en ellos la fusión. Su rendimiento térmico es mas bajo para la fusión, sobretodo cuando se trabaja a temperaturas altas, pero representan una verdadera unidad de fusión, de no mucha capacidad, que sirve para una gran variedad de trabajos.

1.3. PROCESO DE COMBUSTIÓN

Se entiende por combustión el proceso de oxidación rápida de un combustible y un oxidante, acompañada de liberación de energía, la cual se aprovecha en diversos procesos industriales. El oxidante puede ser oxígeno o aire, el CO_2 y el H_2O son los productos primarios. La combustión completa requiere la presencia del oxígeno suficiente para que todo el carbono y el hidrógeno del combustible se convierta en CO_2 y H_2O . Durante una combustión incompleta aparecerán otros productos, el más importante de los cuales será el monóxido de carbono (CO).

La energía liberada por unidad de combustible se conoce como calor de reacción y se evalúa utilizando un calorímetro. En su determinación se puede observar que en las paredes del calorímetro se deposita agua que proviene de la condensación

del vapor producido en la combustión, el cual al condensar cede aproximadamente 600 Kcal/kg; éste calor sumado al generado en la combustión recibe el nombre de poder calorífico superior, que es el resultado proporcionado por el calorímetro.

Si ese mismo combustible se quema en un hogar industrial, el vapor de agua existente en los humos no condensa debido a que la temperatura de éstos es siempre superior a 100°C; en estas circunstancias los combustibles no proporcionan las calorías que corresponden al valor obtenido en el calorímetro, sino un valor inferior que recibe el nombre de **poder calorífico inferior**.

Cuando el **poder calorífico superior** PCS se lista a 25°C, el poder inferior de calentamiento PCI, se puede calcular mediante

$$PCI = PCS - 2442 \frac{m_{ag}}{m_c} \text{ kJ/kg de combustible} \quad (1)$$

donde m_{ag}/m_c es la masa de agua formada por unidad de masa de combustible. Las constantes numéricas en las ecuaciones anteriores son simplemente los valores de la entalpía de vaporización a la temperatura dada.

Por lo tanto, la energía aportada por el combustible (Q_c) dado en KJ se puede calcular con base en el poder calorífico inferior (PCI):

$$Q_c = m_c * PCI \quad (2)$$

En la anterior ecuación, m_c es el flujo de combustible en m^3/h . El PCI se tomará en KJ/m^3 .

1.3.1. Combustibles Industriales⁷

Con el nombre de combustibles se designan las sustancias utilizadas para obtener calor. Según sea el estado físico de esas sustancias, los combustibles se clasifican en sólidos, líquidos o gaseosos.

a. Combustibles sólidos

El carbón (con sus variantes), la leña (biomasa), los residuos sólidos, etc., Aunque el carbón desempeñó en su día el papel primordial entre todos los combustibles, hoy en día ha sido desplazado por los combustibles líquidos y gaseosos. Sin embargo, como las reservas de carbón siguen siendo las más importantes de todos los combustibles (con excepción de los nucleares), van cobrando importancia las nuevas tecnologías de hidrogenación y gasificación, que permiten obtener combustibles líquidos y gaseosos a partir de aquella forma sólida.

b. Combustibles líquidos

Dejando aparte el uso como combustibles de alcoholes (metanol, etc.), los combustibles líquidos más usuales son los derivados del petróleo. Prescindiendo de los carburantes (gasolina), y los combustibles para motores (diesel y queroseno), las fracciones del petróleo usadas como combustibles propiamente dicho son el gasóleo y el fuel-oil.

c. Combustibles gaseosos

Los combustibles gaseosos se clasifican en familias. La primera familia comprende los gases manufacturados y se subdivide en tres grupos (gas de ciudad, gas de

⁷ Manuel Márquez M., Combustión y quemadores, MARCOMBO, S.A., Barcelona, 1989. Pág 11-17

coquería y hidrocarburos-aire) ; la segunda familia incluye a los gases naturales; finalmente, la tercera familia comprende a los gases licuados del petróleo (GLP), es decir, propano, butano y sus mezclas.

El gas natural se presenta como el más apropiado combustible para hornos industriales, por poseer las siguientes ventajas, con respecto a otros combustibles fósiles :

- Es un combustible relativamente barato.
- Emite cantidades mucho menores de monóxido de carbono, hidrocarburos reactivos, óxidos de nitrógeno y bióxido de carbono (emite menos CO₂ por unidad de energía producida), que otros combustibles fósiles.
- Por tratarse de un gas, su mezcla con aire y posterior combustión es más fácil que con otros combustibles fósiles.
- La ausencia de partículas y compuestos corrosivos de azufre, facilitan la recuperación del calor residual y, por tanto, las eficacias de su utilización.
- Seguridad en la operación, debido a que en caso de fugas, al ser más ligero que el aire, se disipa rápidamente en la atmósfera. Únicamente, se requiere buena ventilación.
- Además, las reservas de gas natural son abundantes, y su transporte y distribución mediante tuberías enterradas hacen que su impacto sobre el paisaje sea mínimo.

Por su rendimiento y baja emisión de contaminantes, el gas natural es especialmente apropiado para la generación de electricidad y cogeneración, uso de calderas y hornos industriales, automoción, climatización y otros usos en los sectores comercial y doméstico.

1.4. DESEMPEÑO DE LOS HORNOS INDUSTRIALES

Los hornos industriales se mide en función de su eficiencia térmica. Conociendo la cantidad de calor que se suministra al sistema, se entra a calcular cuánto de ese calor es empleado adecuadamente, es decir, cuánto de ese calor es utilizado para fundir el zamak y mantenerlo en su estado líquido a la temperatura requerida en el proceso de fundición. Una vez se conozca esa cantidad de calor, se determina un indicador llamado eficiencia térmica.

La eficiencia térmica de un horno (η) se define como la relación entre el flujo de energía útil (Q_u) y el flujo de la energía aportada por el combustible (Q_c):

$$\eta = \frac{Q_u * 100\%}{Q_c} \quad (3)$$

Este cálculo de la eficiencia se denomina método directo. También se puede hallar la eficiencia utilizando el cálculo de las pérdidas totales (P) o método indirecto así:

$$\eta = \left(1 - \frac{P}{Q_c}\right) * 100\% \quad (4)$$

Puesto que la energía aportada por el combustible será aprovechada en la transformación de la materia prima (Flujo de Energía útil, (Q_u)) y para suplir las pérdidas en chimenea, por paredes, por inquemados, etc. (pérdidas totales P), o sea:

$$Q_c = Q_u + P \quad (5)$$

El método escogido en el presente proyecto ha sido el método indirecto ó método de pérdidas totales, debido a la dificultad que representa calcular el calor absorbido por el zamak (Flujo de Energía útil, (Q_u)), ya que las condiciones de operación de fundición son cambiantes.

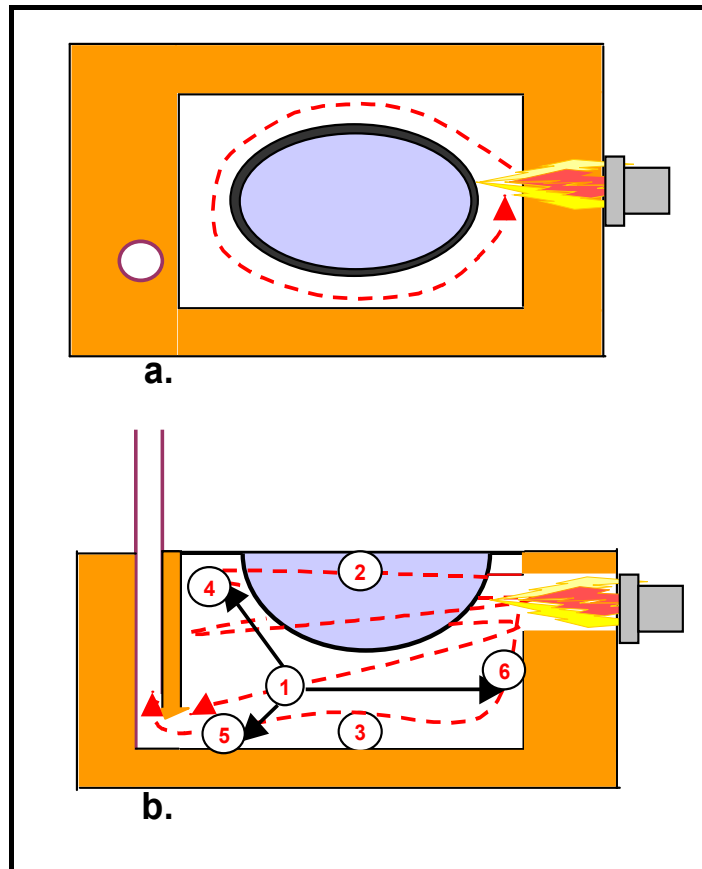
1.5 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN HORNO CRISOL

La transferencia de calor por radiación, convección y conducción se producen simultáneamente en el horno. Aunque a veces con un mecanismo de transferencia más dominante que el otro. En los hornos con temperaturas del orden de 1500°C o más altas, la transmisión de calor es primordialmente por radiación, a estas temperaturas elevadas, la circulación produce muy poca transmisión de calor por convección, pero transporta la llama radiante a otros lugares dentro del horno donde los gases calientes continúan transmitiendo calor principalmente por radiación. La intensidad de la transmisión del calor por radiación desciende rápidamente con temperaturas de hornos más bajas, es así que a temperaturas de 593°C o más bajas, la transmisión del calor convección reviste la mayor importancia. Las velocidades de los gases circulantes son tan elevadas que se consiguen coeficientes iguales e incluso mayores que 28,75 kcal/m².h.°C. En los hornos con temperaturas más bajas, los coeficientes de transmisión elevados solamente se consiguen con velocidades muy altas de los gases del horno, porque la transmisión del calor por radiación a 537°C es menor que 1/10 de la que se produce a 1204°C.⁸

En conclusión, “en la zona de temperaturas del rojo-blanco casi todo el calor se transmite por radiación, cuanto más bajas son las temperaturas menor es la radiación y mayor la convección. A temperaturas del infrarrojo casi todo el calor se transmite por convección”.

En la figura 2., se muestra en forma de diagrama el flujo de calor en un horno de crisol, donde los productos de combustión entran en la cámara de calentamiento tangencialmente cerca de la boca del crisol y salen de ella por el piso del horno; de esta forma las venas frías abandonan el horno y cedan el puesto a las venas calientes. Los elementos superficiales de las paredes y del crisol, como (2) y (3), se calientan por convección por los gases calientes que fluyen a lo largo de las paredes y del crisol. Una molécula de estos gases, tal como la que se indica por (1), radia en todas direcciones, por ejemplo a (4), a (5) y (6). Estos elementos superficiales radian a su vez en todas las direcciones posibles.

Figura 2. Diagrama de transmisión de calor en el interior del horno de crisol.
(a. Vista superior, b. vista frontal).



⁸ Hornos Industriales, W. Trinks, Ediciones URMO, BILBAO, 1961. pág 44-45.

La transmisión de calor desde las paredes de la cámara de combustión hacia las paredes externas del horno es realizada por conducción. La cantidad de calor Q transmitida por conducción se determina está por la Ley de Fourier:

$$Q = (kA / L) (T_{INT.} - T_{EXT.})^{\diamond}$$
 (6)

Donde k se refiere a la conductividad térmica de la pared, A se refiere al área de la pared normal al flujo de calor y L indica el espesor de la pared. T_{int} y T_{ext} son las temperaturas superficiales de la pared por la cual está entrando y saliendo calor respectivamente.

El conjunto (kA/L) se denomina conductancia y su recíproco R es la resistencia al flujo de calor, $R = L/kA$ (h)(°C)/KJ.

En estado estable se cumple que el calor Q transmitido por conducción a través de la estructura del horno es igual al calor Q transmitido al exterior por mecanismos combinados de radiación y convección, el cual se calcula empleando la ecuación general de transferencia:

$$Q_s = U A (T_s - T_a)^{\ast}$$
 (7)

$$1/U = 1/(hc+hr)$$

En donde:

Q_s : Energía perdida por paredes, en W.

A : Área total del equipo expuesta a transferencia de calor, en m^2 .

T_s : Temperatura de pared, en °C.

[♦] B.V. Karlekar, "Transferencia de calor", segunda edición, McGraw Hill, 1994, Pag.5

^{*} B.V. Karlekar, "Transferencia de calor", segunda edición, McGraw Hill, 1994, Pag.22

Ta :Temperatura ambiente, en °C.

U :Coeficiente total de transferencia de calor.

Hc : Coeficiente de transferencia convectiva [W/m²K]

Hr : Coeficiente de transferencia radiactiva [W/m²K]

El coeficiente radiactivo se determina mediante la siguiente ecuación:

$$hr = E \sigma (Ts^3 + Ts^2Ta + TsTa^2 + Ta^3) \quad (8)$$

donde **E** es la emisividad de la superficie, σ es la constante de Steffan-Boltzman [W/m²K⁴]

En el caso del coeficiente convectivo, no es tan sencillo debido a que este depende de la geometría de los sólidos y la velocidad del fluido en contacto con el sólido. Para algunas situaciones típicas, los coeficientes convectivos se pueden calcular mediante el siguiente modelo :

$$hc = k*(Ts-Ta)^{0.25} \spadesuit \quad (9)$$

donde **K** es una constante que depende de la geometría del sólido y su orientación y toma los siguientes valores :

Pared horizontal orientada hacia arriba	k = 2.50
Pared horizontal orientada hacia abajo	k = 1.32
Pared vertical	k = 1.78
Tubo de d_e mm de diámetro exterior	k = 7.4* $d_e^{-0.25}$

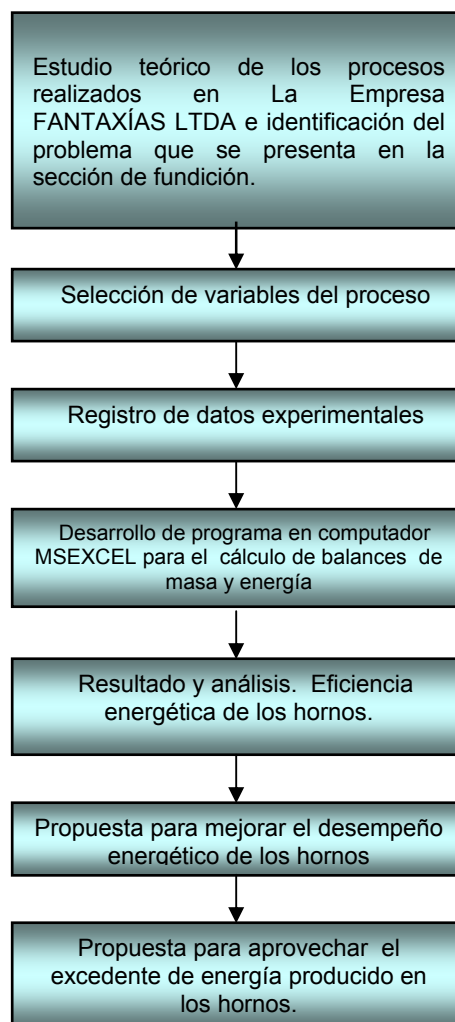
[♠] Manuel Márquez M., Combustión y quemadores, MARCOMBO, S.A., Barcelona, 1989. Pág. 136.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología seguida en el presente estudio fue diseñada, con el fin de llevar un orden dentro de la investigación a través de una serie de pasos que condujeron al cumplimiento de los objetivos del trabajo.

A continuación se presenta las etapas en las cuales se dividió el proyecto.

Figura 3. Etapas del proyecto



2.1. ESTUDIO TEÓRICO DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS POR FANTAXÍAS LTDA E IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA QUE SE PRESENTA EN LA SECCIÓN DE FUNDICIÓN.

En esta primera etapa de la investigación se estudiaron los diagramas de flujo de planta, así como las secciones que participan en la realización del producto; se describió en especial la sección de fundición para conocer el número de hornos, tipo de energía que utilizan, operación y funcionamiento.

Se observó que algunos hornos carecían de instrumentación adecuada y se encontraban con serios daños en su estructura física. Otro problema que se presenta en la sección de centrifugado es la alta temperatura a la que están expuestas los operarios que laboran en la sección.

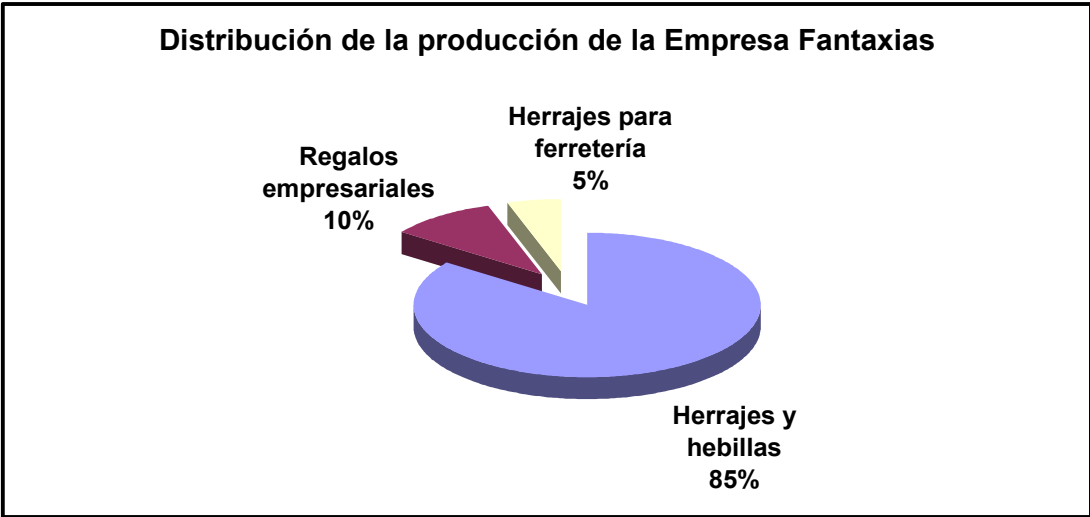
2.1.1 Descripción de la Empresa

FANTAXIAS LTDA está catalogada como una mediana empresa de la ciudad de Bucaramanga que se dedica a la producción de herrajes y piezas metálicas en fundición de zamak y troquelaría en lámina y alambre, para la Industria del Cuero y la Confección, regalos empresariales, y herrajes de ferretería. Además del proceso de fundición de zamak para la obtención de las piezas metálicas, FANTAXÍAS cuenta en sus instalaciones con una sección de galvanoplastia, en la que se realiza el recubrimiento de las piezas por medio del proceso de electrodeposición. Es por esta razón que la empresa puede ser clasificada en 2 sectores industriales: empresa fundidora de metales no ferrosos, y empresa del sector de galvanoplastia.

FANTAXÍAS en la actualidad procesa 10 Toneladas de zamak mensuales, en promedio, para el desarrollo de sus actividades; el 85% de la producción de la empresa son herrajes y hebillas para industria del cuero y confección, el 10% son

regalos empresariales, en tanto que el 5% de la producción se destina a herrajes de ferretería (ver figura 4.).

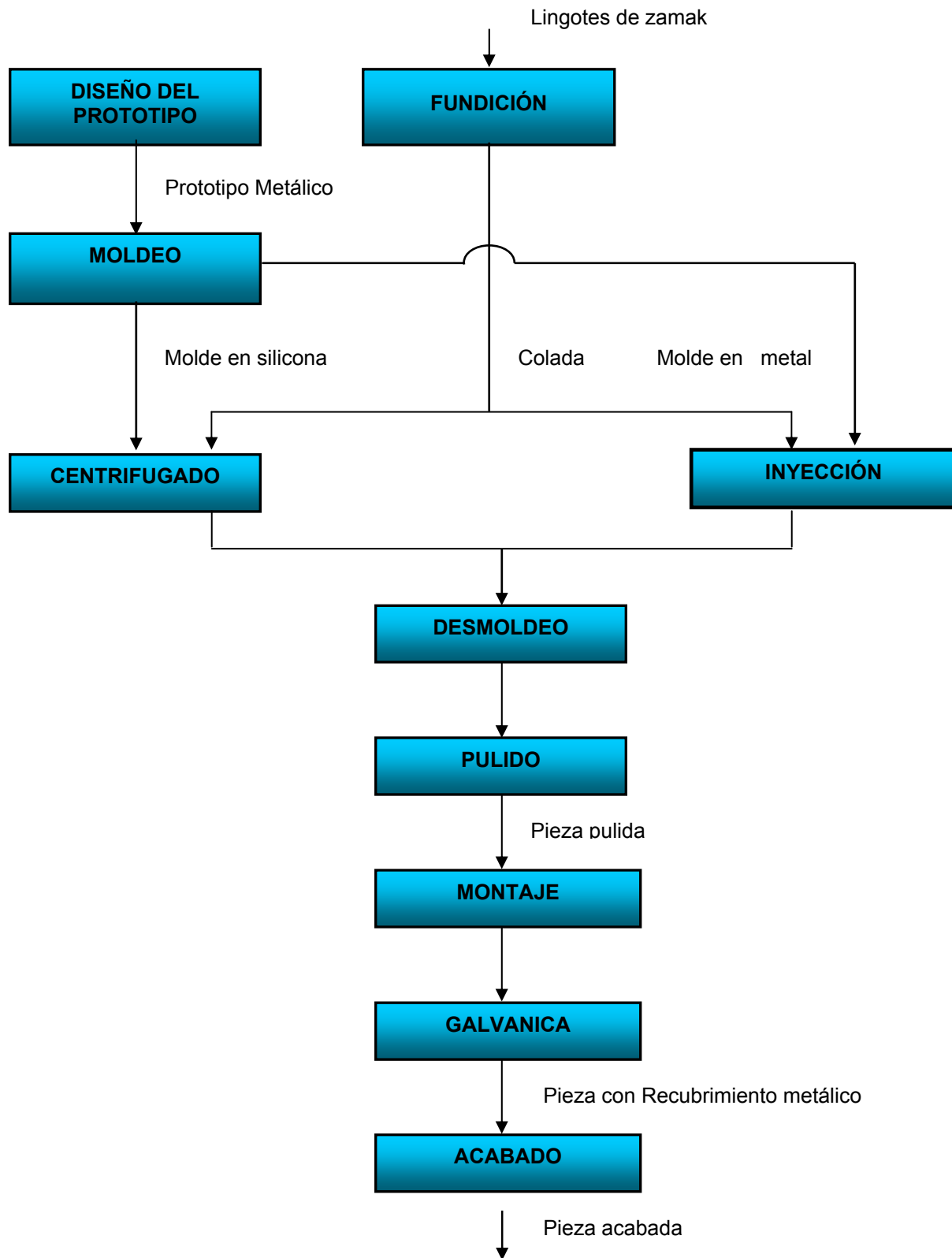
Figura 4. Distribución de la producción de la Empresa FANTAXÍAS



La empresa cuenta con quince años de experiencia en la producción y la comercialización de sus productos. FANTAXÍAS Ltda. vende en todo el territorio nacional, y ha exportado desde 1994 a países como México, Guatemala, Honduras, Puerto Rico, República Dominicana, Costa Rica, Venezuela, Ecuador y Chile. Su planta base de personal es de 100 personas y cuenta con proveedores de servicio de mano de obra en la reclusión de mujeres y las vecinas de la Empresa.

Para la elaboración de los distintos artículos la empresa realiza los procesos que se especifican en la figura 5.; y que son descritos a continuación.

**FIGURA 5. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN
PIEZAS METALICAS**



DISEÑO DEL PROTOTIPO

Para un mejor desempeño competitivo en el mercado la empresa FANTAXÍAS Ltda. cuenta con un departamento de diseño especializado en diseños propios tanto herrajes, como de piezas de colección y decorativas.

MOLDEO

Los moldes son elaborados en silicona vulcanizada, los cuales serán utilizados en el proceso de microfundición por centrifugado; también se elaboran moldes en metal, que se emplean en el proceso de fundición por inyección para obtener las piezas (hebillas-herrajes). La elección del molde se basa en la cantidad de piezas que van a ser elaboradas; para producciones por encima de 50,000 piezas resulta más rentable la fundición por inyección, en tanto que para producciones por debajo de esta cantidad es más económico el molde de silicona debido a que el costo inicial es más bajo en relación al costo inicial del molde metálico. Estos moldes deben ser hechos con mucho cuidado y exactitud, tomando en cuenta los coeficientes de contracción y las tolerancias para la construcción de las piezas, de acuerdo con el metal y la temperatura con la que se inyecta.

FUNDICIÓN-CENTRIFUGACIÓN-INYECCIÓN

En la sección de fundición la materia prima (Lingotes de zamak o retornos) es fundida, por medio del aporte de calor proporcionado por el combustible; la adición de un desgasificante (APARTAGAS H7) evita la formación de burbujas para obtener una colada homogénea. El metal líquido es retirado del crisol del horno con una cuchara refractaria y se introduce en los moldes de silicona a través de un bebedero. Utilizando la acción de una fuerza centrífuga los moldes se hacen girar mientras se solidifica el metal. Un procedimiento alternativo consiste en la inyección de la colada sobre moldes metálicos mediante la acción de una fuerza de presión.

DESMOLDEO

Cuando las piezas se han solidificado y enfriado hasta el punto de poder ser manipulada sin peligro, se procede a extraer las piezas del molde y se clasifican, teniendo en cuenta que cumplen las características del prototipo. Las piezas no conformes y los sobrantes son de vueltas al proceso de fundición.

PULIMENTO

Las piezas producidas en los procesos de fundición presentan irregularidades y asperezas, las cuales se eliminan llevando a cabo procesos de lijado, limado y esmerilado. Todas las piezas que se fabrican en la empresa pasan por el proceso de vibrado. Este proceso se realiza en una máquina especial que se encarga de darle un acabado liso y brillante a las piezas.

MONTAJE

En esta etapa se adicionan los complementos a las hebillas y herrajes; y para tal fin se realizan operaciones mecánicas como roscado y taladrado que facilitan las tareas de montaje.

GALVANIZADO

El proceso de galvanizado es un de los más importante en la elaboración de las piezas. Aquí se le brinda el acabado que requieren las piezas por medio de baños electrolíticos; los metales que se utilizan normalmente en estos baños son: cobre, níquel, oro, latón. Estos evitan que las piezas se oxiden o se deterioren y además le dan una mejor presentación.

TERMINADO O ACABADO DE PIEZAS

En esta sección se les da las piezas el color o el brillo que requieren según las especificaciones del diseño, por medio de dos procesos básicos: Pintura y Satinado.

2.1.2 Descripción de los Hornos Tipo Crisol de la Empresa FANTAXÍAS LTDA

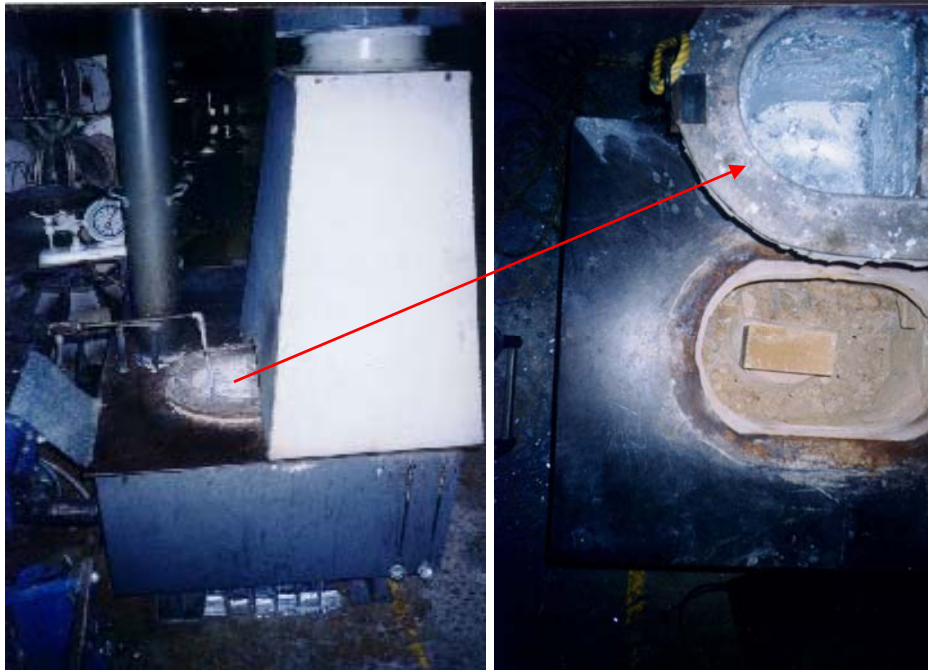
La empresa FANTAXÍAS cuenta en la sección de fundición con 5 hornos tipo crisol no basculable, los cuales por sus características se clasificaron en 2 grupos:

a. Hornos Tipo crisol con cabina y un solo crisol

Figura 6. Hornos Tipo crisol con cabina y un solo crisol

a. Vista general del horno HC5

b. Vista superior del horno HC5



En este grupo se encuentran los hornos identificados en la empresa con los números 2, 3 y 5, los cuáles recibirán en este trabajo la nomenclatura HC (Horno con Cabina),

debido a que su principal característica es la presencia de una cabina como se ve en la figura 7.

A continuación se presenta una descripción mas detallada de este tipo de hornos.

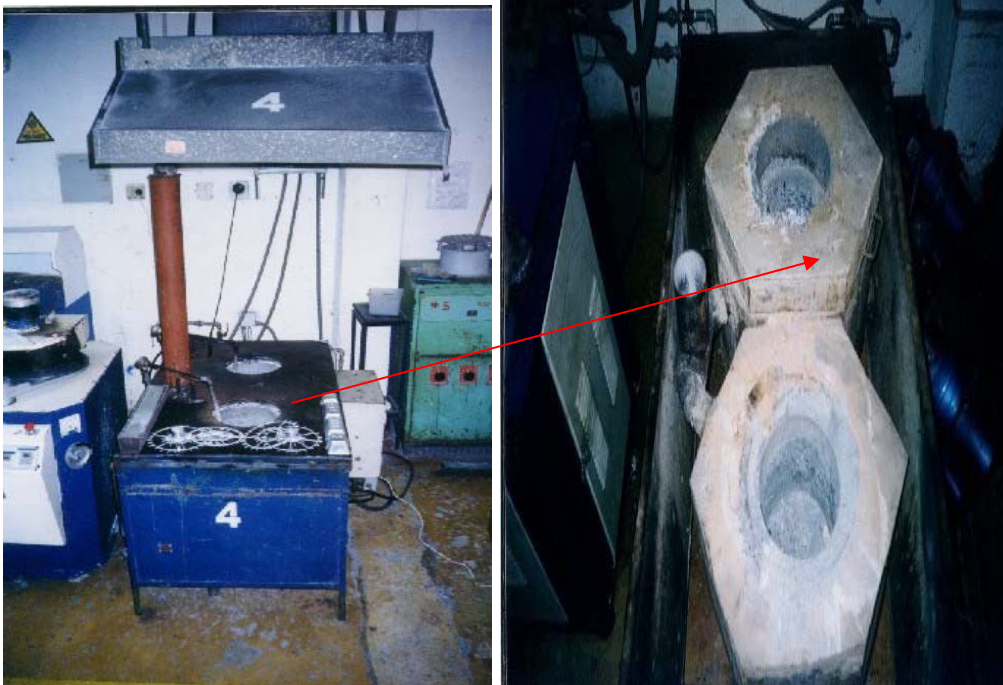
- Número de crisoles 1
- Capacidad del crisol 180 Kg.
- Forma de crisol Ovalado
- Entrada de gases de combustión Tangencial al Crisol
- Número de quemadores 1
- Entrada de aire a la cámara de combustión A través de un ventilador
- Dimensiones (mm) 1050*600*690

b. Hornos Tipo crisol atmosférico, sin cabina y dos crisoles

Figura 7. Hornos Tipo crisol atmosférico, sin cabina y dos crisoles

a. Vista general del horno HA4

b. Interior del horno HA4



Estos hornos que son identificados en la empresa con los números 1 y 4, recibieron la nomenclatura HA (Horno Atmosférico), debido a su principal característica, el quemador es atmosférico.

A continuación se presenta una descripción mas detallada de este tipo de hornos.

- Número de crisoles 2
- Forma de crisol Redondo
- Capacidad del crisol 60 Kg.
- Número de quemadores 2
- Entrada de aire a la cámara de combustión Quemador atmosférico
- Dimensiones (mm) 1270*780*790

El estudio se le realizó solo a los hornos HC, debido a que los hornos atmosféricos serán reemplazados posteriormente.

2.1.3 Descripción de los Hornos HC

Estos hornos son de crisol fijo no basculante, en estos equipos el crisol está fijo al horno, sus bordes salen fuera de la cámara de caldeo y no hay posibilidad de contacto con los gases de combustión. La cámara de combustión está hecha de ladrillo refractario, seguido de 2 hileras de ladrillo aislante y por último la carcaza del horno la cuál está construida con láminas de acero y separadas por una capa de lana de vidrio de 1 pulgada de espesor (ver figura 8).

Figura 8. Interior del horno crisol HC



En el interior de la cámara de combustión se halla el crisol fabricado de hierro y con capacidad para 180 kg de zamak. El quemador está ubicado de forma tal, que el recorrido de la llama sea tangencial al crisol; esta disposición permite conseguir mayor uniformidad de temperatura al interior de la cámara. El aire para combustión es suministrado por un electroventilador de 1 Hp y 1750 rpm, el cual suministra un caudal de aire fijo.

2.1.4 Sistema de Control en los Hornos

El propósito del sistema de control en los hornos de fundición de FANTAXÍAS es mantener la temperatura del zamak dentro del crisol a unos 470 °C aproximadamente, esto debido a que a temperaturas menores podría presentarse solidificación del zamak y a temperaturas mayores se acelera la oxidación del zamak lo que ocasiona pérdidas de material, además se presenta mayor gasto de combustible. En la figura 9 se presenta el panel de control de un horno crisol HC.

Figura 9. Panel de control



Para lograr este objetivo el sistema de control dispone de:

- Sensor de temperatura.
- Regulador electrónico digital para la selección y control de la temperatura.

- Pilotos indicadores (ON-OFF) del estado de proceso.. Luces indicadoras del horno en un proceso de calentamiento, mantenimiento, etc.
- Electroválvula, elemento final del sistema de control que permite o impide el flujo de combustible según los requerimientos del horno.

2.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES DE PROCESO

El análisis energético comienza con la recolección de datos en los puntos señalados en la figura 10. y que son presentados en la tabla 1. en la que se indican las principales variables que se deben medir o calcular para realizar el balance de masa y energía.

Figura 10. Esquema del proceso de fundición de zamak en un horno crisol.

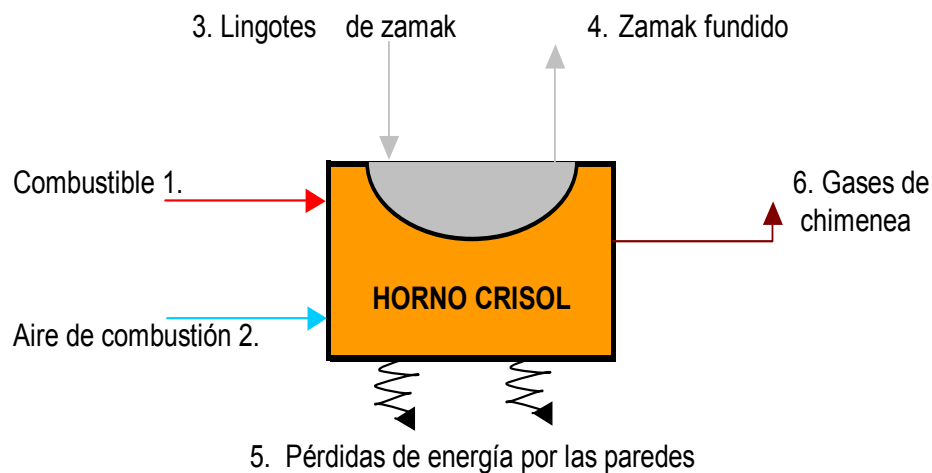


Tabla 1. Recolección de datos para el cálculo de los balances de masa y energía.

PUNTO DE MUESTREO	DATOS A REGISTRAR
(1) COMBUSTIBLE	Análisis próximo de combustible Flujo de combustible Temperatura del combustible
(2) AIRE DE COMBUSTIÓN	Flujo de aire de combustión Temperatura de entrada Humedad relativa
(3) SUPERFICIES DEL HORNO	Temperatura promedio de paredes Área de las paredes del horno
(4) GASES DE CHIMENEA	Flujo de gases Temperatura de los gases Composición: % en volumen %CO ₂ %O ₂
(5) LINGOTES DE ZAMAK	Temperatura de entrada Composición del material Flujo de carga
(6) ZAMAK FUNDIDO	Temperatura de salida Flujo de descarga

Los puntos de la Tabla 1. a los que se les hizo seguimiento fueron el 1, 2, 3 y 4; los puntos 5 y 6 que permiten evaluar el calor útil, no fueron tenidos en cuenta debido a que la eficiencia del horno se evaluó por el “Método de pérdidas” tal como se describió en el Marco Teórico.

A continuación se describe la manera en que fue recolectada la información necesaria en cada punto de muestreo.

1. Combustible

- **Tipo de combustible.** Para el funcionamiento de los hornos de crisol, FANTAXÍAS Ltda. utiliza gas natural suministrado por la empresa GASORIENTE S.A.
- **Análisis próximo.** La Composición del gas natural fue suministrada por la empresa GASORIENTE, la cual se presenta a continuación :

Tabla 2. Análisis próximo del gas natural

CROMATOGRAFÍA GASODUCTO PAYOA	
COMPONENTE	MOLAR %
n Hexano	0.032
Propano	0.264
Isobutano	0.003
Butano	0.005
Neopentano	0.002
Isopentano	0.002
Nitrógeno	0.182
Metano	89.742
CO ₂	1.712
Etano	8.024
n Heptano	0.032
Poder calorífico	1061.24 BTU/ft ³
Gravedad específica	0.652

- **Flujo de combustible.** La sección cuenta con cinco hornos que no tienen medidor individual de gas, por consiguiente la medición de consumo de combustible en los hornos, se hizo registrando el flujo reportado por el contador general ubicado a la entrada del edificio. Esto se hizo porque en FANTAXÍAS el uso del gas natural es único y exclusivo para la fundición del zamak.

Durante 5 semanas, cada hora (8-11 a.m 2-5 p.m) se registró la lectura del contador en el “Formato para el registro diario del consumo de gas” (Ver Tabla 3), y al final del día se promediaban los valores obtenidos

Tabla 3. Formato para el registro diario del consumo de gas

Fecha: _____

Hora	Consumo de gas (m3)
8 - 9 am	
9 - 10 am	
10 - 11 am	
2 - 3 pm	
3 - 4 pm	

Consumo promedio del día (m³/h)

Con el fin de reducir el número de datos y facilitar el manejo de la información, se elaboró una “Hoja de registros de consumo de gas diario” (Ver Tabla 4). Esta hoja consta de tres secciones principales. En la primera sección aparecen reportados los valores de consumo de gas promedio que se registraron durante los días del seguimiento. En la segunda sección, en la fila sombreada se registra la fecha y se marca una X al frente del consumo de gas, según corresponda, para ese día. En la tercera sección (Frecuencia) se contabiliza el número de veces que se repitió el consumo de gas específico al finalizar el período de muestreo.

Tabla 4. Hoja de registros de consumo de gas diario

Consumo de gas m ³ /h	REGISTRO DIARIO														FRECUENCIA
	Nov.03 10														
10,5 - 11															
11 - 11,5															
11,5 - 12															
12 - 12,5															
12,5 - 13															
13 - 13,5															
13,5 - 14	X														
14 - 14,5															
14,5 - 15															
	TOTAL														

El seguimiento de flujo de combustible incluyó además la recolección y análisis de datos históricos del año 2003, con el fin de establecer una relación entre carga de zamak procesado y gas natural consumido.

2. Aire de combustión

- **Temperatura de entrada.** La temperatura del aire, se registró cerca del ventilador que suministra el aire al horno, mediante un termómetro de bulbo seco.
- **Humedad absoluta del aire.** El peso del vapor de agua contenido en un volumen de aire se conoce como Humedad Absoluta y se expresa en unidades de masa de agua por masa de aire seco. En el proceso de combustión es adecuado

emplear aire seco en vez de aire húmedo, ya que en el último caso parte de la energía liberada se invierte en calentar el agua presente en el aire.

La Humedad absoluta se calcula a partir del dato de Humedad Relativa (reportada en informes meteorológicos), de la presión atmosférica y de la temperatura. Para el caso de Bucaramanga la Humedad relativa promedio es de un 60%, según información reportada por el IDEAM.⁹

- **Flujo de aire.** El flujo de aire se mide con un anemómetro, el cual se ubica a la entrada de la “toma de aire” del ventilador; el anemómetro reporta la velocidad del aire, este dato junto con el área transversal por donde ingresa el aire permite calcular el caudal.

3. Superficies del horno

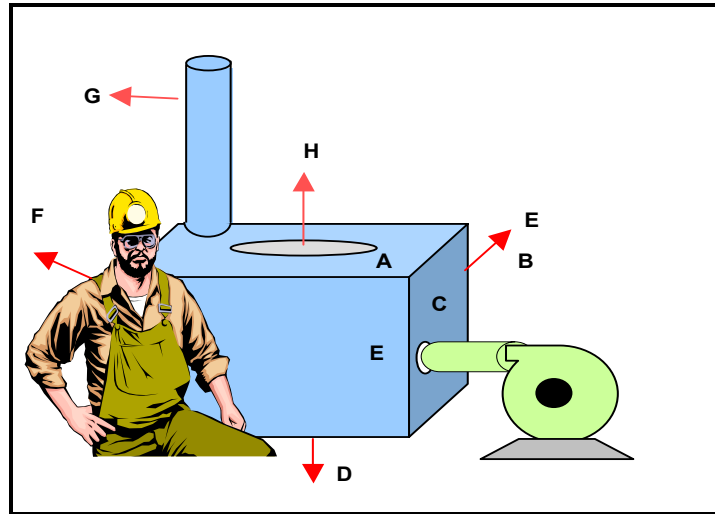
Las pérdidas por superficies se dan debido a la diferencia de temperatura entre las paredes del horno y su medio circundante, por medio de mecanismos de transferencia de calor convectivos y radiactivos.

En esta etapa se midieron las temperaturas de cada una de las paredes de los hornos, con ayuda de un termómetro infrarrojo con puntero láser APRISA; además se utilizó una cinta negra Hb-100 para recubrir los puntos de muestro de cada superficie y así medir correctamente la temperatura; esta cinta sirve además para ajustar la emisividad del termómetro infrarrojo a 0.95.

En la Figura 11. se indican las superficies del horno en las que se realizaron las mediciones y la nomenclatura asignada.

⁹ www.ideam.gov.co

Figura 11. Superficies del horno

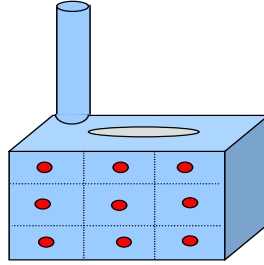


La nomenclatura de la figura 11. corresponde a:

- Superficie A. Corresponde a la tapa superior del horno, exceptuando la superficie expuesta del crisol(H).
- Superficie B. Pared opuesta al sitio del trabajador.
- Superficie C. Pared donde se encuentra el quemador.
- Superficie D. Tapa inferior del horno.
- Superficie E. Pared adyacente al trabajador.
- Superficie F. Opuesta a la ubicación del quemador.
- Superficie G. Área exterior de la chimenea.
- Superficie H. Área expuesta del crisol.

Las mediciones de temperatura se realizaron durante 2 semanas. Cada pared del horno fue dividida en nueve nodos a los cuales se les midió la temperatura. (ver figura 12.)

Figura 12. Superficie adyacente al trabajador dividida en nodos



Debido a que en las paredes las diferencias de temperatura no son muy grandes y a que el área de las mismas es pequeña, fueron promediadas obteniéndose un valor con el cual se realizaron los cálculos de pérdidas energéticas a través de cada una de las paredes. Los datos fueron registrados en el siguiente formato:

Tabla 5. Formato para el registro de temperaturas.

Fecha: _____

Superficie del horno	Área (m ²)	Temperatura de superficie (°C)	Temperatura ambiente (°C)
A			
B			
C			
D			
E			
F			
G			
H			

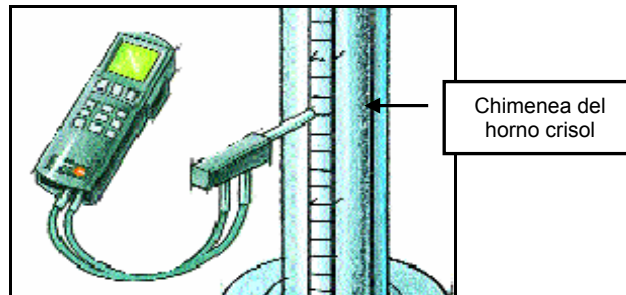
4. Análisis de gases de chimenea

La medición de los gases de chimenea es necesaria para conocer los niveles de O₂ presente en la mezcla de gases emitidos, el porcentaje de combustible que no reaccionó, la carga contaminante de los gases y por último para realizar el balance de masa y energía.

Las mediciones de los gases de chimenea se realizaron en los hornos HC2, HC3 y HC5, con el equipo *Portable Combustion Analyzer (PCA), Model 30* de *BACHARACH, Co.* El punto de monitoreo se ubicó a una altura de 2.10 m medidos

a nivel del suelo, lugar en el que se ensambló un tubo cuyo diámetro fue de $\frac{1}{2}$ in (Ver Figura 13) , de tal manera que permitiera la succión de gas de chimenea .

Figura 13. Punto de muestreo de gases de chimenea



El BACHARACH efectúa un análisis en base seca de los gases de chimenea, mostrando la siguiente información:

CO (ppm)

% CH₄

% O₂

% CO₂

Temperatura de gases de chimenea

Temperatura ambiente

Eficiencia de la combustión

Exceso de aire

2.2.1 Balance de Masa en el Horno Tipo Crisol

Para realizar el balance de masa a la unidad de operación del horno , en primer lugar se parte por caracterizar el sistema; en este caso se trata de flujos de aire y gas que ingresan al horno y de los gases de combustión que lo abandonan debido a que la operación es estable. Por consiguiente bajo estas condiciones el sistema se puede representar como aparece en la figura 14.

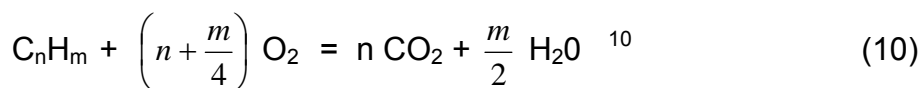
Figura 14. Esquema del balance de masa para el sistema combustible-aire



En la cámara de combustión del horno, el combustible reacciona con el aire, liberando la energía necesaria para la operación del horno. El balance de masa para la reacción de combustión parte de conocer la siguiente información:

- Análisis próximo del combustible.
- Flujo de combustible.
- Análisis ORSAT en gases de combustión.
- % de aire en exceso.
- Humedad absoluta del aire.

Para realizar el balance de masa es necesario conocer la estequiometría de la reacción. La reacción de combustión de un hidrocarburo de fórmula C_nH_m se escribe como:



La cual expresa que 1 kmol de C_nH_m requiere, para su combustión completa, $(n+m/4)$ kmol de oxígeno; y produce n kmol de dióxido de carbono o $m/2$ kmol de vapor de agua.

1. ¹⁰ Foster Wheeler Iberia, División de Hornos y Energía. Memorias de Curso de Combustión. Gerencia Complejo Barrancabermeja. ECOPETROL. Octubre, 1997.

Si se realizan balances de masa por componentes molares, en sistemas en los que ocurre una reacción de combustión, se deben incluir los términos de generación y consumo, en tanto que si se hacen los balances parciales por elementos, no se requiere la inclusión de dichos términos.

En la tabla 6. se muestra los balances molares por componentes para el sistema combustible-aire

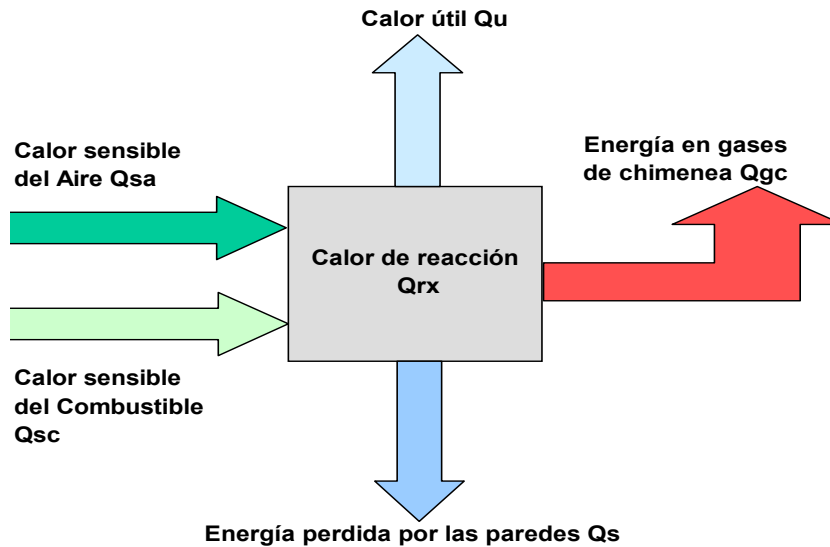
Tabla 6. Balance molar para la reacción de combustión.

CORRIENTE	COMPUESTO	ENTRA	REACCIONA	SALE
FC	Combustible	Metano		
		Etano		
		CO2		
		Propano		
		Nitrógeno		
		nHexano		
		nHeptano		
		Isobutano		
		Butano		
		Neopentano		
Isopentano				
FA	Aire	Oxígeno		
		Agua		
		Nitrógeno		
FGC	Gases de Chimenea	CO2		
		CO		
		Nitrógeno		
		Agua		

2.2.2 Balance de Energía en el Horno Tipo Crisol

El balance de energía para el sistema horno crisol se representa en la figura 15.

Figura 15. Esquema de balance de calor



La energía liberada por el combustible (Q_{rx}) es aprovechada para fundir los lingotes de zamak y mantenerlos en estado líquido (Calor útil Q_u); la otra parte se pierde en los gases de chimenea (Q_{gc}) y por las paredes del horno (Q_s). El balance energético se expresa como:

$$Q_{sa} + Q_{sc} + Q_{rx} = Q_u + Q_s + Q_{gc} \quad (11)$$

A continuación se presenta una tabla donde se resumen todos los modelos requeridos para los cálculos de los calores involucrados en el balance de energía (ver tabla 7.).

Tabla 7. Nomenclatura usada en el balance de energía

Nomenclatura	Unidades	Modelo
Qc	KJ/h	$Q_c = F_c \cdot Q_{re}$ <p>En donde Fc es el flujo de combustible y Qre el calor de combustión a 25 °C y a Presión constante.*</p>
Qs	KJ/h	$Q_s = U \cdot A \cdot (T_s - T_a)$ $1/U = 1/(h_c + h_r)$ <p>En donde: Qs : Energía perdida por paredes, en W. A : Área total del equipo expuesta a transferencia de calor, en m2. Ts, Ta : Temperatura de pared y ambiente, en °C. hc, hr : Coeficiente de transferencia convectiva y radiactiva [W/m2K] U : Coeficiente total de transferencia de calor.</p>
Qgc	KJ/h	$Q_{gc} = \sum M_{gc} \cdot C_{pg} \cdot (T_{gc} - T_a)$ <p>En donde Mgc: Corresponde al flujo másico de cada componente presente en los gases de chimenea. Cpg. Capacidad calorífica del componente. Tgc. Temperatura de los gases de chimenea. Ta. Temperatura ambiente.</p>
Qu	KJ/h	<p>Se halla por el metodo pérdidas* *(ver marco teorico 1.4)</p>

Para el cálculo del balance de masa y energía, se hizo un MACRO en MSEXCEL; este programa es de gran ayuda porque proporciona una forma de cálculo rápida y precisa, además permite cambiar las condiciones de operación y calcular nuevamente los balances.

En el Macro se utilizan todas las ecuaciones planteadas hasta el momento. La descripción del Macro, su interfaz, las variables de entrada y los resultados que reporta se pueden consultar en el Anexo A.

2.3 PROPUESTA PARA APROVECHAR DE LA EMPRESA EL EXCEDENTE DE ENERGÍA PRODUCIDO EN LOS HORNOS

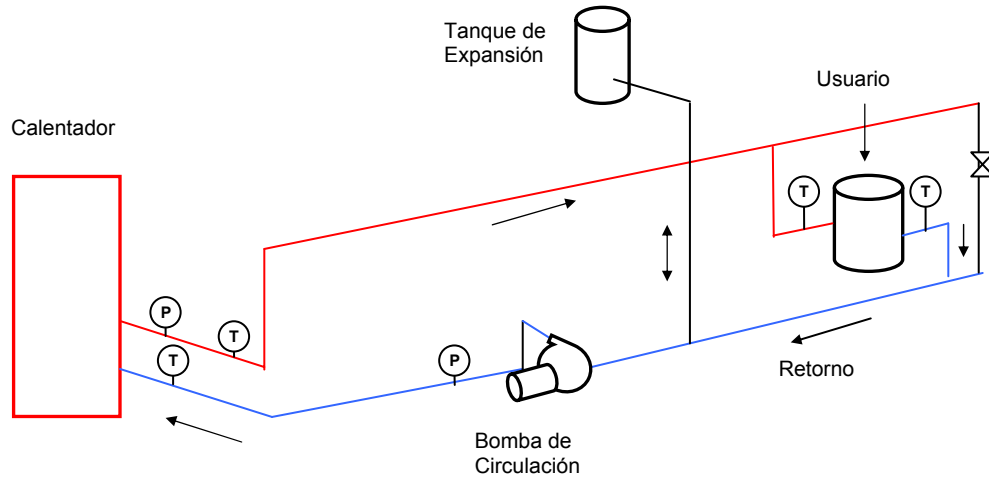
Como alternativas para aprovechar el calor, se identificaron las corrientes con alto contenido energético (gases de combustión) y que podían servir para transferir energía a otra sección de la empresa; esto se hizo basándose en el estudio teórico de los procesos realizados en la Empresa FANTAXÍAS.

La revisión bibliografía permitió encontrar diferentes alternativas para obtener ahorros energéticos en los hornos. La alternativa que resulto más atractiva debido a que podría ser adaptada a la situación de la planta de la Empresa FANTAXÍAS fue la instalación de un circuito térmico (Ver Anexo B.).

Con la implementación de un circuito térmico, se desea recuperar la energía contenida en los gases de chimenea a la salida de los hornos de la sección de fundición, que actualmente se arroja al ambiente, para utilizarla como fuente de calentamiento de los baños de la sección de galvanizado.

Esta alternativa consiste en hacer circular un aceite térmico a través de un circuito cerrado (ver figura 16). El aceite térmico es impulsado a través del circuito por acción de una bomba, la cual debe ser seleccionada de tal modo que garantice una condición de flujo turbulento. El aceite impulsado por la bomba fluye por un serpentín ubicado dentro del horno, donde gracias a la energía que le aportan los gases de combustión incrementa su temperatura (contenido energético). Después que el aceite ha circulado a través del horno, ingresa a un serpentín inmerso en el tanque de galvanizado, donde el aceite transfiere la energía adquirida en el horno, elevando la temperatura del baño. Una vez que abandona el baño de galvanizado, el aceite retorna a la succión de la bomba para iniciar nuevamente el ciclo.

Figura 16. Esquema de circuito térmico



REQUISITOS DEL CIRCUITO TÉRMICO

- El circuito térmico debe suministrar como mínimo la energía requerida para mantener la temperatura de los baños galvanizado .
- Asegurar 'larga vida' al circuito térmico evitando la exposición del serpentín del calentador a flujos de calor por unidad de área muy elevados, los cuales acortan la vida del aceite y promueven la corrosión de la tubería.
- El circuito térmico no puede significar un riesgo para la seguridad de los trabajadores de las secciones de fundición y galvanizado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El objetivo del análisis térmico en los hornos de crisol, es hallar la distribución de pérdidas en el horno, calcular la eficiencia térmica del mismo e identificar los principales focos de pérdidas o potenciales de ahorro de energía.

Después que se ha evaluado la situación, se procede a identificar las causas del deficiente funcionamiento del horno o de la operación, se plantean alternativas para su corrección y para recuperar energía residual en el horno.

Lo anterior con el fin de disminuir el consumo de combustible, aprovechar al máximo la energía disponible y aumentar la eficiencia térmica de los hornos.

3.1 RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO A LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

1. Combustible.

- **Tipo de combustible.** Gas natural
- **Análisis próximo del combustible.** El gas natural suministrado por GASORIENTE tiene la siguiente composición:

Tabla 8. Análisis próximo del gas natural

CROMATOGRAFÍA GASODUCTO PAYOA	
COMPONENTE	MOLAR %
n Hexano	0.032
Propano	0.264
Isobutano	0.003
Butano	0.005
Neopentano	0.002
Isopentano	0.002
Nitrógeno	0.182
Metano	89.742
CO ₂	1.712
Etano	8.024
n Heptano	0.032
Poder calorífico	1061.24 BTU/ft ³
Gravedad específica	0.652

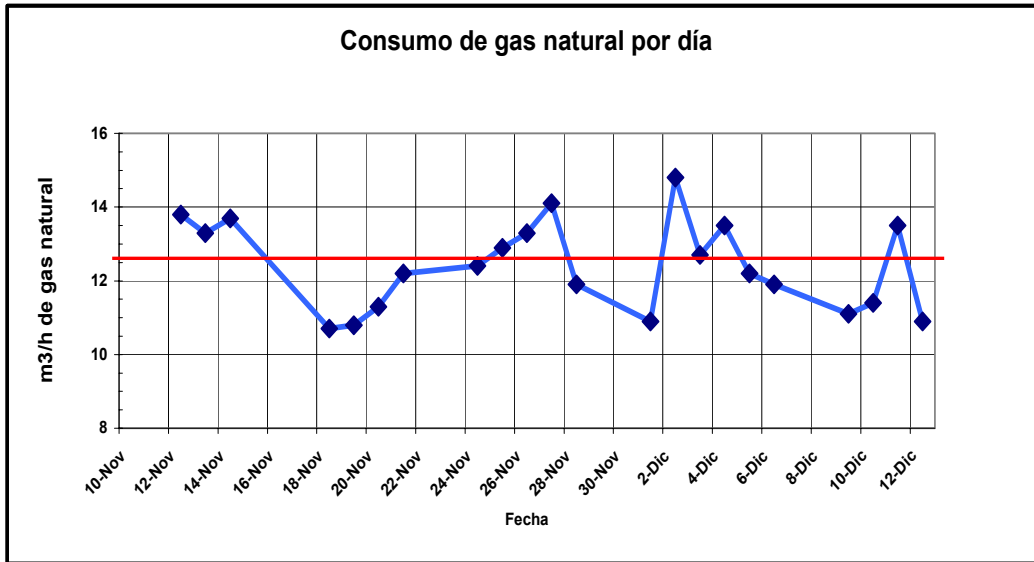
- **Flujo de combustible.**

A continuación se presenta la “Tabla 4. Hoja de registro de consumo de gas “ diligenciada para los días de Noviembre 10 a Diciembre 12 de 2003.

Tabla 9. - Hoja de registros de consumo de gas de la sección de Fundición

Consumo de gas m3/h	REGISTROS														FRECUENCIA										
	Nov-03							Dic-03																	
	10	11	12	13	14	18	19	20	21	24	25	26	27	28		1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
10,5 - 11				X	X																	X			3
11 - 11,5						X													X	X					3
11,5 - 12											X							X							2
12 - 12,5							X	X				X					X						X		5
12,5 - 13									X					X											2
13 - 13,5		X								X						X									3
13,5 - 14	X		X																		X				3
14 - 14,5											X												X		2
14,5 - 15													X												1
	TOTAL																							24	

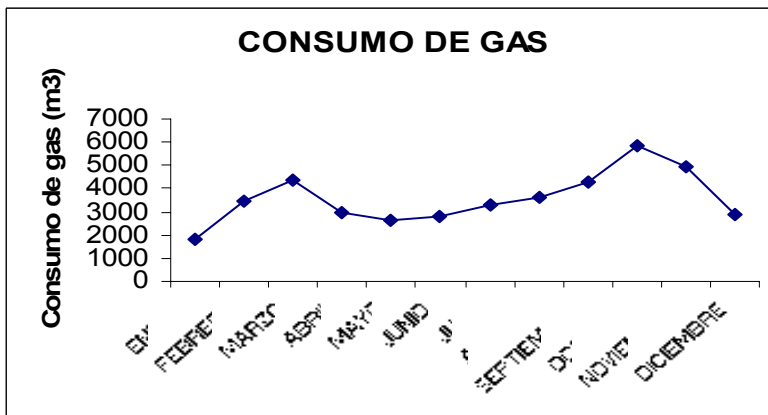
Figura 17. Consumo de gas por día



En la tabla 9 y en la figura 17 se observa que el consumo de gas no es estable; el promedio obtenido fue de 12.5 m³/h (2.5 m³/h por horno), con un máximo de 14.8 m³/h (2.96 m³/h por horno) para el día 14° de la medición y un mínimo de 10.5 m³/h (2.1 m³/h por horno) para el día 4° de medición.

El valor promedio obtenido para los días del seguimiento se comparó con el promedio histórico del 2003 en FANTAXÍAS (ver figura 18.).

Figura 18. Consumo de gas para el año 2003



El promedio de consumo mensual de gas para el 2003 fue de 3572.63 m³/mes. Para obtener el promedio en m³/h, se asumió que el mes tiene 26 días laborales y el día laboral tiene 12 horas. De acuerdo a lo anterior el promedio obtenido fue de 11.98 m³/h.

Se observa que el promedio durante los días del seguimiento (12.5 m³/h) es cercano al anual (11.9 m³/h), por lo tanto se asumió el valor de 12.5 m³/h (2.5 m³/h por horno), como flujo de combustible para el cálculo del balance de masa y energía.

2. Aire de combustión

Para el cálculo del flujo del aire se utilizó un anemómetro "EXTECH" tal como se indica en el capítulo de desarrollo experimental; sin embargo, los datos reportados no fueron tenidos en cuenta, debido a que el anemómetro no se encontraba calibrada en el momento de la medición y por lo tanto suministraba datos muy altos comparados con el caudal real que suministra un ventilador de 1 Hp de potencia.¹¹

3. Superficies del horno

Para el cálculo de las pérdidas de calor a través de las paredes se evaluó la temperatura promedio exterior siendo aproximadamente 35°C. En la Tabla 10. se presentan las temperaturas promedios de las superficies de los hornos en los días de medición, tal y como fue planteada su medición de acuerdo a la figura 11.

¹¹ Manuel Márquez M., Combustión y quemadores, MARCOMBO, S.A., Barcelona, 1989. Pág 47-48

Tabla 10. Temperaturas promedios de las superficies de los hornos

SUPERFICIES DEL HORNO	AREA m2	TEMPERATURAS (°C)		
		HC5	HC3	HC2
A	0,4845	150	160	110
B	0,4845	70	75	50
C	0,5985	84	90	75
D	0,5985	80	85	75
E	1,019	75	80	65
F	0,8198	47	50	40
G	0,1994	200	200	190
H	0,5498	300	300	300

Al momento de realizar las mediciones de temperatura, la empresa FANTAXÍAS no contaba con la “Hoja de diseño de los hornos”; por esta razón, no fue posible comparar los valores medidos con valores de referencia.

En la tabla 10, la columna sombreada corresponde a las temperaturas medidas en el horno HC2; se puede observar que de los tres hornos evaluados el HC2 presenta las temperaturas mas bajas en las superficies, lo cual indica que los hornos HC3 y HC5 presentan mayor defectos en el aislante o en la estructura.

Así mismo las letras con fuente naranja (A, G y H), corresponden a las superficies que presentaron las temperaturas mas altas ; por lo tanto las acciones correctivas se deben orientar a disminuir dichas temperaturas.

4. ANÁLISIS DE GASES DE CHIMENEA

A continuación, en la Tabla 11 se reportan los datos obtenidos en el estudio de los análisis de chimenea, realizado con el equipo *Portable Combustion Analyzer PCA*.

Tabla 11. Análisis de gases de chimenea para los hornos tipo HC.

Variable reportada por PCA*	Horno HC5	Horno HC3	Horno HC2
O2 (% molar)	12,82	12,94	9,57
CO ₂ (% molar)	4,56	4,49	6,39
CO (ppm)	870,33	209,33	82,22
Tem. Gases (°C)	512,11	536,56	525,22
NOx (ppm)	5,67	-	-
Tem. Ambiente (°C)	31,83	33,83	34,17
Ef. Combustión (%)	47,30	41,76	58,00
Exceso Aire (%)	142,89	154,11	75,22

Al analizar los resultados reportados por el *Portable Combustion Analyzer (PCA)*, se observa que el % O_2 es muy alto, lo cual indica que el exceso de aire para la combustión es muy elevado. Aún cuando en la literatura no se encontró un óptimo de aire en exceso para este tipo de horno en particular, en procesos de combustión el óptimo de operación se sitúa entre **15% - 20%** de aire. (Ver Tabla 12.).

El promedio de aire en exceso en los gases de chimenea para los hornos de fundición de FANTAXÍAS, está muy alejado del % exceso de aire óptimo (en el caso de los hornos **HC5** y **HC3** están **7** veces por encima y para el **HC2** está **4** veces por encima). Se encontró que para el HC2 el ventilador funciona con un motor de 1710 rpm, en tanto que para los hornos HC3 y HC5 los ventiladores funcionan con motores de 3500 rpm. Es por esta razón que en la medición de gases de chimenea el porcentaje de aire en exceso para el HC2 fue la mitad del porcentaje de aire en exceso de los HC5 y HC3 ya que un ventilador centrífugo el caudal de aire es proporcional a la velocidad de rotación.¹²

Un exceso de aire elevado tiene repercusiones en la eficiencia del horno, debido a que la temperatura de la llama baja por el efecto de absorción del exceso del nitrógeno y el oxígeno sin quemar.¹³

¹² Manuel Márquez M., Combustión y quemadores, MARCOMBO, S.A., Barcelona, 1989. Pág 47-48

¹³ N. Franklin, Optimización en la Combustión en calderas y hornos. ARPEL, febrero de 2000. pág 26 y 28.

Tabla 12. Valores recomendados de los parámetros obtenidos en la medición de gases²⁴

Parámetro	Valor recomendado
Oxígeno (O ₂)	2-3%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Diesel : 11,5-12,8% Residual 6 : 13-13,8% Gas Natural : 9-10%
Monóxido de Carbono (CO)	< 400 ppm (*)
Exceso de aire (EA)	Diesel : 15-20% Residual 6 : 20-25% Gas Natural : 15-20% Carbón : 25-30%
Temperatura de gases	£ Temperatura del vapor + 65°C
Eficiencia de combustión	» 88%
(*) Límite práctico	

En cuanto al contenido de CO, se observa que en los hornos HC2 y HC3 las emisiones de este compuesto están por debajo del límite, en tanto que para el HC5 los valores de CO exceden el límite permitido. En la Tabla 12 se observa que el límite permitido de CO debe ser < 400 ppm.

De otro lado los valores de temperatura de los gases de chimenea son altos. Esto da muestra del calor potencial, que podría ser aprovechado de diversas maneras.

3.2. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA EN LOS HORNOS

Con base en la información obtenida de las variables de operación de los hornos, se plantearon los balances de masa y energía utilizando un programa de computador MS EXCEL, el cual calcula el poder calorífico inferior del gas natural a partir de su composición, el exceso de aire a partir del análisis de

²⁴ CIBO Council of Industrial burners Owners: CIBO Energy Efficiency Handbook. CIBO, 1997, Washintong.

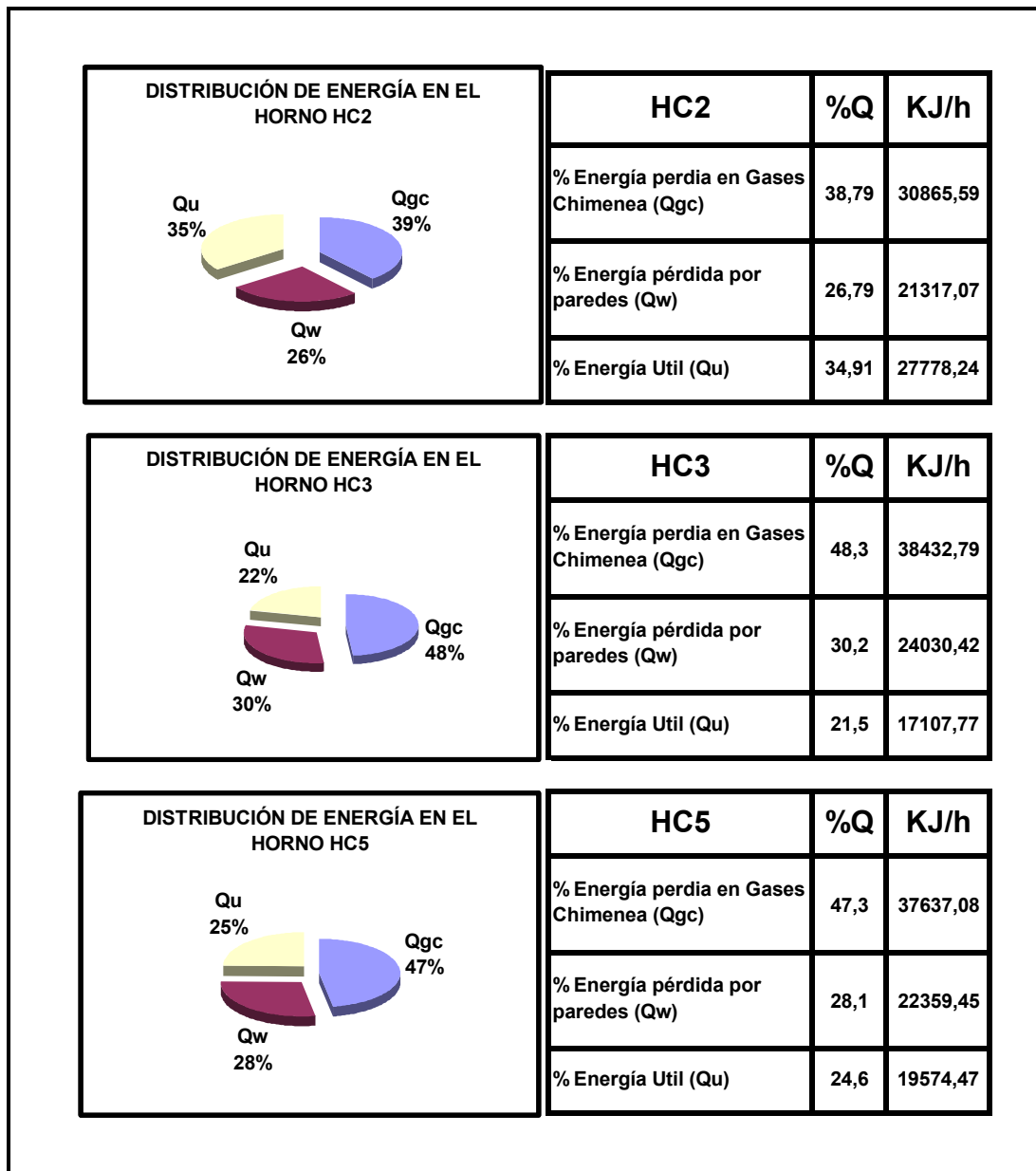
gases de chimenea en base seca, el calor liberado por el combustible, el calor perdido por las paredes y el calor absorbido por los gases de chimenea. En el Anexo A se encuentra mas información acerca del macro mencionado.

El programa al suministrarle las composiciones del gas natural, flujo de combustible consumido por horno y las temperaturas promedio de las superficies del horno, calcula la eficiencia del horno a partir del “Método de pérdidas”¹⁴.

Con base en el 100% de combustible que se utiliza en los hornos, la figura 18 expresa la Distribución energética actual de los hornos de crisol de FANTAXÍAS.

¹⁴ Referirse al Marco Teórico. Desempeño de los Hornos Industriales.

Figura 18. Distribución energética en los hornos HC de la Empresa FANTAXÍAS



En la figura 18. se observa que de los tres hornos evaluados, el horno HC2 es el mas eficiente porque presenta menores pérdidas de energía tanto por paredes como por gases de chimenea.

Las líneas de acción deben estar orientadas a disminuir la energía que actualmente se pierde en gases de chimenea, junto con la que se pierde a través de las superficies del horno.

En la Tabla 13. se presenta un resumen de los principales focos de pérdida de energía en los hornos HC junto con su respectiva descripción.

Tabla 13. Formato de inspección del estado de los hornos HC.

Foco de pérdida	Energía perdida KJ/h	Descripción	Recomendación
1. Transferencia de energía por las paredes	22.439,5*	Los hornos de crisol de FANTAXÍAS presentan daños en su estructura física y solo cuentan con una capa delgada de material aislante.	Aumento en el espesor del aislante.
2. Transferencia de energía por la superficie de zamak fundido	5.537,68	Las superficies de zamak fundido son eficientes para irradiar energía, debido a las altas temperaturas que presentan (300° C aproximadamente)	Cobertura de la superficie inactiva del crisol.
3. Exceso de aire	35.641,25*	Un exceso de aire elevado disminuye la eficiencia del horno, debido a que la temperatura de la llama baja por el efecto de absorción del exceso del nitrógeno y el oxígeno sin quemar.	Ajustar la relación aire-combustible al interior de la cámara de combustión.

*Los valores reportados corresponden a la energía promedio perdida por paredes y en gases de chimenea para los hornos HC.

Luego de evaluar la eficiencia térmica de los hornos de crisol de FANTAXÍAS, e identificar los focos de pérdidas energía en los hornos HC, se citan a continuación

las posibles mejoras que pueden introducirse, con lo cual se espera disminuir el valor de la energía no asociada a la producción.

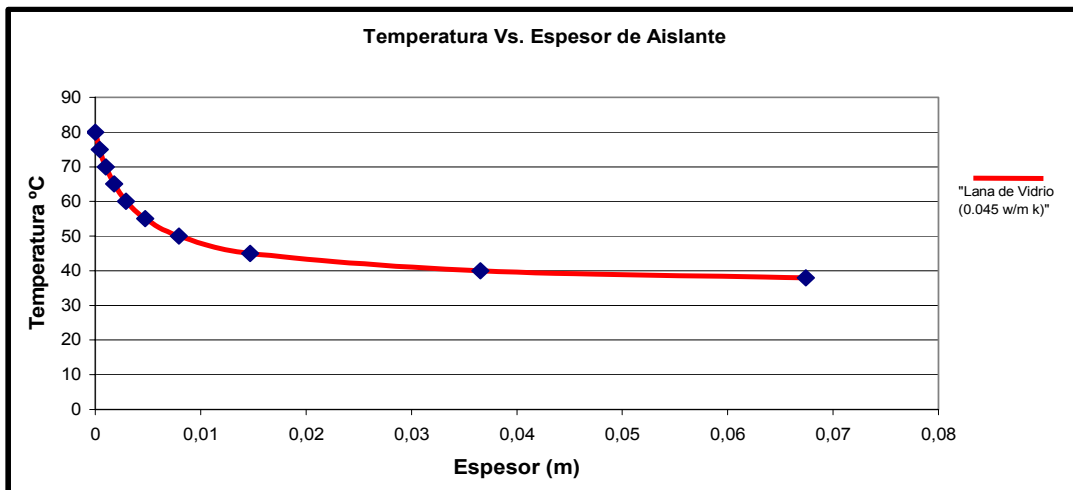
1. Rediseño del aislante térmico en los hornos

En la construcción de las paredes de los hornos se hace uso de materiales refractarios, cuya función es resistir las altas temperaturas. Para evitar el flujo de calor al medio, las paredes se recubren con material aislante. Para disminuir las pérdidas por paredes se debe mejorar el aislamiento del horno, ya sea aumentando su espesor, o incluso cambiarlo por otro material con mejores propiedades aislantes.

Los hornos HC de FANTAXÍAS, utilizan lana de vidrio como material aislante con laminas de un espesor de 2 cm; que se ubica entre las dos placas de acero que conforman la carcasa del horno.¹⁵

Mediante el modelo 6 “Ley de Fourier”¹⁶. (ver) se realizó una predicción del valor de temperatura con relación al espesor de la capa de aislante en el horno, tal y como se observa en la figura 19.

Figura 19. Temperatura teórica de las paredes del horno vs. espesor de aislante para lana de vidrio



¹⁵ Ver Descripción de los hornos. Figura 9. Interior del horno crisol HC3. pág. 30

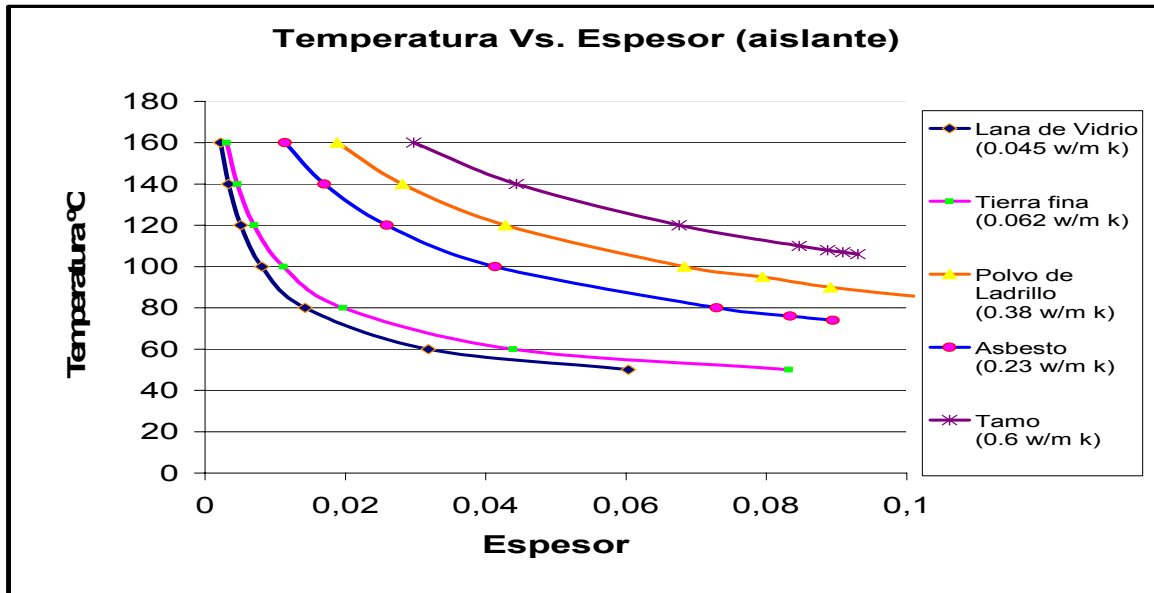
¹⁶ Ver Marco teórico, Mecanismos de transferencia de calor en un horno crisol. pág. 20

En la figura 21 se observa que al aumentar el espesor de aislante, disminuye el valor de temperatura en las paredes del horno; sin embargo a partir del espesor de aislante de **4 cm**, la temperatura se estabiliza, es decir que cualquier aumento en el espesor por encima de **4cm**, no representa disminuciones significativas de las temperaturas de las paredes del horno. Por ejemplo una superficie que actualmente se encuentra a **80° C**, puede reducir su temperatura hasta **45° C**, lo cual significaría un ahorro en energía de **1860 KJ/(h*m²)**, al aumentar el espesor del aislante en **1.5 cm**.

Las superficies de los hornos HC que presentaron mayor temperatura fueron la Tapa superior del horno y chimenea (150 – 200 °C). Esto se debe a que dichas superficies solo poseen una capa delgada (3 cm) de tamo (mezcla de cascarilla de arroz, arcilla y caolín), que actúa como aislante. Es necesario disminuir estos valores de temperatura, para lo cual se sugiere cambiar el material actual, por otro que presente mejores propiedades aislantes.

En la figura 20 se presenta la relación existente entre la temperatura teórica de la tapa del horno y el espesor de aislante, para diversos materiales; para su construcción se siguió el mismo procedimiento empleado para la obtención de la figura 19.

Figura 20. Temperatura teórica de la tapa del horno vs. Espesor de aislante para diversos materiales¹⁷



Sustituir el aislante actual tamo, por otro material con mejores propiedades aislantes, como lo es la lana de vidrio, reduce las temperaturas de la superficie en un rango de 70° C, para un espesor de 4 cm. Este cambio representaría un ahorro de **8435 KJ/(h*m²)** para el caso de la tapa superior y de **10018 KJ/(h*m²)** para el caso de la chimenea.

En la Tabla 14 se presenta el resumen del ahorro de energía que puede obtenerse, aumentando el espesor de aislante para el caso de los hornos de FANTAXÍAS.

¹⁷ B.V. Karlekar, "Transferencia de calor", segunda edición, McGraw Hill, 1994, Tabla 1-1 "valores

Tabla 14. Resultados obtenidos debido al aumento del espesor del aislante.

Horno	Superficie del horno	Espesor de lana de vidrio (cm)	Temperatura actual (°C)	Temperatura esperada (°C)	Calor que puede ahorrarse	
					KJ/h	%
HC2	Tapa superior	3	110	60	723.553	74.13
	Chimenea	2	190	80	1362.678	80.934
	Otras paredes	1	75	45	335.8910	79.6
HC3	Tapa superior	4	160	60	1229.693	70.88
	Chimenea	2.8	200	80	1530.307	82.6
	Otras paredes	1.5	85	45	468.412	84.47
HC5	Tapa superior	3,5	150	60	1503.794	77.09
	Chimenea	2.5	200	80	1530.307	82.6
	Otras paredes	1.5	80	45	400.901	82.321

2. Cobertura de la superficie inactiva del crisol.

Actualmente los hornos crisol de FANTAXÍAS no cuentan con tapas que cubran la superficie del crisol (0.2 m^2), quedando expuesto el zamak fundido al ambiente.

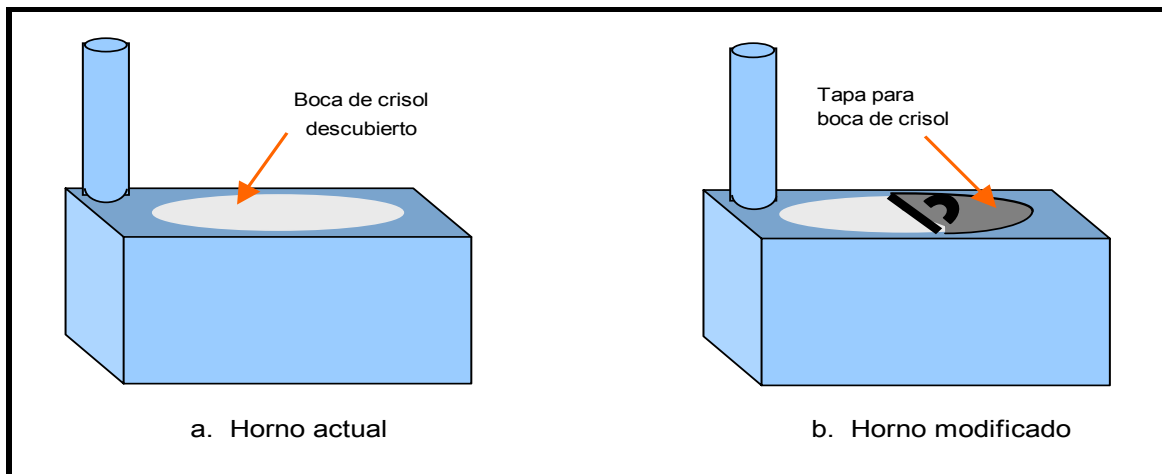
Las superficies de zamak fundido son eficientes para irradiar energía. Por ejemplo, una superficie de zamak fundido a una temperatura de **470°C** en la aleación irradia **72000 KJ/ h. m²**, por lo tanto se confirma la necesidad de cubrir toda superficie

inactiva del crisol con cubiertas o capas refractarias para minimizar las pérdidas de calor.

Se sugiere cubrir la mitad de la superficie del crisol con capas refractarias para convertirla en un área mas de calentamiento. Para la otra mitad, se puede construir una “cubierta removible”, (Ver figura 21) que cubra la superficie expuesta del crisol, cuando no se requiera el acceso al mismo, para minimizar las pérdidas por radiación.

Estas modificaciones no afectan las operaciones normales del horno, tales como: la carga del horno, la limpieza del crisol y el cuchareo de zamak.

Figura 21. Cubierta aislada sobre superficie del crisol.



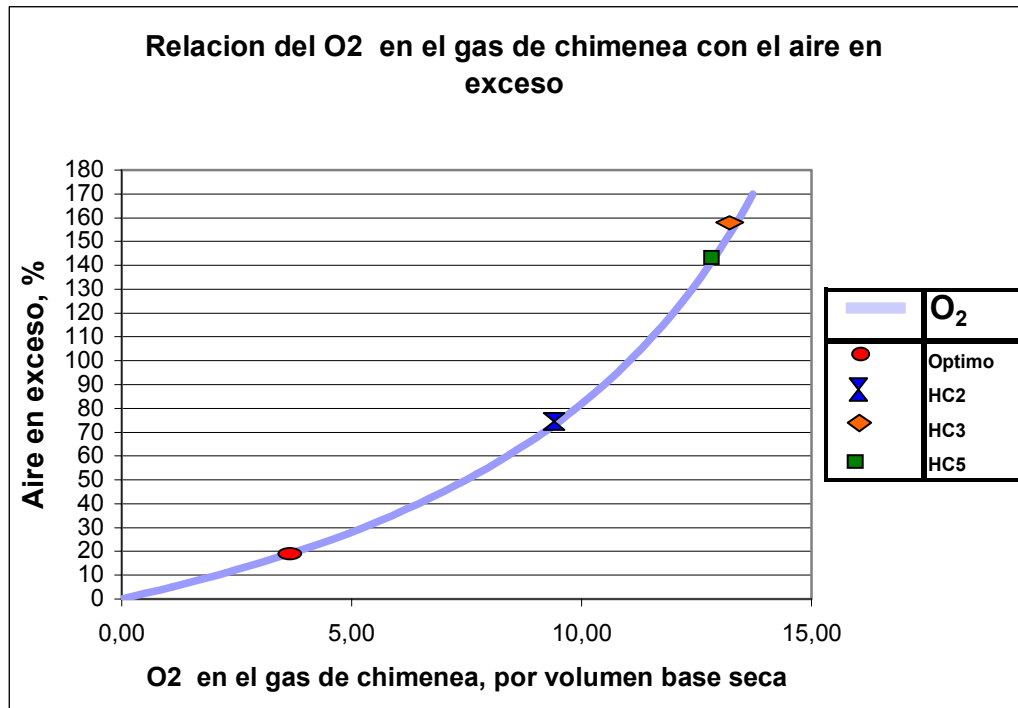
El ahorro que se obtiene al cubrir la mitad del crisol con material aislante (una pulgada de fibra de vidrio en medio de dos láminas de acero) es de **4519 KJ/h**, con lo cual se reducen las pérdidas actuales en un **44%**.

3. Ajuste de la relación aire-combustible.

Una parte de energía que se pierde en los hornos de crisol, se produce por no emplear una adecuada relación de aire-combustible para quemar el combustible y a la alta temperatura a la cual los gases abandonan el horno.

Con la ayuda del programa de computador, se calcularon los balances de masas para diferentes valores de exceso de aire; esta información permitió la predicción del % O₂ teórico en gases de chimenea con relación al exceso de aire empleado en la combustión, relación que se presenta en la figura 22.

Figura 22. Relación del O₂ en el gas de chimenea con el aire en exceso



El aire necesario para la combustión se suministra por medio de un ventilador centrífugo, el cual garantiza un flujo de aire constante. Sin embargo, en la gráfica se observa que los hornos funcionan con un elevado exceso de aire, con respecto al valor recomendado el cual es del 20%. Para quemar 2.5 m³/h de combustible

con un 20% de aire en exceso, el caudal de aire estimado es de 475 L/min medido a condiciones estándar.

Se recomienda ajustar el caudal de los ventiladores actuales en 475 L/min, variando las revoluciones del ventilador, ya que el caudal entregado por un ventilador centrífugo es proporcional a la velocidad de rotación del mismo.

En la tabla 15. se presenta el resumen del ahorro de energía que puede obtenerse para cada uno de los hornos, ajustando el exceso de aire a diferentes valores.

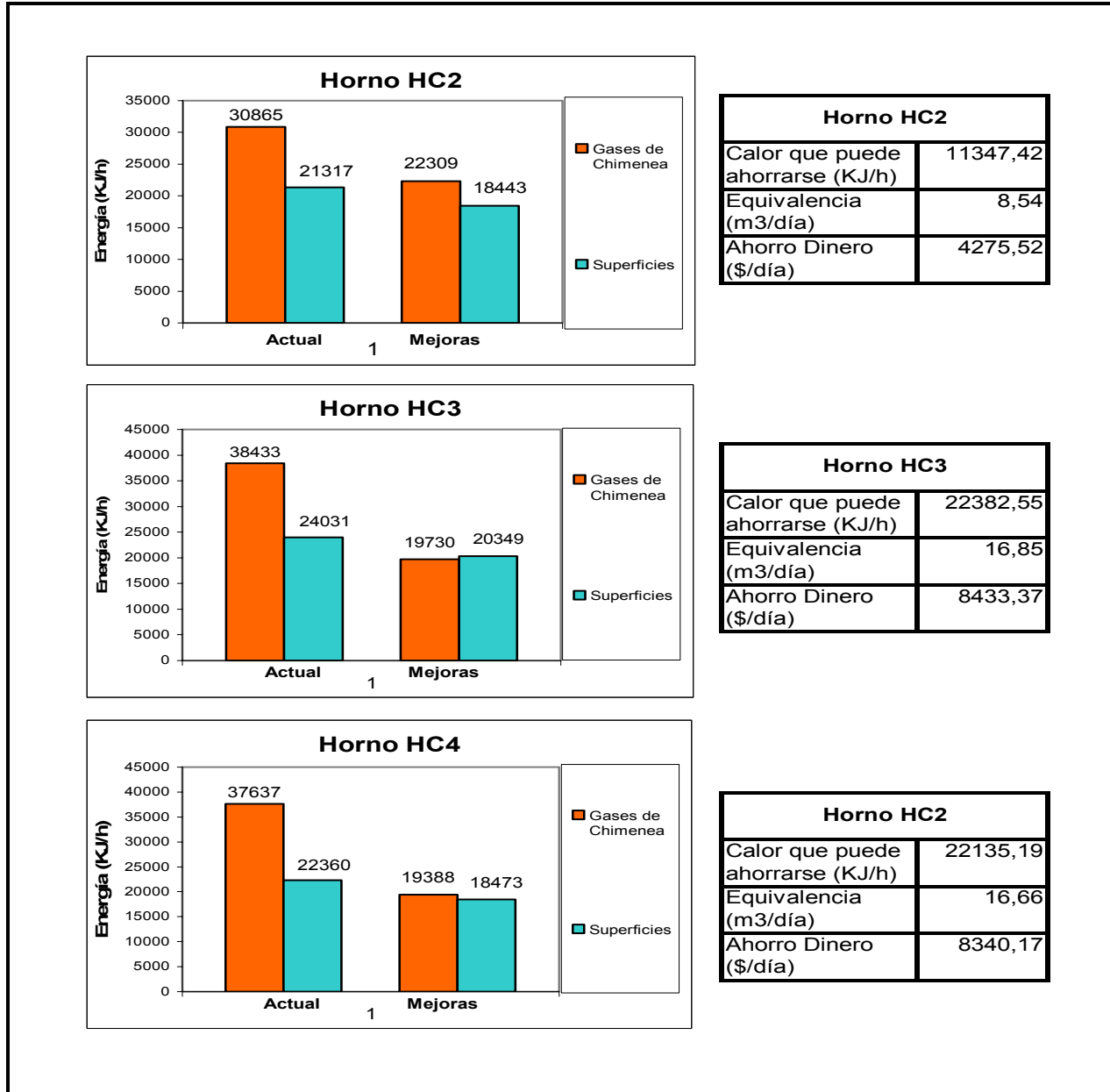
Tabla 15. Resultados obtenidos para diferentes ajustes del exceso de aire en los Hornos Hc.

Horno	% Exceso de aire actual	% Exceso de aire recomendado	Q (puede ahorrarse)	
			KJ/h	%
HC2	78,44	40	5586	19.62
		30	7061.84	24.8
		20	8473.4	29.77
HC3	149.7	40	15815	40.8
		30	17290.8	44.7
		20	18702.3	48.34
HC5	145.93	40	15360.8	40.1
		30	16836.64	44
		20	18248.2	47.72

Para finalizar en la tabla 16. se presenta un cuadro comparativo entre la situación actual de los hornos de crisol y la situación que se presentaría como resultado de la introducción de las mejoras propuestas anteriormente. Teniendo en cuenta que

el poder calorífico inferior del gas es de **31829 KJ/m³** y que el precio del metro cúbico de gas es de **510 \$/m³**, se calculó el ahorro en dinero que obtendría la empresa FANTAXÍAS por concepto de mejoramiento de los hornos HC de la sección de fundición.

Tabla 16. Disminución de las pérdidas de energía en los hornos debido a la introducción de mejoras.



El promedio de consumo de gas mensual para el último trimestre del año 2004, fue de 5600 m³, equivalentes a \$2'865.000¹⁸. Si se llevan a cabo las mejoras propuestas en los hornos, se puede conseguir un ahorro diario de 42 m³, que durante un mes representarían 1260 m³; esto corresponde al **22.5%** del consumo promedio mensual de gas y a un ahorro en dinero de **\$636.300** mensuales.

¹⁸ Información registrada en los recibos de gas de la empresa FANTAXÍAS, para los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre de 2004.

CONCLUSIONES

A continuación se listan las principales conclusiones que deja el estudio sobre el funcionamiento de los hornos y reducción de pérdidas energéticas.

- En la etapa de cálculo de la eficiencia energética de los hornos HC, se encontró que de la energía total aportada por el combustible, el 28% se pierde a través de las superficies de los hornos, es decir 67980 KJ/h. Mediante el rediseño del sistema de aislamiento, estas pérdidas pueden reducirse en un 13% equivalentes a 8837 KJ/h, que se traducen en un ahorro económico de \$102000 mensuales.
- La principal pérdida de energía en los hornos se presenta en los gases de chimenea, la cual corresponde a 106935 KJ/h,, debido a la desmedida relación combustible-aire con la que actualmente operan los hornos. Ajustando el valor de exceso de aire en 20% se reducirían las pérdidas actuales en gases de chimenea en un 43%, equivalentes a 45982 KJ/h, que se traducen un ahorro económico de \$512800 mensuales.
- Los ciclos de operación de los hornos deben ser lo mas largos posibles, de esta manera es posible disminuir el porcentaje de pérdidas relacionado con la energía almacenada en las paredes del horno durante el ciclo de operación.
- Como alternativa para la recuperación de energía en gases de combustión se diseñó un circuito térmico, con el fin de aprovechar esta energía como fuente de calentamiento de los baños de galvanizado. En el anexo B se presenta el diseño detallado de un circuito térmico en la empresa FANTAXÍAS,.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de un programa de seguimiento de variables tales como consumo de combustible, producción mensual, temperatura de la sección de fundición, entre otros, que permitan la evaluación del funcionamiento de los hornos, y que sirvan como punto de partida para la puesta en marcha de acciones encaminadas al buen uso de la energía.
- Es necesario implementar un programa de mantenimiento preventivo de los hornos que incluya evaluaciones periódicas del comportamiento de los quemadores, estado del material aislante, análisis de gases de chimenea, revisión del sistema de control de temperatura del zamak, entre otros
- Todas las acciones encaminadas al mejoramiento del uso de la energía, repercutirán positivamente en el ambiente laboral de la planta, ya que al disminuir el consumo de combustible, se disminuyen considerablemente las pérdidas energéticas, logrando así un entorno mas saludable para el personal que labora en la sección de fundición.

BIBLIOGRAFIA

1. CAPELLO, Eduardo, Tecnología de la fundición, Editorial Gustavo Gili S.A.
2. CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Mc Graw Hill. México, 1992.
3. Editores. Como se usa la combustión. Petróleo Internacional, marzo de 1978. Pág. 37-38.
4. FOSTER Wheeler Iberia, División de Hornos y Energía. Memorias de Curso de Combustión. Gerencia Complejo Barrancabermeja. ECOPETROL. Octubre, 1997.
5. HOWARD, Ed. Aguilar, Tratado práctico de Fundición. Pág.139-142.
6. KARLEKAR B.V., "Transferencia de calor", segunda edición, McGraw Hill, 1994, Pag.22
7. Manual de ACEITES PARA TRANSFERENCIA DE CALOR, Departamento Técnico. División Lubricantes. TERPEL.1998.
8. MÁRQUEZ Manuel M., Combustión y quemadores, MARCOMBO, S.A., Barcelona,1989. Pág 11-17 y 133.
9. MILLS, F, Transferencia de calor. Mc. Graw Hill. USA, 1994, p. 853-865.

10. North American Mfg. Co. North American Combustión Handbook, USA, 1983.
11. PERRY J. Chemical Engineer's Handbook 4ª Edición, McGraw Hill Book Company, 1963. P.9-40
12. REED, D.R., Furnace Operations, 3rd ed. Gulf Publishing Co., Houston, 1981.
13. SMITH, M., Fuels and combustion. 1st edition. McGraw Hill Book Company, INC, Columbus, Oh., 1952.
14. TRINKS, W., Y MAWHINNEY, M.H., *Hornos industriales*, URMO, Madrid, 1976.

Páginas web consultadas:

15. [Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention, 2nd Edition](#) ,by Jack A. Collins
16. [The diecasting of Zamak](#), Luigi Andreoni ,
17. <http://www.gurelan.es/zamak.html>
18. www.gredsa.com/quemadores
19. <http://www.sofofa.cl/ambiente/documentos/Rubros%20Fundiciones.pdf>.
20. http://www.funmak.com/esp/zamak_esp.htm
21. <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller2BAE/hornosind.PDF>

22. <http://www.servomex.com>

23. <http://www.heatflox.com>

24. <http://www.Vulcanium.com/coils/finish.asp.com>

ANEXO A.

DESCRIPCIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS HORNOS TIPO CRISOL DE LA EMPRESA FANTAXÍAS LTDA.

Para el cálculo de la energía de los productos de combustión y de otra variables de los hornos de fundición se programó un Macro en MSEXCEL., el cual consta de cuatro hojas de calculo : Balance de Energía, Balance de Masa, Constantes para el calculo de las capacidades caloríficas y Pérdidas energéticas por paredes.

A continuación se describen cada una de las hojas de cálculo utilizadas en el programa:

HOJA PARA EL BALANCE DE ENERGÍA

Esta es la hoja principal del programa, debido a que en esta hoja aparecen reportados los resultados de la evaluación energética de los hornos HC, al hacer clic en el **Botón Calcular** .

Todas las casillas de esta hoja de cálculo que aparecen con fuente **azul** deberán entenderse como casillas para datos de alimentación del sistema, mientras que las casillas **rojas** son valores entregados por la hoja de cálculo.

En la interfase existen 3 bloques de entrada de datos. En el primero de ellos está condensada la información a cerca de la composición del gas natural; los datos de composición se deben ingresar en % volumen, en tanto que el peso molecular se ingresa en g/mol.

El segundo bloque permite ingresar al sistema todas las condiciones de operación necesarios para los cálculos de estequiometría y balances de energía. Se muestran las unidades en las cuales deben ingresarse los datos para evitar errores en los cálculos.

El tercer bloque de datos de alimentación es el de composición de gases de combustión el % de O₂ y % CO₂ reportados por el BACHARACH; estos datos son de suma importancia, ya que permiten calcular el exceso de aire en la combustión.

A partir de toda la información anterior, se efectúa un ejercicio estequiométrico, en el cual se toma en cuenta las reacciones de combustión de cada componente, con el fin de establecer un balance de masa para cada compuesto.

Luego de determinar la cantidad de cada producto de combustión en proporciones en peso y mol, se realiza un balance de energía para todos los sistemas obteniendo el poder calorífico del combustible usado y el calor producido por este; los calores de combustión para los hidrocarburos mas comunes aparecen reportados en el "Smith, J.M y Van Ness, H"

Los Cp para cada compuesto están expresados en función de la temperatura por medio de la siguiente correlación: $C_p = R(A + BT + CT^2 + DT^2)$, donde A, B, C y D son constantes y depende del compuesto, R es la constante de los gases y T la temperatura. En el programa se encuentran introducidas todas las constantes necesarias para los cálculos.

El 4 bloque es el de respuestas; en él se presenta el resultado del balance energético en los hornos, es decir la energía perdida por los gases de chimenea y por las paredes, junto con el Calor Útil, el cual se evalúa por el método de pérdidas.

En la figura 23 se presenta la Hoja de cálculo para el balance energético, en la cual se visualiza cada uno de los bloques que conforman la interfaz del macro.

Figura 23 Interfaz del Macro para el cálculo de eficiencia energética de los hornos HC

Funcionamiento de los hornos tipo crisol de la empresa FANTAXIAS LTDA

Composición del combustible			Condiciones generales		
Compuesto	Peso molecular (g/mol)	% volumen	Condición	Unidades	
Metano	16,041	89,742	Flujo de combustible	m ³ /h	2,5
Etano	30,067	8,024	Temperatura de combustible	°C	25
CO ₂	44	1,712	Temperatura del aire ambiente	°C	33,5
Propano	44,092	0,264	Presión de combustible	atm	1
Nitrógeno	28,016	0,182	Presión de aire ambiente	atm	1
nHexano	86,169	0,032	Humedad relativa	%	60
nHeptano	100,07	0,032	Temperatura de gases de combustión	°C	512
Isobutano	58,118	0,003	Composición de gases de combustión %Vol	Base seca	Base húmeda
Butano	58,118	0,005			
Neopentano	72,144	0,002	Oxígeno	9,57	
Isopentano	72,144	0,002	Dióxido de Carbono	4,56	
Total		100	Vapor de agua		
			Nitrógeno		

Resultados Calculados	Unidades	Valores
Densidad promedio del gas de combustión	Kg/m ³	0,67
Peso molecular promedio del gas de combustión	Kg/Kmol	17,80
Exceso de aire	%	145,93
Y' (Humedad de aire)	Kg agua/Kg aire seco	0,02
Poder Calorífico inferior	KJ/Kg	47.370,96
Calor estandar de la reacción	KJ/h	-79.571,14
Calor de los reactivos	KJ/h	-595,98
Calor consumido gases de chimenea	KJ/h	38.235,85
% de calor perdido en gas de chimenea	%	48,05
Calor perdido por las paredes	KJ/h	17.907,53
% de calor perdido por las paredes	%	22,51
Calor util	KJ/h	-23427,76
EFICIENCIA DEL HORNO	%	29,44

Calcular

HOJA PARA EL BALANCE DE MASA

En esta se hoja realiza el balance de masa, para cada uno de los componentes del gas natural, mediante el modelo 10 *; la figura 24 presenta la hoja de balances con resultados

Figura 24. Hoja para el cálculo del balance de masa

BALANCE DE MASA POR COMPONENTES PARA PROCESO DE COMBUSTIÓN					
	Mol combustible/h	Componente	Entra	Genera	Sale
	94.412				
Combustible		Metano	84,707	-84,707	0,000
		Etano	7,574	-7,574	0,000
		CO2	1,616	0,000	1,616
		Propano	0,249	-0,249	0,000
		Nitrógeno	0,172	0,000	0,172
		nHexano	0,030	-0,030	0,000
		nHeptano	0,030	-0,030	0,000
		Isobutano	0,003	-0,003	0,000
		Butano	0,005	-0,005	0,000
		Neopentano	0,002	-0,002	0,000
	Isopentano	0,002	-0,002	0,000	
Aire		Oxígeno	486,621	-197,867	288,754
		Nitrógeno	1830,792	0,000	1830,792
		Agua	73,196	0,000	73,196
Productos de Combustión		Agua	0,000	193,646	193,646
		CO ₂ (generado)	0,000	101,044	101,044

* Ver Desarrollo Experimental, Balance de masa en el horno tipo crisol. pág. 40

HOJA CON LAS CONSTANTES PARA EL CALCULO DE Cp

El calor de los gases de chimenea (Qgc), se calcula mediante el modelo que aparece en la Tabla7. “Nomenclatura usada en el balance de energía”¹⁹ En esta hoja aparecen los valores de las constantes para los cálculos de Cp.

Figura 25. Hoja que contiene las constantes para el cálculo de los Cp

The image shows a screenshot of Microsoft Excel and Microsoft Visual Basic. The Excel window displays a table of constants for the calculation of Cp. The table is titled "CONSTANTES PARA EL CALCULO DE CP" and lists various compounds with their corresponding constants a, b, c, and d. A yellow callout box highlights the formula $C_p = R \cdot (A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^{-2})$. The Visual Basic window shows a code snippet for calculating the heat of the chimney gases (Qgc).

COMPUESTO	a	b	c	d
Metano	1,70200	0,009081	-0,000002164	0,0000
Etano	1,13000	0,019225	-0,000005561	0,0000
CO2	5,45700	0,001045	0,000000000	-115700,0000
Propano	1,21300	0,028785	-0,000008824	0,0000
Nitrógeno	3,28000			
nHexano	3,02500			
nHeptano	3,57000			
Isobutano	1,67700			
Butano	1,93500	0,036915	-0,000011402	0,0000
Neopentano	2,46400	0,045351	-0,000014111	0,0000
Isopentano	2,46400	0,045351	-0,000014111	0,0000
Oxígeno	3,63900	0,000506	0,000000000	-22700,0000
Agua	3,47000	0,001450	0,000000000	12100,0000
Nitrógeno	3,28000	0,000593	0,000000000	4000,0000
CO2	5,45700	0,001045	0,000000000	-115700,0000

```

Qre = Qre + Cre
Next
Worksheets(2).Cells(30, 5) = -Qre

'calor productos (gases de chimenea
Tgch = Worksheets(2).Range("g15") +
For i = 3 To 17
    Cpr = Worksheets(3).Cells(i + 6
    Qpr = Qpr + Cpr
Next
Worksheets(2).Cells(31, 5) = Qpr

'% de calor empleado para calentar
Worksheets(2).Cells(32, 5) = -100

'calor perdido a través de las par
Worksheets(2).Cells(33, 5) = Works

'% de calor empleado para calentar
    
```

¹⁹ Ver Desarrollo Experimental, Balance de energía en el horno tipo crisol. Tabla 7. “Nomenclatura usada en el balance de energía “ pág. 44

HOJA PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LAS SUPERFICIES DEL HORNO

En esta hoja se calculan los flujos de calor que cede el horno a través de las superficies; para efectuar los cálculos, se deben diligenciar las columnas **G** y **H**, correspondientes a las Temperaturas de superficie (T_w) y a la Temperatura ambiente de la sección de fundición (T_a), respectivamente.

Figura 26. Hoja que contiene las temperaturas superficiales del horno, para realizar el cálculo de Pérdidas energéticas a través de las paredes

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'Composicion gase chimenea2'. The active sheet is 'Perdidas por Paredes'. The spreadsheet contains a table with the following data:

PERDIDAS DE CALOR A TRAVES DE LAS SUPERFICIES DE LOS HORNOS									
	SUPERFICIE DEL HORNO		Area m ²	K	T _w (K)	T _a (K)	h _c (w/m ² °K)	h _r (w/m ² °K)	Q (w)
A	Tapa superior	Horizontal	0,8198	2,5	373,000	308	7,099	8,132	811,567
B	Opuesta trabajador	Vertical	0,4845	1,78	323,000	308	3,503	6,414	72,072
C	Quemador	Vertical	0,4845	1,78	348,000	308	4,476	7,230	226,865
D	Tapa inferior	Horizontal	1,019	1,32	348,000	308	3,320	7,230	421,972
E	Trabajador	Vertical	0,5985	1,78	338,000	308	4,166	6,893	=(I11+J11)*E11
F	Opuesta quemador	Vertical	0,4845	1,78	313,000	308	2,662	6,111	21,251
G	Chimenea	Tubo	0,5498	2,15	463,000	308	7,591	12,167	1683,690
H	Crisol	Horizontal	0,1994	2,5	573,000	308	10,087	19,026	1538,330
							Calor Total (W)		4974,315
							Calor Total (KJ/h)		17907,533

Anexo B.

CIRCUITO TÉRMICO: ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACIÓN DE LOS CALORES RESIDUALES DE LA COMBUSTIÓN

A nivel mundial se están produciendo cambios sustanciales en el Uso Racional de la Energía; estos cambios significan la modificación de procesos y desarrollo de nuevos sistemas que reduzcan el consumo de energía en los procesos de producción de la planta. FANTAXÍAS LTDA no es ajena a esta situación y es por esto que se presenta la alternativa del circuito térmico, que tiene como objetivo aprovechar el calor residual de los hornos de crisol para suministrar la energía requerida en los baños de galvanizado. Actualmente los baños de galvanizado requieren para su calentamiento el uso de resistencias eléctricas, las cuales se encienden durante seis horas, período en el cual los tanques elevan su temperatura desde 25 °C hasta la temperatura de operación (60°C).

A continuación se presenta el diseño de un circuito térmico; el cual involucra tres tanques de la sección de galvanizado como usuarios y tres hornos de crisol modificado (HC) como unidades de calentamiento.

DISEÑO DEL CIRCUITO TÉRMICO

Muchos procesos industriales requieren de calor para su operación. Si bien el calor directo es usualmente satisfactorio, con frecuencia es preferible el uso de calor indirecto. El calor se produce en una unidad de operación (por ejemplo un horno ó caldera) y es conducido por un medio transmisor a la unidad de operación usuaria ubicada en otra sección de la planta. Este método generalmente proporciona un mejor control de temperatura, mejor distribución del calor y mayor seguridad. Un

sistema de circulación de aceite caliente es una manera común de transmitir calor en sistemas indirectos.

Desafortunadamente, el diseño de una instalación oleotérmica no es tan sencilla debido a la variedad de sistemas de transferencia térmica existentes, siendo de suma importancia no especificar un equipo más grande de lo requerido y por ningún motivo, uno inferior a los requerimientos.

En el diseño del circuito térmico se tienen en cuenta las siguientes etapas:

1. Conocer la energía disponible y requerida.
2. Escogencia del aceite térmico.
3. Materiales recomendados para el circuito térmico. Diseño del serpentín de la unidad de calentamiento y del serpentín del baño de galvanizado.
4. Selección del sistema de bombeo.
5. Diseño del tanque de expansión.
6. Selección de instrumentos de medición y control.

A continuación se describe cada una de las etapa involucradas en el diseño del circuito térmico.

1. Requerimientos energéticos para el proceso.

1.1 Requerimiento energético para el proceso de galvanizado

El circuito térmico propuesto debe suministrar la energía necesaria para calentar tres baños de níquel con capacidad de **800 litros** cada uno, desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación (60 °C).

Si se asume la capacidad calorífica del baño igual a la del agua¹⁹, (4.184 KJ/KG*°C) entonces el calor requerido en los baños es de **352956 KJ**; como hay que contar con una pérdida de radiación del 10% el gasto total de calor es de **388251 KJ**.

1.2 Calor disponible de los gases de combustión del horno HC2

La energía requerida será suministrada por los calores residuales en gases de combustión de los horno HC .

Del balance de energía realizado a estos hornos, se estimó que el calor disponible en gases de chimenea es de **66927 KJ/h**, debido a la altas temperaturas a las cuales los gases abandonan los hornos (530 °C). Sin embargo, esta energía no puede ser aprovechada en su totalidad, debido al bajo coeficiente de transferencia global U, que se presenta entre productos de combustión y el aceite que circula por el serpentín, el cual está entre 45 – 60 W/m² ²⁰ y a las pérdidas que se presentan durante el recorrido del aceite a través del circuito . Por lo tanto el calor que se puede recuperar está por el orden del 50% al 60% del calor disponible en los gases de chimenea, es decir entre **33450-40155 KJ/h**.

2. Selección del aceite térmico.

En la selección del aceite térmico se debe tener en cuenta las características, que debe cumplir el fluido de transferencia:

¹⁹ Manual galvanoplastia, Curtis W.Clump., Barcelona, 1981. Pág. 356

²⁰ Manuel Márquez M., Combustión y quemadores, MARCOMBO, S.A., Barcelona,1989. Pág 135

- Buena estabilidad térmica para resistir la descomposición a elevadas temperaturas.
- Baja volatilidad, lo que asegura que la formación de gas durante la operación es mínima.
- Buena estabilidad a la oxidación para minimizar la degradación en el servicio.
- Baja viscosidad para facilitar el arranque y tener una mayor eficiencia de bombeo.

El aceite térmico que cumple con las características anteriormente expuestas es el **ISO 22**; a continuación se presentan las cifras típicas del ISO 22 TERPEL.

Tabla 17. Propiedades del aceite térmico ISO 22 TERPEL²¹

Característica	Valor
Densidad a 15 °C (Kg/L)	0.868
Viscosidad a 20 °C cSt	63
Viscosidad a 40 °C cSt	25
Viscosidad a 100 °C cSt	1.22
Capacidad calorífica BTU/lb°F	1.63
Presión de vapor a 250 °C (mm Hg)	25

3. Materiales recomendados para el circuito térmico. Diseño de los serpentines de la unidad de calentamiento y los serpentines del baño de galvanizado.

Los materiales empleados en una instalación oleotérmica deben ser primordialmente de acero, hierro u otros metales blancos. Metales con aleaciones de cobre pueden ser promotores de oxidación del aceite, ser corroídos por la misma oxidación del aceite en el caso que no se tenga una buena disposición del diseño del circuito. De igual manera, se recomienda no usar tubería galvanizada.

²¹ Manual de ACEITES PARA TRANSFERENCIA DE CALOR, Departamento Técnico. División Lubricantes. TERPEL.1998.

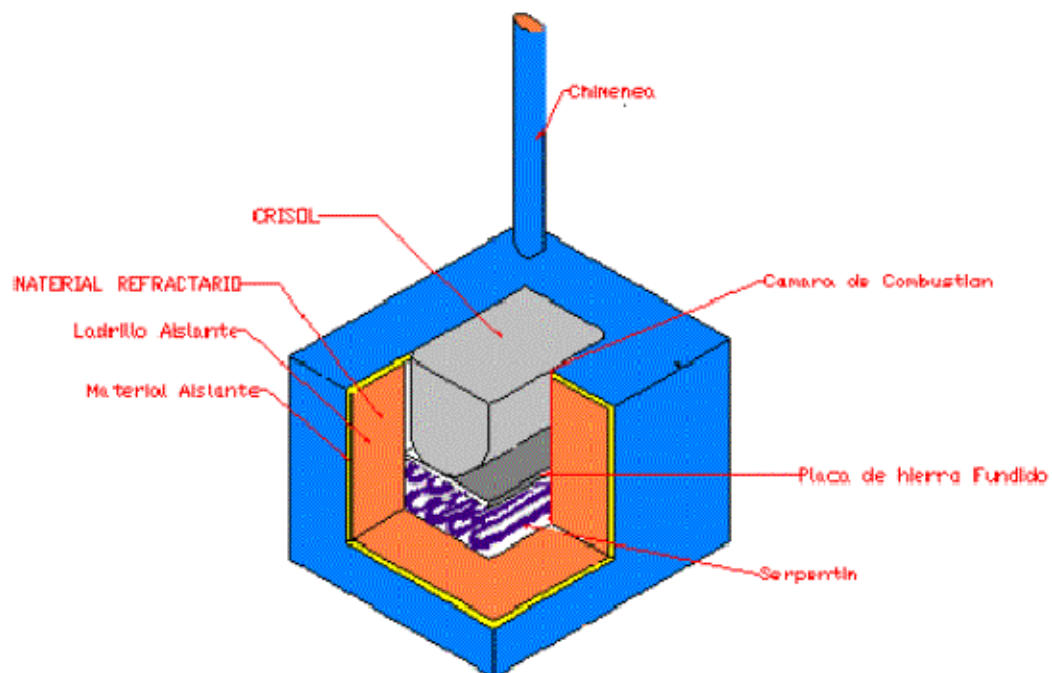
El material seleccionado para el sistema de tubería en el circuito térmico fue acero al carbón tipo B, cedula 40, diámetro nominal 1 in, debido a su bajo costo, facilidad de acople por medio de soldadura y larga vida de servicio.

3.1 Serpentín al interior de la unidad de calentamiento (horno crisol)

El serpentín al interior del horno se diseñó teniendo en cuenta la necesidad de aprovechar al máximo el calor disponible en gases de combustión y el espacio disponible para su instalación.

En la figura 27 se observa la ubicación del serpentín al interior del horno.

Figura 27. Corte transversal del Horno de crisol modificado



En la tabla 18. se presenta las especificaciones de diseño del serpentín ubicado en la cámara de combustión del horno crisol HC.

Tabla 18. Especificaciones del serpentín de la unidad de calentamiento

Material de construcción	Acero inoxidable Tipo 304
Temperatura límite de diseño del material (°C)	815
Diámetro nominal (in)	3/4
Longitud estimada (m)	12
Área disponible para transferencia de calor (m ²)	0.95

3.2 Serpentín del baño de galvanizado

En el caso del serpentín del baño de galvanizado, la principal limitante es el material de construcción, debido a la condición corrosiva del baño, la cual se presenta a continuación en la tabla 19.

Tabla 19. Composición química y condiciones de trabajo del baño Níquel mate²²

Variable	Valor óptimo
pH	3.8
Temperatura (°C)	60
Densidad (°B)	25
NiSO ₄ (g/L)	320
NiCl ₂ (g/L)	26
H ₃ BO ₃ (g/L)	45

Luego de consultar acerca de propiedades generales de corrosión de algunos metales y aleaciones²³, se encontró que el material que presenta mejores

²² Manual de Procedimientos de la Sección de Galvanizado, SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD de la empresa FANTAXÍAS LTDA.

²³ PERRY, J. "Manual del Ingeniero Químico", séptima edición, Mc Graw-Hill, 2002, Tabla 28.2 "Propiedades generales de corrosión de algunos metales y aleaciones" Pág. 28-35

propiedades es el Titanio, debido a que es altamente resistente a la corrosión, cuando se expone en soluciones acuosas que contienen cloruros, ácidos y álcalis.

En la tabla 20 se presentan las especificaciones de diseño para el serpentín del baño de galvanizado.

Tabla 20. Especificaciones de diseño del serpentín del baño de galvanizado

Información del Tanque	
Identificación	Baños de Níquel
Longitud (m)	1.17
Ancho (m)	0.88
Alto (m)	0.94
Capacidad (litros)	834
Profundidad de la solución (m)	0.81
Información de las Temperaturas	
Temperatura final del tanque (°C)	60
Temperatura ambiente (°C)	25
Tiempo de calentamiento (horas)	8
Medio de calentamiento	Aceite térmico
Carga calórica (KJ/h)	12,500
Información del Serpentín	
Material	Titanio Ti6A
Área superficial requerida (m ²)	0.45
Longitud de serpentín (m)	0.75
Ancho de serpentín (m)	0.65

4. Selección de la bomba.

Para la selección correcta de la bomba del circuito térmico, se realizaron los siguientes pasos:

- a. Distribución de la tubería.
- b. Determinación del caudal que impulsará la bomba.
- c. Cálculo de la carga hidráulica total en la bomba.

A continuación se detalla cada uno de los pasos.

a. Distribución de la tubería.

Se realizó un diagrama de una sola línea del sistema de tubería, basado en las condiciones reales de trabajo; muestra todas las tuberías, conexiones, válvulas, equipo y otras unidades del sistema. Este diagrama también incluye todas las elevaciones verticales y vueltas agudas del sistema. En la figura 26 se presenta el Diagrama de tubería propuesto para la instalación oleotérmica en FANTAXÍAS.

b. Determinación del caudal que impulsará la bomba.

La capacidad de la bomba se calculó con base en la velocidad recomendada de circulación del aceite a través de la unidad de calentamiento (horno modificado HC) , la cual debe estar entre **2 y 3 metros por segundo**, de tal modo que garantice el flujo turbulento, para obtener de esta manera una mejor absorción de calor en el menor tiempo posible y evitar la descomposición del aceite por temperaturas excesivas en las paredes de los tubos del serpentín.

En la tabla 18. “Especificaciones del serpentín de la unidad de calentamiento “ se observa que el diámetro de tubería²⁴ escogido para la construcción del serpentín es de ¾ in. El área transversal de una tubería de ¾ in es $3,43 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ y asumiendo una velocidad de circulación de aceite a través de la unidad de calentamiento de 2.3 m/s se determina el caudal mediante el siguiente modelo:

$$q = V * A * 60,000 \quad (34)$$

Donde:

q = caudal (l/min),

V =Velocidad de circulación del aceite (m/s).

A = área trasversal de la tubería (m^2)

60000 = constante para conversión de unidades

²⁴ Toda la información sobre tuberías fue tomada del Libro Principios de operaciones unitarias. Alan S.Foust. Apéndice C-6^a. Dimensiones de tubo convencional de acero (normas ASA B36.)-

se reemplaza los valores de velocidad y área para obtener el caudal que debe suministrar la bomba.

$$q = 47,334 \approx 50 \text{ L/min}$$

Como se mencionó en la etapa 3 del diseño del circuito térmico, el diámetro de la tubería del sistema es de 1 in; esta elección se hizo con el fin de minimizar las pérdidas por fricción de la tubería.

A continuación se presenta la relación entre los diámetros de tuberías y velocidades de circulación en el circuito térmico.

Tabla 21. Relación entre los diámetros de tuberías y velocidades para un caudal de **50 l/min**

Diámetro nominal de tubería (in)	Área transversal (m ²) *10 ⁴	Velocidad del aceite (m/s)
3/4	3,4307	2.3
1	5.5758	1.5

c. Cálculo de la carga hidráulica total en la bomba.

La carga hidráulica total de la bomba se calculó teniendo en cuenta la velocidad del sistema, las pérdidas debidas a la tubería y a los accesorios mediante la ecuación de Bernoulli..

$$\Delta \frac{1}{2} V^2 + g \Delta h + \int_{P1}^{P2} \frac{1}{\rho} dP + W + E_v = 0 \tag{35}$$

Donde:

V = velocidad del fluido (m/s)

h = Altura (m)

P = Presión (Pa)

ρ = Densidad del fluido (Kg/m^3)
 E_v = Pérdida por fricción (m^2/s^2),
 W = Potencia de la bomba (m^2/s^2)

Los términos de velocidad, presión y altura se despreciaron debido a que son muy pequeños comparados con el término de pérdidas totales por fricción (E_v). Después de realizar las simplificaciones correspondientes, se obtiene el siguiente modelo abreviado:

$$W + E_v = 0 \quad (36)$$

Para calcular las pérdidas totales por fricción (E_v), se requiere el valor de Factor f y las longitudes equivalentes de tuberías y accesorios.

- **Determinación del Reynolds y del factor de fricción.**

Para la estimación del Reynolds se empleó el siguiente modelo:

$$Re = (D \cdot V \cdot 10^6) / \mu_c \quad (37)$$

donde

D = diámetro interno de la tubería (metros)

V = velocidad del fluido (metros por segundo)

μ_c = viscosidad cinemática del fluido a la temperatura de trabajo (cStokes)

10^6 = factor de conversión.

A continuación se presenta la tabla 22., la cual muestra los valores Factor de fricción a diferentes temperaturas del aceite.

Tabla 22. Valores de Factor f a diferentes temperaturas del aceite²⁵.

Temperatura (°C)	Diámetro ¾ in			Diámetro 1 in		
	Re	Flujo	Factor f	Re	Flujo	Factor f
40	2130	Laminar	0.044	3560	Laminar	0.04
100	11325	Turbulento	0.03	1896	Turbulento	0.028
200	29850	Turbulento	0.026	52440	Turbulento	0.024

- **Longitudes equivalentes de tuberías y accesorios**

Conociendo la longitud de tubería total del sistema y la cantidades de accesorios utilizados en el circuito térmico, se calcularon las longitudes equivalentes empleado la tabla “ Longitud equivalente representativa en diámetros de tubo (L/D) de varias válvulas y accesorios (Crome Co.)”²⁶. En la tabla 23., se presentan las longitudes p equivalentes para los distintos accesorios..

Tabla 23. Longitudes equivalentes de los accesorios utilizados en circuito térmico

Velocidad de Circulación (m/s)	Accesorio	Número	Longitud equivalente(L/D)	Longitud equivalente (L/D) _T total
2.43	Serpentín unidad de calentamiento	3	3077	9231
	Serpentín usuario	3	500	1500
	Total			10731
1.5	Válvula de cheque	1	150	150
	Válvula de compuerta	12	13	156
	Codo convencional 90°	28	30	840
	Contracción súbita	4	24	96
	Expansiones súbita	4	45	180
	T convencional	7	20	140
	Tubería lisa 1 in	54.6 m	37.6/m	2502.96
Total			3924.96	

Después de calcular el factor de fricción y la longitud equivalente total, se calcularon las pérdidas debidas al flujo de aceite a través del circuito mediante el siguiente modelo:.

²⁵ Leidos de la Grafica de Moody. Factor de fricción del número de Reynolds con la rugosidad relativa como parámetro (Moody, L.F., Trans. ASME, 66, Págs. 671-84(1944)).

²⁶ Principios de operaciones unitarias, Alan S.Foust, Continental, México,1987, Apéndice C-2ª, pág. 715.

$$E_v = 0.5 * f * (L/D)_T * V^2 \quad (38)$$

Donde:

E_v = Pérdida por fricción (m^2/s^2),

f = Factor de fricción (adimensional)

$(L/D)_T$ = Longitud equivalente total (adimensional)

V = Velocidad de flujo (m/s)

Las pérdidas se calculan por separado, debido a que se dispone de dos diámetros de tubería diferente.

$$E_v = 0.5 * f * (L/D)_{3/4"} * V^2 + 0.5 * f * (L/D)_{1"} * V^2$$

$$E_v = 0.5 * 0.03 * 10731 * 2.43^2 + 0.5 * 0.028 * 3924.96 * 1.5^2$$

$$E_v = 1074.12 m^2/s^2$$

Este valor representa la caída de presión a través de todo el circuito; para obtener unidades de presión convenientes se debe multiplicar el valor de E_v por la densidad del fluido. En el rango de temperaturas de operación del aceite la densidad se sitúa aproximadamente en 868 Kg/m^3 .

$$E_v = 1074.12 m^2/s^2 * 868 \text{ Kg/m}^3$$

$$E_v = 932334.8 \text{ Pa} \quad (94.7 \text{ m H}_2\text{O})$$

El valor anterior corresponde a la caída de presión a lo largo del circuito o a la carga hidráulica total del sistema; se aplicó un factor de seguridad de 25%, valor típico empleado en el diseño de la bomba de un circuito térmico.²⁷ El valor obtenido de E_v , luego de aplicar el factor de seguridad es **118.375 m H₂O**.

²⁷ Manual de ACEITES PARA TRANSFERENCIA DE CALOR, Departamento Técnico. División Lubricantes. TERPEL. 1998.

- **Potencia necesaria para accionar la bomba**

La entrada de potencia al freno a una bomba, se determinó mediante el siguiente modelo²⁸:

$$bhp = \frac{(q)(H)(s)}{3960e} \quad (39)$$

donde

bhp = potencia hidráulica (hp)

q: = caudal (galones por minuto)

H: = carga hidráulica (pies de agua)

s: = gravedad específica del líquido

e: = eficiencia hidráulica de la bomba

Se asumió una eficiencia hidráulica de la bomba igual al 60 por ciento y se obtiene la potencia teórica:

***Bhp* = 1.8 hp.**

A continuación en la Tabla 24, se presenta un resumen de los datos necesarios para la selección de la bomba.

Tabla 24. Datos necesarios en la selección de la bomba del circuito térmico.

Condiciones del líquido a bombear	
Líquido	Aceite térmico ISO 22
Temperatura (°C)	150
Gravedad específica	0.868
Viscosidad (cSt)	1.15
Capacidad de la bomba	
Caudal que maneja (gpm)	13.3
Carga hidráulica (m H ₂ O)	119
Potencia al freno (hp)	1.8

²⁸ Principios de operaciones unitarias, Alan S.Foust, Continental, México, 1987, Apéndice C-2^a, pág. 592

Con la información suministrada por la tabla 23. se consulta la clase y tipo de bomba que cumplan las características de servicio.

5. Diseño del Tanque de Expansión

El aceite cuando adquiere temperatura de operación incrementa su volumen debido a la expansión térmica en un 20 % (a temperatura de 310°C aprox.) por lo tanto es necesario instalar un tanque de expansión para aliviar el sistema a un aumento excesivo del volumen del aceite.

Para el diseño del tanque de expansión se tuvieron en cuenta los siguientes puntos:

- a) Debe diseñarse con volumen geométrico suficiente para la expansión, quedando libre $\frac{1}{4}$ de volumen por encima del aceite caliente
- b) Debe estar instalado a una altura mínima de 2.50 mts., para proveer de presión hidrostática al sistema en especial a la bomba, además eliminar posible aire atrapado cuando se carga con aceite nuevo o aire que pueda infiltrarse al sistema por causa de descuido en las conexiones o aire que pueda entrar por los sellos de la bomba.
- c) La temperatura del aceite en el tanque de expansión no debe exceder los 60°C. En esta parte del circuito el aire está en contacto con el aceite, una temperatura superior lo oxidaría rápidamente, deteriorándole y reduciéndole su vida útil.

- **Calculo del volumen del aceite en el sistema**

El volumen del aceite del sistema se calculó a partir del conocimiento de los diámetros y longitudes de tubería del circuito térmico, mediante el siguiente fórmula:

$$\text{Volumen} = \text{Área seccional interna} * \text{Longitud de Tubería}$$

El volumen se calcula por separado, debido a que se dispone de dos diámetros de tubería diferente.

$$\text{Volumen} = 3.430 * 10^{-4} \text{ m}^2 * 51 \text{ m} + 5.5758 * 10^{-4} \text{ m}^2 * 54.6 \text{ m}$$

$$\text{Volumen} = 0.04794 \text{ m}^3 \text{ (47.94 Litros)}$$

El incremento de volumen que sufre el aceite cuando alcanza la temperatura de operación, corresponde al 20% del total del sistema , es decir **9,58 Litros**. Por tanto el tanque se diseñó con capacidad de **20 litros**, correspondiente a dos veces el volumen de expansión del aceite valor recomendado por los proveedores de aceite térmico²⁹.

6. Selección de instrumentos de medición y control.

Para una larga vida del equipo y el aceite, se deben instalar dispositivos de seguridad para apagar el sistema en caso de excesiva temperatura o presión, o en caso de fallas en la circulación del flujo. Se recomienda el uso de termómetros e indicadores de presión para asegurar una operación adecuada. La temperatura del aceite no debe exceder de los 25°C por encima de la temperatura requerida en el proceso.

El número de elementos de medición usados en el sistema están relacionados con las necesidades del circuito. Principalmente en la unidad de calentamiento (Horno de

²⁹ www.chevrontexaco.com.uy/hojastec/industriales/calor/texatherm.doc

crisol modificado) , en donde prácticamente se controlan todos los parámetros, deben estar instalados los siguientes elementos:

Termóstato: debe estar ajustado para mantener las diferencias de temperaturas del proceso, deberá estar instalado con acción a la fuente de calor para sacarla de servicio en el momento de incremento de temperaturas por fuera del rango de operación.

Manómetros: se deben situar en la entrada y salida de la tubería abastecimiento, en la entrada y salida del calentador, en la bomba de succión y descarga, y también antes y después de cada aplicación de calor (entre la válvula de control y la aplicación).

Termómetros: La temperatura más importante a medir en el sistema está en la salida de la unidad de calentamiento. Otras temperaturas a controlar son : Tanque de expansión, temperaturas en la línea de proceso.

Otros. Disponer de una válvula en la línea después de filtros para toma de muestra de aceite en servicio³⁰.

En la tabla 25., se presenta un resumen de la instrumentación utilizada en el circuito térmico.

Tabla 25. Instrumentación requerida por el sistema térmico

Instrumentos de medición y control	Cantidad
Termóstatos	3
Manómetros (100 –250 libras/pulg)	14
Termómetros (300-400°C)	12

³⁰ Manual de ACEITES PARA TRANSFERENCIA DE CALOR . Departamento Técnico. División Lubricantes. TERPEL.1998.

A continuación en la figura 28., se presenta una vista transversal de las secciones de fundición y galvanizado de la empresa FANTAXÍAS en la que se muestra el circuito térmico propuesto.