

**DISEÑO DE UN HORNO PARA COCCION DE LADRILLOS REFRACTARIOS  
EN UNA EMPRESA DEL SECTOR LADRILLERO**

**Autores**

**EMMANUEL DE JESUS FONTALVO PORRAS**

**ELIVER JOSE GUTIERREZ ROBLES**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA**

**LINEA DE PROFUNDIZACION EN GESTION DE MANTENIMIENTO**

**BARRANQUILLA**

**AÑO 2014**

**DISEÑO DE UN HORNO PARA COCCION DE LADRILLOS REFRACTARIOS  
EN UNA EMPRESA DEL SECTOR LADRILLERO**

**Autores**

**EMMANUEL DE JESUS FONTALVO PORRAS**

**ELIVER JOSE GUTIERREZ ROBLES**

Trabajo de grado presentado como requisito, para optar el título de ingeniero  
mecánico.

**DIRECTOR: Ing. Antonio Saltarín**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA**

**LINEA DE PROFUNDIZACION EN GESTION DE MANTENIMIENTO**

**BARRANQUILLA**

**AÑO 2014**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pagina</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>12</b>
<b>1. GENERALIDADES DEL PROYECTO</b> -----	<b>13</b>
1.1 DEFINICION DEL PROBLEMA -----	13
1.1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA -----	13
1.1.2 DESCRIPCION DEL PROBLEMA -----	14
1.1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA -----	15
1.2 JUSTIFICACION -----	16
1.3 OBJETIVOS -----	17
1.4 METODOLOGIA -----	17
<b>2. MARCO REFERENCIAL</b> -----	<b>19</b>
2.1 MARCOTEORICO -----	19
2.1.1 HORNOS DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS	
TIPO POR LOTES -----	19
2.1.2 HORNOS DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS	
TIPO SEMICONTINUOS -----	24
2.1.3 HORNOS DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS CONTINUOS --	26
2.1.4 SISTEMAS DE COMBUSTION -----	27
2.1.5 SISTEMA DE AISLAMIENTO TÉRMICO-----	30
2.1.6 BALANCE CALORICO DEL HORNO -----	30
<b>3. DESARROLLO DEL DISEÑO DEL HORNO</b> -----	<b>34</b>

3.1 DESCRIPCION DE LAS NECESIDADES PRODUCTIVAS -----	34
3.1.1 REQUERIMIENTOS DEL NUEVO HORNO DE COCCION -----	36
3.1.1.1 CRITERIOS PARA EL DISEÑO GEOMETRICO. -----	37
3.2 DISEÑO CONCEPTUAL Y BASICO DEL SISTEMA DE HORNOS DE SECADO Y QUEMADO DE LADRILLOS REFRACTARIOS. -----	39
3.3 DISEÑO DE DETALLE DEL HORNO -----	46
3.3.1 CALCULOS TERMICOS DEL HORNO. -----	46
3.3.1.1 BALANCE DE CALOR Y POTENCIA PARA LA CAMARA 1. -----	47
3.3.1.2 BALANCE DE CALOR Y POTENCIA PARA LAS CAMARAS 2 Y 3. -----	52
3.4 SELECCIÓN DE QUEMADORES DE GAS PARA COMBUSTION -----	53
3.5 CALCULO DE CONSUMO DE GAS NATURAL. -----	55
3.6 CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL HORNO -----	61
3.6.1 CALCULOS PARA REQUERIMIENTOS DE MATERIALES DEL HORNO. -----	62
3.7 ESTIMADO DE COSTOS DE FABRICACION Y OPERACIÓN DEL HORNO. -----	62
3.8 ANALISIS COMPARATIVO -----	65
CONCLUSIONES -----	66

BIBLIOGRAFIA	-----	67
ANEXOS	-----	69

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Horno para quemado de ladrillo tipo lote de Carga y tiro directo -----	20
Figura 2. Esquema del actual horno artesanal de quemado -----	21
Figura 3. Horno tipo lote con tiro invertido -----	23
Figura 4. Horno tipo lote, alimentado con carro (boogie) de carga ----	24
Figura 5. Horno de tipo semicontinuos para fabricar ladrillos -----	25
Figura 6. Esquema de Horno para fabricación de ladrillos del Tipo continuo -----	26
Figura 7. Hogar para quemado tradicional de combustible Sólido tipo cascarilla de arroz. -----	28
Figura 8. Equipo quemador de gas natural -----	29
Figura 9. Ladrillos tradicionales y con nueva geometría y tamaños ----	35
Figura 10. Diseño propio de la empresa para futuros ladrillos huecos---	36
Figura 11. Esquema de la máquina extrusora para mecanizar la fabricación de ladrillos húmedos. -----	36
Figura 12. Concepto de horno de cuatro cámaras -----	40
Figura 13. Concepto de horno con tres cámaras -----	40
Figura 14. Configuración de los tres hornos para control de las Operaciones -----	42
Figura 15. Proceso de secado con calor de la camara1, de la cámara 2 y la 3 si se necesita -----	42

Figura 16. Cámara 2 en quema -----	43
Figura 17. Cámara 3 en quema -----	44
Figura 18. Diagrama de temporización de las operaciones de Los tres hornos -----	45
Figura 19. Medidas internas de cada horno para albergar 2000 ladrillos, con tolerancia dimensional de 200 milímetros -----	46
Figura 20. Diagrama de pérdidas totales para paredes de espesor 40 centímetros, incluyendo todos los modos de transferencia De calor-----	51
Figura 21. Quemador de gas natural, marca Baltur de 400.000 Btu / hr -----	54

## LISTA DE SIMBOLOS

$E$  = Símbolo genérico para energía

$h$  = Coeficiente convectivo para la transferencia del calor.

$Nu$  = Número de nusselt.

$NO_x$  = Óxidos nitrosos

$Q$  = Símbolo genérico para calor y potencia térmica.

$SO_x$  = Óxidos de sulfuro

$E_{en}$  = Energía de entrada al sistema (pueden ser varias)

$E_g$  = Energía generada internamente en el sistema

$E_s$  = Energía de salida

$E_c$  = Energía consumida internamente en el sistema

$E_a$  = Energía que se acumula. Su valor es nulo en estado estable.

$Q_c$  = Calor derivado del proceso de combustión.

$M_l$  = Masa de ladrillo

$Q_g$  = Calor residual de los gases de combustión en la descarga al ambiente.

También tiene en cuenta el efecto del flujo interno de los gases.

$Q_h$  = Calor necesario para eliminar la humedad, sea del combustible, de los ladrillos y del aire ambiente que ingresa al interior del horno.



## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Costos de fabricación del horno -----	63
Tabla 2. Costos operativos mensuales, estimados para el sistema De hornos propuesto -----	64

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO 1. Detalles de quemadores baltur -----	68
ANEXO 2. Datos de combustibles para hornos -----	70
ANEXO 3 poder calórico de combustibles para Hornos-----	71
ANEXO 4 coeficientes equivalentes de pérdidas Por conducción – convección en paredes de Hornos -----	73
ANEXO 5. Fotos del actual horno, con modificaciones De la Chimenea operando con leña -----	74

## RESUMEN

El siguiente trabajo trata de una propuesta de diseño de un horno a utilizar para fabricar ladrillos refractarios. El objetivo general es “Diseñar un horno para el quemado de ladrillos refractarios que mejore la capacidad productiva y la calidad del producto final, que reduzca la contaminación ambiental y sea fácil y seguro de operar”. Para ejecutar la propuesta, el plan metodológico plantea un proceso secuencial de realización de actividades, donde inicialmente se han realizado visitas a tres fábricas artesanales en municipios de la región (santo tomas, sitio nuevo y sabana grande), que poseen hornos que obtienen el calor de la quema de leña tomada de bosques locales, lo que representa un alto impacto ambiental negativo. Así mismo se visitaron dos empresas formales en el municipio de Juan Mina (que amablemente abrieron sus puertas, requiriendo su no mención), donde el calor es obtenido con la quema de carbón mineral, que requiere procesos de molienda lo que afecta grandemente la confiabilidad de la planta y el impacto ambiental por polvillo de carbón y cenizas es desmedido en la vegetación circundante por efecto de lluvias acidas y afectaciones a la flora y fauna.

El diseño conceptual plantea una mejora a los sistemas tradicionales, consistente en construir tres cámaras a utilizar en forma secuencial y sincronizada, de tal manera que se minimice la perdida actual de calor en los sistemas tradicionales de un horno grande. El esquema operacional plantea que los calores de una cámara se utilicen para precalentar las otras y se puedan usar cuatro quemadores para todas las cámaras, por lo que los mismos son portátiles, lo que se facilita por el peso y tamaño de los finalmente seleccionados.

## INTRODUCCION

La ingeniería mecánica, desarrolla conocimientos para aprovechar de manera útil los sistemas de conversión energética. Una de las áreas de mayor utilización de recursos energéticos como el carbón, el gas natural y otros en la industria de fabricación de ladrillos de tipo refractarios. Los proyectos de vivienda de cualquier índole, desde las de casas individuales, hasta los conjuntos residenciales de amplios edificios, tienen en la actualidad como unidad estructural este tipo de elementos, por sus evidentes ventajas de peso ligero, capacidad aislante térmica y acústica, entre otros.

En este proyecto se pretende entregar una solución, concreta como el diseño de un horno operando con gas natural a una empresa de fabricación artesanal de ladrillos, que actualmente utiliza como horno de quemado para los ladrillos uno que utiliza como combustible leña de bosques cercanos. Con lo que se pretenden mejorar aspectos como menor impacto ambiental, mejorar la rentabilidad y seguridad operativa, ampliar la diversidad de productos y posicionar en la región del Carmen de Bolívar a la naciente empresa manufacturera de ladrillos.

En el capítulo uno se presenta las generalidades del proyecto. En el dos el marco referencial y en el tres el desarrollo detallado de la solución, que permita evidenciar el alcance de las mejoras pretendidas. La solución muestra aspectos técnicos y económicos, que sirven de base en la toma de la decisión final para cambiar la tecnología del actual horno por una más rentable.

En los anexos finales se presentan fotos de la actual instalación, donde puede visualizarse además algunas mejoras constructivas derivadas de la solución propuesta en este proyecto.

## **1. GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **1.1 DEFINICION DEL PROBLEMA**

Existen múltiples procesos industriales que requieren de calor para su normal desarrollo, por esto se utilizan diversos medios de calentamiento como son los intercambiadores de calor, los hornos en diferentes tipos y múltiples equipos, los sistemas de tuberías de vapor y líquidos térmicos, entre otros. La ingeniería mecánica tiene amplia aplicación en el diseño de los mencionados hornos y equipos de intercambio de calor, persiguiendo el objetivo de alcanzar los máximos beneficios para el ciclo de utilización de este tipo de equipos. El diseño de hornos implica resolver un complejo conjunto de factores y restricciones, que aparecen según las especificaciones que se definan para el equipo.

#### **1.1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La industria de la construcción es universal en su aplicación para resolver las necesidades de vivienda y confort para una amplia variedad de clientes con necesidades bien diferenciadas. Los costos de las obras que se desarrollan serán altos o bajos en función del costo de los materiales, que es uno de los rubros de mayor peso. Para el caso de proyectos de vivienda familiar, edificios y conjuntos residenciales, los bloques y ladrillos son unidades fundamentales. La tendencia actual es tener materiales con menor peso a los existentes para disminuir los costos de basamento de las construcciones, pero que además sean materiales de buen aislamiento térmico y acústico, además de estable estructuralmente a través del tiempo. Los ladrillos huecos cocidos son una opción de amplia utilización por su menor relación peso / volumen, su alta capacidad aislante tanto térmica como acústica, por dejarse fabricar con diversas formas externas que brindan estética a

las construcciones, que facilitan el agarre de mortero si el cliente se decide por la opción del empañete de las paredes. Finalmente es reconocida su máxima capacidad de estabilidad ante el ataque de agentes ambientales de deterioro como las lluvias, el viento, el sol, los cambios de temperatura y su competitivo precio unitario en el mercado.

### **1.1.2 DESCRIPCION DEL PROBLEMA**

Un grupo de inversionistas desea incursionar en el negocio de fabricación de ladrillos refractarios a nivel semiindustrial (cantidades menores a 10.000 ladrillos /día), para mejorar la calidad y productividad de su actual negocio de fabricación de ladrillos que es de tipo artesanal. La línea artesanal en el momento utiliza un horno de quemado de los ladrillos de tipo rudimentario que genera el calor del proceso, quemando leña especial como eucalipto, cedro y similares, traída de bosques cercanos al pueblo donde queda la fábrica. El mencionado modo de operación posee evidentes desventajas que deben superarse, entre las cuales se tienen: dificultades de tener madera disponible para la quema en épocas de lluvia, en razón a la alteración en la calidad de la madera para el quemado y en la dificultad de su transporte desde el bosque hasta la localización del horno, por el daño de las vías destapadas que se presentan en épocas de lluvia. También en esta modalidad artesanal de quemado de ladrillos, se necesitan dos personas día y noche de manera permanente, alimentando la madera al horno, exponiendo su salud por los cambios de temperatura y humedad que ocurren entre el día y la noche y los continuos trasnochos que experimentan. Otro efecto indeseable es la baja velocidad de quemado, que utiliza dos días para alcanzar a producir 4000 ladrillos, lo que representa una baja productividad mensual y en total del tiempo para posterior enfriamiento y extracción, la operación de quemado de un lote de 4000 ladrillos, se toma seis días en total. Actualmente de un cumulo de 4000 ladrillos / quema, se tiene que en promedio 200 ladrillos se vitrifican (recalentados), 350 quedan crudos

(color amarillo), 200 ladrillos se rompen, para arrojar una pérdida promedio total de 750 ladrillos / quema, lo cual representa una pérdida de calidad del 19 %, lo cual quiere resolver con la mejora tecnológica que piensa implementarse.

La opción tecnológica disponible para mejorar el actual proceso de quemado de ladrillos, es pasar del actual horno artesanal a uno de tipo industrial o semiindustrial, de las tantas versiones existentes o combinar algunas características en el diseño propio, que de todas maneras debe ser realizado a través de un proceso de diseño que permita definir su configuración y desempeño particular para la empresa en cuestión. Que pueda utilizar otro energético primario para crear el calor del proceso, como pueden ser diversos métodos eléctricos o la utilización de combustibles como el gas natural y/o el aceite combustible para motores (ACPM), como también aceites quemados, fáciles de obtener en la región. Tienen los hornos de este tipo, ventajas de mayor productividad, mejor eficiencia energética y menor impacto ambiental, aunque su costo inicial sea mayor al de tipo rudimentario, pero en el costo del ciclo de vida, se espera plantear una solución que económicamente sea mejor a lo que se tiene actualmente.

### **1.1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA**

¿Cómo puede la empresa interesada resolver la necesidad de tener un horno para quemado de ladrillos refractarios, que mejoren la calidad, la productividad de su línea de negocios y aminore el impacto ambiental actual?

## **1.2 JUSTIFICACION**

Es claro que mejoras en la capacidad técnica, representan mayor competitividad y posibilidades de crecer de la empresa, lo cual favorece el desarrollo regional y la calidad de vida de los habitantes, en razón a la generación de empleo directo e indirecto que este tipo de industrias puede crear a sus alrededores.

Los beneficios derivados del desarrollo del proyecto son:

- ✓ Se mejora la competitividad de la empresa en el sector ladrillero de la región, dado que se satisface una mayor parte del mercado, cuya oferta excede ampliamente la actual demanda y los clientes pueden construir casas con calidad en mayor número.
- ✓ Académicamente se aplican conocimientos de ingeniería mecánica en el área de equipo térmico lo que evidencia la calidad formativa en la profesión de los egresados del programa. Además se deja un material de conocimiento base, que sirve de ejemplo de aplicación en el diseño de hornos de este tipo que actualmente no se tiene en el programa.
- ✓ En la seguridad de operación, se mejoran las condiciones de trabajo de los artesanos del ladrillo y se evita la peligrosa exposición de gases con alta temperatura que ocasionan desde molestias hasta graves daños orgánicos con el tiempo de exposición.
- ✓ Se espera una mejora en el impacto ambiental, dado que el diseño considera sistema de quemado de combustible eficiente y material y condiciones de aislamiento mejores a las tradicionales.
- ✓ Se va a aumentar la producción de ladrillos de manera significativa, disminuyendo las pérdidas en un 15%, con esto consiguiendo menos ladrillos



recalentados, menos ladrillos crudos, gracias a la combustión uniforme y variables como temperaturas y tiempos controlados.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un horno para el quemado de ladrillos refractarios que mejore la capacidad productiva y la calidad del producto final, que reduzca la contaminación ambiental y sea fácil y seguro de operar.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Definir los requerimientos y restricciones del sistema a desarrollar para establecer los criterios de diseño a aplicar.
- Desarrollar las fases conceptuales, básicas para definir los modelos de cálculo y la información necesaria para su construcción.
- Elaborar un estimado de costos para el ciclo de uso del equipo para estimar su factibilidad económica.

### **1.4 METODOLOGIA**

La investigación de este trabajo de grado es de tipo descriptiva aplicada. Requiere que los investigadores profundicen en los conceptos relacionados con diseño de hornos para que puedan desarrollar una propuesta con buenas bases de ingeniería.

En este proyecto, diseño del horno implica la definición de la configuración geométrica y física del horno, incluyendo materiales a utilizar para su construcción, incluyendo también los procesos de transferencia de calor, termodinámica y combustión, que definen la eficiencia energética esperada del sistema.

Las fases de diseño que se siguen son:

2.2 Descripción de necesidad y definición de requerimientos.

2.3 Diseño conceptual y básico.

2.4 Diseño de detalle

Para desarrollar el proceso de diseño planteado se definen las siguientes fases, donde se explica cómo se hace y que medios se usan para ejecutar cada objetivo específico. Las fases planteadas son:

**Fase 1.** Se definen los requerimientos funcionales, de seguridad y productivos del equipo a desarrollar. En esta fase se definen la tasa de producción semanal y los posibles horarios de uso del equipo, proyectando la futura producción, tomando como base lo que pueda utilizarse del actual sistema y lo que resulte de las actividades de benchmarking con empresas del sector. Respetando el presupuesto disponible y los tiempos de desarrollo para cumplir los pedidos futuros de los clientes.

**Fase 2.** Se consideran los diversos tipos de hornos utilizados en la quema de ladrillos y seleccionar el que evidencie mejores ventajas para la empresa. Después

desarrollar el concepto de diseño y los modelos de cálculo para determinar geometría y configuración de las diversas partes del horno, con lo que se logra la información para crear los planos del sistema.

**Fase 3.** Se elabora un detallado de los factores de costos, identificando y justificando cada uno de ellos funcionalmente, para finalizar con un presupuesto estimado del costo del sistema diseñado, con lo cual se tiene la base para desarrollar los costos para el ciclo de vida proyectado. Aquí se tendrá en cuenta lo relacionado con la vida útil del horno, que basados en experiencias de construcciones que usan materiales iguales o semejantes, se tiene un estimado mínimo de 5 años.

## **2. MARCO REFERENCIAL**

### **2.1 MARCO TEORICO.**

Los tipos de hornos utilizados en la región Caribe para la quema de ladrillo son de diversas tecnologías. Se tiene desde los tradicionales hornos de adobe con carga y descargue manual, hasta los hornos semicontinuos de tipo mecanizado para el movimiento de la carga y producto final hacia y desde la cavidad del horno. Los hornos de diseño avanzado del tipo producción continua apenas están en proceso de montaje en empresas industrializadas que se están instalando en la ciudad de Barranquilla. A continuación se describe cada uno de los tipos de horno a considerar en este trabajo del tipo por lotes, semicontinuos y continuos, por ser apropiados algunos de estos tipos para su aplicación en el sitio de futura implementación. En general se consideran solo hornos que queman algún tipo de combustible para producir el calor de quemado, porque otras opciones como la eléctrica por resistencia no son rentables en este sector industrial. Los hornos descritos se utilizan ampliamente para el procesado de materiales cerámicos, obteniéndose una amplia variedad de productos, desde piezas ornamentales de arcilla hasta ladrillos y tejas de variadísima forma y tamaños, que satisfacen las necesidades de clientes de cualquier lugar del mundo.

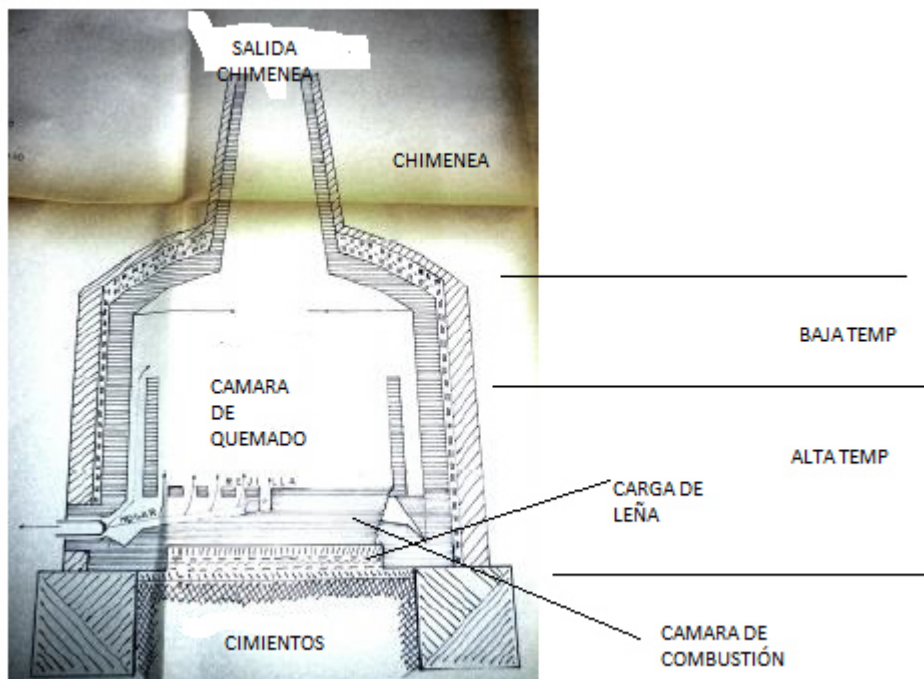
### **2.1.1 HORNOS DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS TIPO POR LOTES.**

En este tipo de hornos, la configuración que se tiene es variada, sin embargo, es común que exista una cámara o espacio donde se colocan los ladrillos a quemar sea en forma manual o mecanizada, de tal manera que los gases de combustión puedan fluir a través de los ladrillos y realizar la cocción de los mismos. La figura 1 y la figura 2, muestran dos tipos de hornos tipo lote de carga.

En la figura 1, la carga de leña o carbón se ingresa por la parte inferior, quemándose encima de los cimientos, los gases calientes fluyen desde abajo, elevándose para

salir por la chimenea. Algunos hornos de este tipo no poseen chimenea o esta es deficiente en altura con lo cual el efecto de tiro y suministro de oxígeno no es adecuado y se tienen bajas eficiencias térmicas y alta concentración de contaminantes, debido al mal proceso de combustión, lo que se evidencia por el alto volumen de humo negro. En su configuración geométrica, existen de tipo cilíndrico y artesanal, construidos los más rudimentarios con arcilla, seguidos por los de tipo adobe y los de mejor desempeño los de ladrillos refractarios de desecho que se utilizan para su elaboración.

Figura 1. Horno para quemado de ladrillo tipo lote de carga y tiro directo.

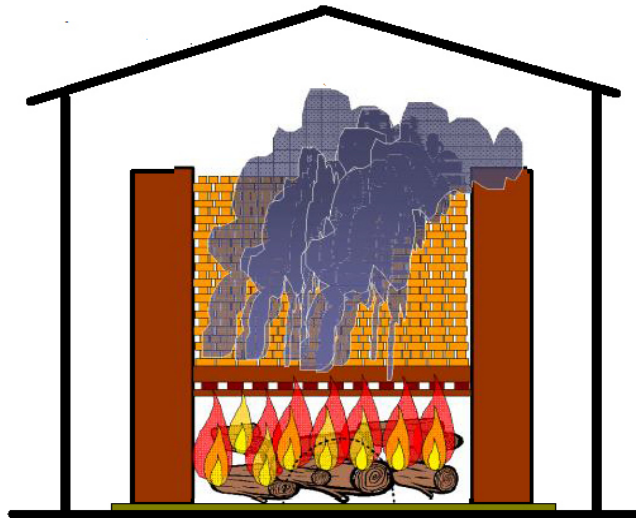


Fuente: JONES, T., 1996, the Basics of Brick Kiln Technology, GATE, Germany.

En la parte inferior encima de los cimientos, se encuentra la cámara de combustión donde es quemado el combustible. Por la parrilla encima de la carga de leña salen expulsados calientes y con altas velocidades los gases de combustión, elevándose y fluyendo por los espacios dejados en la carga de ladrillos que se encuentran en la

cámara de quemado, para finalmente salir expulsados del horno por el túnel de la chimenea, mediante convección natural. Observe que la función de la chimenea es crear un efecto de tiro o succión que facilite la salida de los gases de combustión mediante mejorar el flujo por convección natural, los cuales al salir tiran del aire fresco que ingresa a la cámara de combustión. Para minimizar la altura de la chimenea, modernamente se utilizan ventiladores que presurizan el aire de admisión que ingresa a la combustión, el cual preferiblemente debe estar precalentado para mejorar la eficiencia térmica del sistema. En la figura 2, se presenta el esquema del actual horno tipo lote, donde se visualiza la no existencia de chimenea

Figura 2. Esquema del actual horno artesanal de quemado.



Fuente: adaptado de consultoría del gobierno peruano. “Estudio de definición de tipo de horno apropiado para el sector ladrillero”. Conam. Cusco 2008.

Este tipo de construcciones, aunque sencilla y barata presenta las siguientes desventajas

- Debido al amplio gradiente interno de temperaturas se generan grietas que pueden poner en riesgo la integridad estructural. Lo anterior requiere frecuentes trabajos de mantenimiento para reparar las grietas creadas.
- Debido a altas temperaturas en la parte inferior, ocurre la fusión de ladrillos en la base y en algunos casos de ladrillos en los cimientos y estos deben repararse continuamente.
- Baja eficiencia en la combustión con lo cual se utiliza mayor cantidad de combustible, lo que incrementa los costos de operación, pero además crea alto impacto ambiental por combustible y gases inquemados. Gases de efecto invernadero como el  $\text{CO}_2$  y de lluvias ácidas como los  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , son de alta cantidad en este tipo de hornos. Además material articulado como cenizas e inquemados sale expulsados, aumentando el riesgo en la salud del personal operativo y de vecinos a la fábrica, con enfermedades de tipo bronco – respiratorias, silicosis y otras más peligrosas para la salud humana, animal y vegetal.
- Al no tener bóveda en la parte superior, las pérdidas de calor son altas, quemando mayor combustible y alargando los tiempos de quemado por las altas ineficiencias del sistema.
- Mediciones de temperatura en la entrada, arrojan valores promedio cercanos a los  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  y en la parte superior a los  $450\text{ }^\circ\text{C}$  lo que indica un alto gradiente térmico, que afecta la calidad del producto ubicado en las partes superiores que no se quema correctamente y no sirven o deben comercializarse como productos de segunda categoría. Para el horno artesanal analizado, las pérdidas promedian un 25 %, lo que crea un problema de manejo de residuos sólidos y se ven altas montañas de este material, contaminando visualmente el entorno.
- Debido a la necesidad de proteger a los alimentadores de leña y/o carbón al horno, se debe construir una cabaña encima del horno, lo cual ha resultado en incendios que ponen en riesgo la salud de los trabajadores.

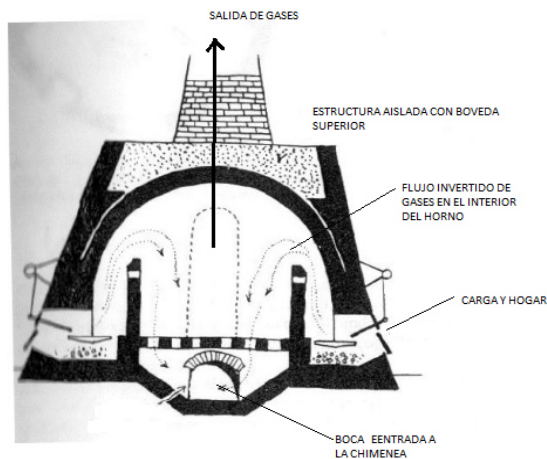


Una mejora notable, aunque más compleja de construir y más costosa de instalar, es mostrada en la figura 3, puede verse que el flujo de gases calientes provenientes de la combustión en el hogar, se dirigen a la parte inferior del horno, con lo cual se homogeniza la temperatura interna y se controlan los problemas de agrietamiento, fusiones y de mala calidad del producto final.

La figura 4, muestra un horno de este tipo, pero alimentado mecánicamente para pequeñas producciones, lo que facilita el cargue y descargue de los ladrillos en proceso.

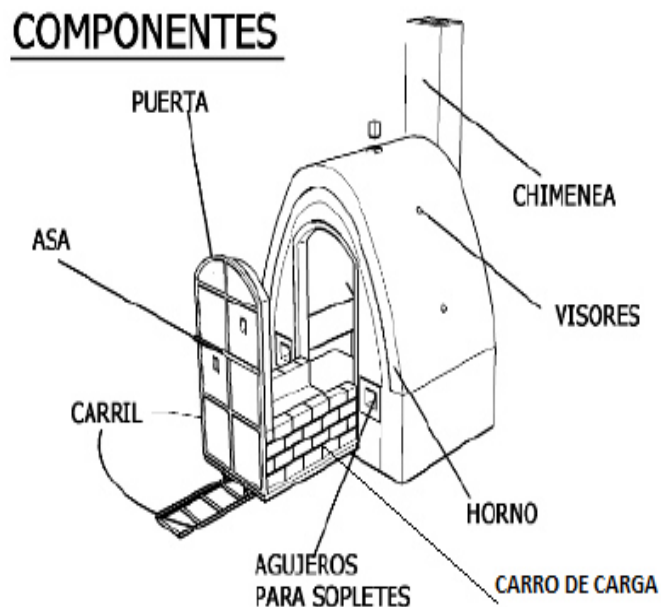
Resumiendo, este tipo de hornos es apropiado para cantidades promedio de hasta 5000 ladrillos / quema. Donde el tiempo promedio de quemado oscila según tamaño y cantidad de quema entre 48 y 72 horas (1), por lo cual son clasificados como de pequeña producción.

Figura 3. Horno tipo lote con tiro invertido.



Fuente: JONES, T., 1996, the Basics of Brick Kiln Technology, GATE, Germany. Página 40.

Figura 4. Horno tipo lote, alimentado con carro (boogie) de carga.

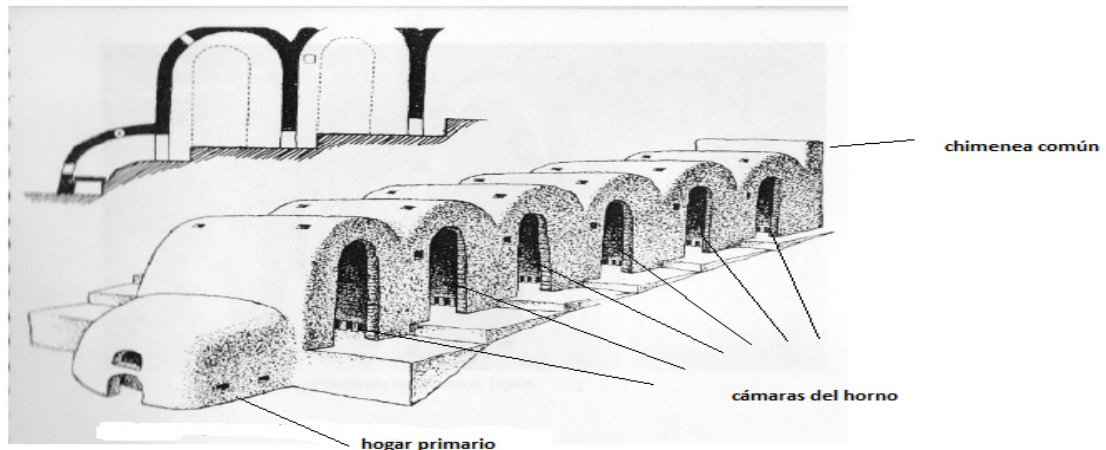


Fuente: “Estudio de definición de tipo de horno apropiado para el sector ladrillero”.  
Conam. Cusco 2008.

### **2.1.2 HORNOS DE FABRICACIÓN DE LADRILLO TIPO SEMICONTINUOS**

En este tipo de configuración, se tienen varias cámaras, por donde circulan los gases quemados a alta temperatura, mejorando la eficiencia térmica y la capacidad de producción. Se denominan semicontinuos, porque al tener varias cámaras cargadas en la modalidad tipo lote, sin embargo permiten tener flujos de lote cada cierto tiempo, con lo que se mejora el flujo de la producción, aunque requieren amplios espacios para su construcción. La figura 5, presenta uno de estos tipos.

Figura 5. Horno de tipo semicontinuos para fabricar ladrillos.



Fuente: Moreno, Franco. EL LADRILLO EN LA CONSTRUCCIÓN. España. Ediciones CEAC. 1981.

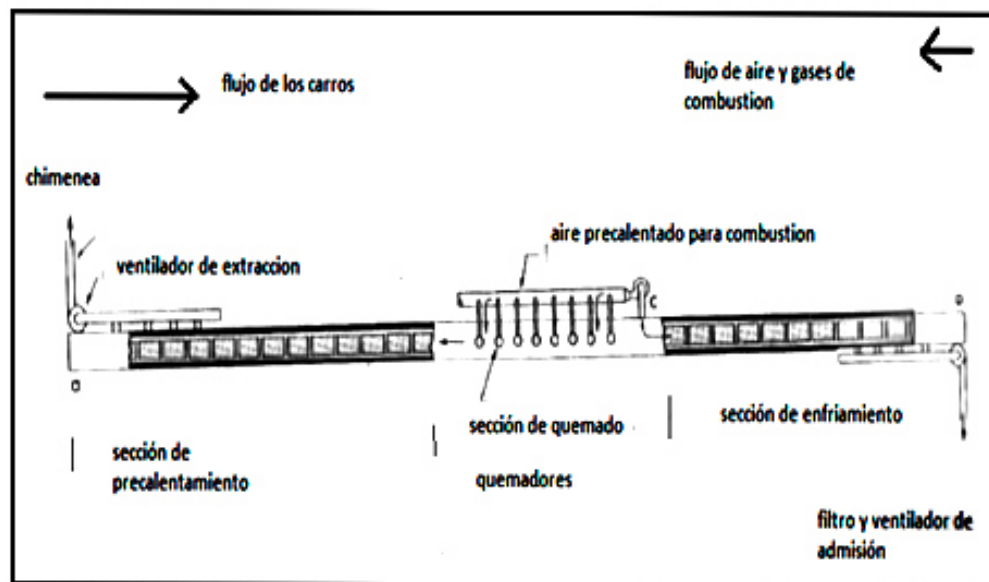
El encendido inicia en el hogar primario, donde los gases queman los ladrillos cargados en ese sitio y el calor residual precalienta las demás cámaras, esto uniforma las temperaturas y controla los gradientes térmicos con lo que se consigue alta calidad y alta productividad. Al alcanzarse los 1000 °C en la cámara primaria las otras estarán en rangos promedio de 400 °C (2), con lo cual una vez quemada la carga de la cámara primaria, se procede a encender la cámara siguiente para lograr el quemado, repitiendo sucesivamente el proceso a través de las demás cámaras hasta finalizar con la próxima a la chimenea. La carga de estos hornos pueden mecanizarse usando carros rodando sobre rieles. Se mejora la producción y la calidad, pero son costosos de fabricar y deben justificarse económicamente según las necesidades propias. También puede adaptarse el sistema de tiro invertido pero se aumenta apreciablemente el costo de construcción.

Existe una variante del horno de túnel, que es el de tipo anillo, en este se tienen los tres procesos de precalentamiento, quemado y enfriamiento pero en una configuración geométrica tipo elíptica, lo que permite ahorrar espacio longitudinal para el caso que existan restricciones geométricas de esta dimensión.

### 2.1.3 HORNOS DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS CONTINUOS

Se denominan así porque pueden operar las 24 horas del día, 365 días al año. Este tipo de hornos es apropiado para altas producciones, con corridas de hasta 200.000 ladrillos / día. <sup>1</sup> Son costosos de fabricar y requieren algún grado de automatización y operaciones altamente mecanizadas. La figura 6 muestra un esquema del horno tipo túnel. La carga de ladrillos se ingresa al túnel moviéndose continuamente de manera uniforme. Internamente el horno posee tres secciones. La sección de precalentamiento, la de quemado y la de enfriamiento. El largo mínimo aceptable se establece según experiencia en 100 metros lineales (3)

Figura 6. Esquema de Horno para fabricación de ladrillos del tipo continuo.



Fuente: Moreno, Franco. EL LADRILLO EN LA CONSTRUCCIÓN. España. Ediciones CEAC. 1981.

<sup>1</sup> Arias C.T. 2007 producción de ladrillos refractarios en hornos de ladrillos, manual tecnológico para cubrir necesidades de capacitación a productores. CONAFOR. México

Con estos hornos se procesa una gran variedad de productos y materiales, que requieren un conocimiento preciso para aplicar un control automático, que maximiza la calidad y productividad, requisitos a cumplir para recuperar el alto costo inicial de este tipo de instalaciones, que además requieren arduo trabajo de mantenimiento preventivo y correctivo, dada la gran cantidad de componentes que lo constituyen. La alta eficiencia de este tipo de hornos, proviene de que se utiliza la mayor parte del calor de los gases de combustión en el interior del horno y que el proceso de precalentamiento del aire de admisión mejora la eficiencia de la combustión. Debido al control automático con el que deben operar solo puede procesarse carga uniforme, de tal manera que para nuevos productos debe ajustarse el software de control y poseer datos e información precisa, que garantizan la máxima calidad y productividad con este tipo de sistemas.

#### **2.1.4 SISTEMAS DE COMBUSTIÓN**

La tecnología de los sistemas de combustión para hornos, oscila desde los más sencillos hasta los más complejos con sistema de control que maneja la variabilidad y perfiles de temperatura que pueden requerirse a través del sistema. Los sistemas de combustión más sencillos consisten en la quema de leña, carbón, aserrín, cascarilla de diversas plantas, en hogares parecidos a los fogones típicos de nuestra región, con abundante material inquemado y generación de altos volúmenes de gases de color negro, propios del alto contenido de carbón como combustible no quemado y monóxido de carbono en los productos de la combustión, gases causantes del llamado efecto invernadero, problema ambiental de primer orden en la actualidad, además si no existe el precalentamiento del material combustible de tipo leña, los altos contenidos de humedad afectan la eficiencia del proceso de combustión. La figura 7 muestra la quema de cascarilla de arroz pre secada para mejorar la eficiencia de la combustión.

En la figura 7 se observa la necesidad de un operario dedicado a alimentar de combustible a las bocas del horno. Este trabajo debe realizarse de manera continua y manual con ayuda de palas, hasta finalizar la quema, un proceso que puede durar entre dos y cinco días, lo cual pone en riesgo la salud de los trabajadores, además expuestos a la inhalación de gases de combustión bastante tóxicos.

Figura 7. Hogar para quemado tradicional de combustible sólido tipo cascarilla de arroz.



Fuente: autores.

Para quemar, carbón pulverizado, gas natural o a.c.p.m de una manera más eficiente respecto a la quema de leña y similares, se utilizan los equipos quemadores como el mostrado en la figura 8. Este tipo de equipos vienen con controlador y ajustes de la potencia calórica. El mostrado en la figura 8, es de 450.000 Btu/h y posee controles de seguridad por baja y alta presión. También

ajuste automático de la relación aire / combustible para mantener un exceso de aire menor o igual al 10 % sobre el valor este, lo que garantiza máxima vida útil y minimización de problemas de mantenimiento derivados de posibles depósitos de carbonilla que disminuyen la eficiencia del quemador y en ciertas condiciones operativas extremas podrían provocar peligrosas explosiones.

Figura 8. Equipo quemador de gas natural



Fuente: autores.

Existen además quemadores de doble combustible, que pueden operar con gas natural y a.c.p.m.

### **2.1.5 SISTEMA DE AISLAMIENTO TÉRMICO**

Los hornos se construyen básicamente con ladrillos de arcilla (ladrillo no quemado) o de ladrillos refractarios (ladrillos quemados en horno). Los primeros son más baratos y se utilizan cuando las construcciones son temporales o para usar en el sistema de sellado que debe ser montado y desmontado con cada quema que se

realice. Para hornos permanentes, el material base del cuerpo del horno es ladrillo rojo refractario y los sellos y recubrimientos exteriores podrían ser de ladrillo de arcilla para abaratar la construcción. Para el ingeniero es de sumo interés el valor de la conductividad térmica  $K$  de los materiales usados como aislamiento. Para el caso de ladrillo rojo refractario del tipo 2 huecos y sección transversal de 20 x 9 cm, el valor de  $K$  es de 0,7 W/m-°C (1). Para el caso de ladrillo de arcilla el valor de  $K$  es de 1,14 w/m-°C (4).

### **2.1.6 BALANCE CALORICO DEL HORNO.**

El horno actual cuando es utilizado sigue la siguiente secuencia de operaciones:

1. Se limpia de residuos de cargas anteriores.
2. Se limpian las cámaras de combustión del horno.
3. Se carga con ladrillos de arcilla previamente secado del contenido físico de agua. Sea porque son expuestos al sol o porque se utiliza una cámara de pre secado que utiliza aire caliente para este propósito.
4. Después de cargado, el horno es sellado con ladrillos en las paredes laterales. La cúpula se semisella con la misma carga de ladrillos y el sellado no es completo porque deben dejarse los espacios por donde se necesita que circulen los gases productos de la combustión que fluyen a alta temperatura.
5. Se procede a iniciar la quema de la madera para generar los gases caliente que causaran el cocido de los ladrillos de arcilla y lo llevaran a ser ladrillos refractarios.
6. Se continúa con la quema de madera dos días continuos (día y noche).
7. Se suspende la quema y se inicia el periodo de enfriamiento que toma dos días.



8. Se realiza el desmonte de los sellos y se extrae la carga de ladrillos refractarios fabricados.

Puede verse que son operaciones por lote y el análisis no es de flujo para el material quemado el ladrillo refractario, por lo que se utiliza el concepto de sistema y no de volumen de control. Se tiene entonces un sistema cerrado que no produce trabajo, pero que admite los flujos de energía térmica.

La ecuación 1, muestra el balance general de energía a utilizar.

$$E_{en} + E_g - E_s - E_c = E_a \quad \text{Ecuación 1}$$

El análisis que se plantea a continuación, supone que el horno está operando en estado estacionario y los procesos evolutivos en el tiempo no existen. Por lo cual no existe acumulación positiva o negativa de energía. Para un horno real de tipo artesanal sin control de temperatura, evidentemente estos supuestos no se cumplen estrictamente, pero para un horno con rampa de calentamiento (transitorio) y un tiempo de estabilidad, si puede esperarse que sean válidas las anteriores suposiciones, exceptuando el transitorio, que deberá estimarse con otro modelo, para calcular la duración temporal del mismo (el tiempo en estado transitorio).

La ecuación de balance energético o de potencia energética (incluye el tiempo), es:

$$Q_c = Q_L + Q_g + Q_h + Q_H \quad \text{Ecuación 2}$$

$$Q_c = M \times P_{ci} \quad \text{Ecuación 3}$$

$M$  = Es la masa que se quema (balance energético) o es el flujo másico si el balance es de potencia.

$QL$  = Calor o potencia calórica de tipo sensible, que debe aplicarse sobre los ladrillos a quemar, cuando se llevan desde la temperatura inicial (mínima de 30°C), hasta la temperatura de quemado promedio, de 1000 °C. Se aclara que el proceso de combustión debe generar temperaturas mayores, de alrededor de 1500 °C, de tal manera que los gases puedan quedar con energía calórica residual, que pueda movilizar los gases de combustión al interior del horno, contactando la carga de ladrillos y a través del conducto de la chimenea para ser expulsados a la atmósfera.

$$QL = mL \times CpL \times (T_{conocido} - T_{ambiente}) \quad \text{Ecuación 4.}$$

Conociendo los siguientes datos:

$CpL$  = Capacidad calórica de ladrillos, con valor de 200 a 250 Cal / Kg-°K (3) y 1 cal = 4.1868 J.

$T_{conocido}$  = Temperatura en escala absoluta de ladrillo cocido, se estima en 1000°C, como valor promedio, por experiencias del sector.

$T_{ambiente}$  = Temperatura ambiente en escala absoluta.

### 3 DESARROLLO DEL DISEÑO DEL HORNO

Hablar de diseño de un horno, es un asunto complejo. En este proyecto, por diseño se entiende la definición de la configuración geométrica y física del horno y lo

referente al diseño que implica los procesos de transferencia de calor, que definen la eficiencia energética esperada del sistema.

Las fases de diseño que se siguen son:

- 3.1 Descripción de necesidad y definición de requerimientos.
- 3.2 Diseño conceptual y básico.
- 3.3 Diseño de detalle

### **3.1 DESCRIPCION DE LAS NECESIDADES PRODUCTIVAS**

Actualmente se maneja una producción mensual de 16000 ladrillos, que se consigue de manera artesanal, con cuatro quemas mensuales de 4000 ladrillos / quema, con una duración unitaria promedio de 7 días. Del total mensual se comercializan en promedio 12.000 ladrillos y se pierde el 20 % por problemas de calidad final, del cual una parte se revenden como ladrillos de segunda a un precio inferior al estándar. Sin embargo los pedidos oscilan alrededor de las 40.000 unidades / mes, dato promediado de lo requerido por los clientes en los últimos 8 meses. Lo cual requiere mejorar la capacidad productiva en un 300% (triplicar la actual capacidad). Además con el método artesanal de moldes manuales, solo se pueden fabricar ladrillos sólidos y ladrillos huecos de dos agujeros circulares como muestra la figura 9. Los nuevos mercados piden ladrillos huecos menos pesados y con mejor capacidad de aislamiento térmico y acústico. Para resolver la necesidad de fabricar nuevos ladrillos huecos de diversas formas y tamaños como muestra la figura 10, los accionistas están en proceso de mecanizar el proceso de fabricar los ladrillos húmedos, para lo cual están en el proceso de diseñar y fabricar una extrusora tipo pistón o tipo tornillo, como la que muestra esquemáticamente la figura 11.

Figura 9. Ladrillos tradicionales y con nueva geometría y tamaños.



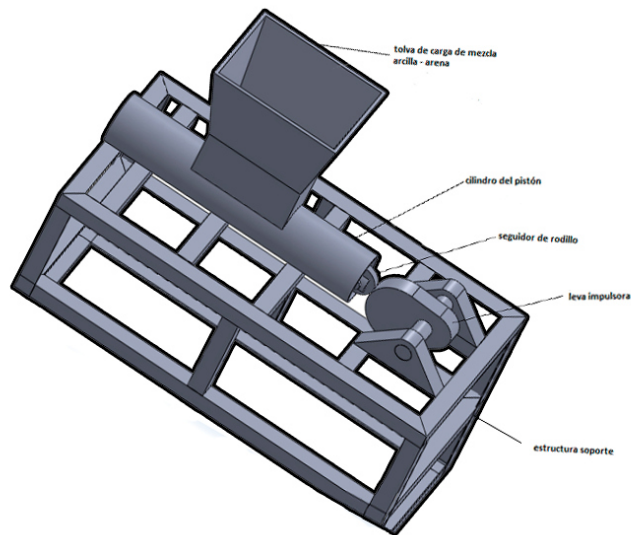
Fuente: autores.

Figura 10. Diseño propio de la empresa para futuros ladrillos huecos.



Fuente: autores.

Figura 11. Esquema de la máquina extrusora para mecanizar la fabricación de ladrillos húmedos.



Fuente: autores.

Además, es necesario mejorar la velocidad y calidad del proceso de quemado de los ladrillos. Para resolver esta necesidad es que debe diseñarse un nuevo horno, capaz de mejorar la calidad y cantidad de los productos a fabricar que además ahora son de diversos tamaños y configuraciones, con lo que se espera la empresa solidifique su participación en el mercado de ladrillos. A continuación se presentan los requerimientos del horno a diseñar.

### 3.1.1 REQUERIMIENTOS DEL NUEVO HORNO DE COCCION

Se requiere del diseño del nuevo horno, que sea capaz de quemar 6000 ladrillos / quema, realizando de cinco a seis quemas mensuales, con una duración promedio

de cuatro días, para tener una capacidad de producción estándar entre 30.000 y 36.0000 ladrillos mensuales para los tamaños mayores, aunque se tengan diferentes configuraciones geométricas. Si se controla a un 6 % de defectuosos, se tendrán una cantidad neta de venta como ladrillos de primera calidad entre 28.000 y 35.000 ladrillos. Con esta producción, se espera cubrir el promedio de demanda, respondiendo a periodos de alta, de media y de baja demanda, propios de un año de trabajo.

### **3.1.1.1 CRITERIOS PARA EL DISEÑO GEOMETRICO.**

Los siguientes criterios definen restricciones a respetar en el diseño, dada la experiencia de diseños anteriores que han resultado eficientes y han mejorado el desempeño de los hornos.

- a. Forma de cubo. Según experiencias por simulación y mediciones experimentales, se ha encontrado que esta figura es la que garantiza mayor uniformidad de las temperaturas de punto a punto al interior del horno (4).
- b. Se garantiza que la llama solo tiene un cambio en ángulo recto. Se sabe que esto ocasiona calentamiento irregular (5).
- c. Se utilizará 1 m<sup>2</sup> de área de combustión por cada 6 m<sup>2</sup> de área de piso. Con esto se garantiza un apropiado tiro natural en la chimenea.
- d. El diámetro equivalente de la chimenea estará entre 1/4 y 1/5 del diámetro equivalente de la cámara de cocción.
- e. El horno será internamente de tiro descendente por lo que por cada metro interno de altura, la chimenea tendrá 3 metros de alto. Con esto se asegura una altura que garantiza permanencia de gases calientes internamente sin causar mucho quemado y uniformar al máximo las temperaturas internas. Esto favorece la calidad del producto y protege a la estructura del horno de los peligrosos choques térmicos y gradientes de temperatura.

- f. El material de construcción a utilizar será una combinación de ladrillos sólidos para los cimientos, los pisos y partes del horno con carga y de ladrillos huecos para la parte de aislamiento térmico. Esto garantiza facilidad y seguridad en la construcción, con presupuesto minimizado, según experiencias de especialistas del área (6). El material para pegar los ladrillos será el concrax o concreto refractario.
- g. Se dejara un espacio adicional para la cámara de combustión y para regular la altura de la chimenea. Esto es necesario en el momento de poner a punto el horno real, el cual al ajustar la uniformidad de las temperaturas internas, deberá tener la posibilidad de las mencionadas opciones.

Para alcanzar la producción esperada, la operación debe ser al menos discontinua, para tener un tamaño minimizado del horno (la tecnología continua de tipo lineal requiere al menos 200 metros en línea recta). Por lo tanto se estima un grupo de cámaras, que se han establecido en tres cubículos separados, con capacidad de 2000 ladrillos cada una o cuatro cámaras con capacidad de 1500 ladrillos cada una, para una capacidad total de 6000 ladrillos por quema. El área disponible para instalar el sistema es cuadrada con lados de 10 metros, para definir un área total de 100 metros cuadrados. Los ladrillos más grandes tienen medidas externas de 20 centímetros de ancho, por 9 de alto, por 30 de largo, para totalizar un volumen por ladrillo máximo de 5400 c.c. El volumen de cada cámara (todas son iguales), para el caso de tres cámaras, el valor de los lados en centímetros es de 223 por 225 por 317 centímetros de alto, para un volumen total de 15.905.475 c.c. al dividir el volumen de la cámara entre el volumen unitario por ladrillo de tamaño máximo, se tiene un valor de 2900, que sería el número máximo de ladrillos a cargar, sin espacio entre los mismos. La diferencia de 900 ladrillos, es necesaria para dejar el espaciado necesario entre hileras de ladrillo, para que los gases calientes de secado o de la quema puedan entrar en contacto lo más uniforme posible con cada uno de los ladrillos de la carga. Se espera una temperatura promedio de 800 a 900 °C, con

una máxima de 1000 °C. El tiempo esperado de quema completa más largo se espera sea de 25 horas, con lo cual puede tenerse una holgura de 72 horas para los procesos de enfriamiento, descargue y nuevo cargado, controlado en la situación más crítica posible de imaginar, como en temporada de lluvias, con un ciclo de quema de cuatro días en promedio.

### **3.2 DISEÑO CONCEPTUAL Y BASICO DEL SISTEMA DE HORNOS DE SECADO Y QUEMADO DE LADRILLOS REFRACTARIOS.**

Las opciones factibles de implementar para el horno, sería para los dos casos más sencillos de concebir, uno un sistema de tres cámaras separadas u otro de cuatro cámaras separadas. Lo mínimo serían tres cámaras, para en un mismo momento poder tener en una un proceso de secado, en otra uno de quemado y en otra uno de enfriamiento. Los procesos de cargue y descargue deben intercalarse para no afectar el flujo de producción. La opción más sencilla próxima, es la de tener cuatro cámaras, donde se tendrán los tres procesos mencionados, más una cámara disponible para manejar el cargue o descargue y para propósitos de facilitar el mantenimiento de alguna cámara que tenga problemas (sistema con capacidad de redundancia). El horno de cuatro cámaras sería más costoso y el de tres cámaras podrían manejar con menor producción el problema de no disponibilidad de alguna cámara.

Las figuras 12 y 13 muestran el concepto para el caso de horno de cuatro cámaras y horno de tres cámaras respectivamente.

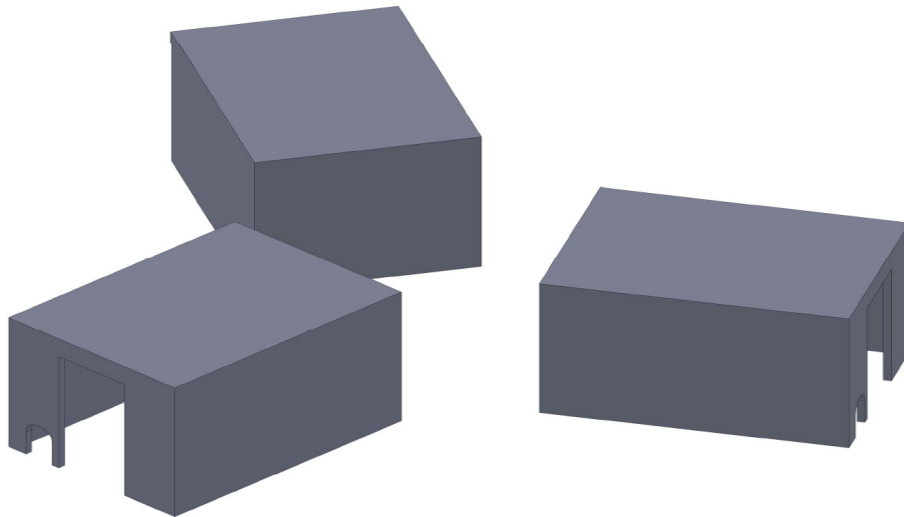
Figura 12. Concepto de horno de cuatro cámaras.





Fuente: Moreno, Franco. EL LADRILLO EN LA CONSTRUCCIÓN. España. Ediciones CEAC. 1981.

Figura 13. Concepto de horno con tres cámaras.



Fuente: autores.

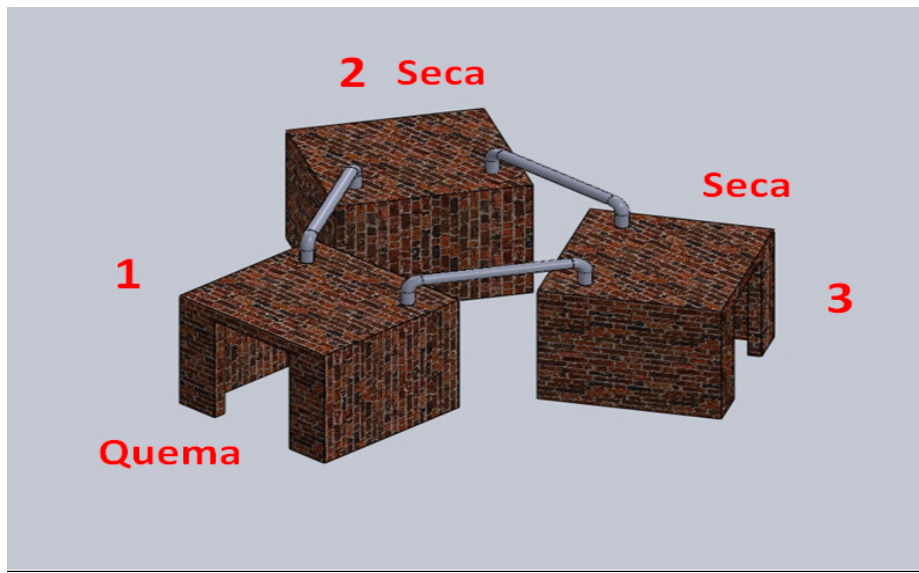
Para el diseño propuesto en este proyecto, se implementarán tres hornos del mismo tamaño para el proceso de fabricar los ladrillos, con capacidad individual para

producir 2000 unidades diarias por cada cámara. Se consideran tres hornos separados, conectados por ductos con compuertas (dámper) para regular los flujos entre ellos, según se requiera para el control de las operaciones del proceso (cargue, secado, quema, enfriamiento y descargue).

El sistema de hornos para manejar los procesos de cargue, secado, cocción, enfriamiento y descargue se visualiza en la figura 13 de la siguiente manera:

- a. Al inicio las tres cámaras están vacías y se carga la número 1. En la tarde del primer día, se inicia el secado y cocción de la cámara 1, mientras tanto La número 2 y la número 3 se cargan por la tarde del primer día. La carga puede realizarse simultáneamente cuando se necesite y tomaría un día en total para las tres cámaras.
- b. Dado que la cocción dura 24 horas y el enfriamiento 24 horas, se tendrá a partir de las 2 de la tarde del tercer día los primeros 2000 ladrillos quemados, los cuales toman unas cuatro horas para el descargue. Como al segundo día, a las 2 de la tarde se inicia el secado de la cámara 2 con el calor de la cámara 1, se tendrá que al cuarto día, estarán listos 2000 ladrillos más. Si con la cámara 3 se realiza lo mismo que con la 2, se tendrá al quinto día 2000 ladrillos más y se puede repetir el ciclo, esto quiere decir que a partir del día tres se puede tener por día de manera sucesiva 2000 ladrillos durante 27 días al mes, lo que totaliza 54.000 ladrillos /mes. Entonces, el sistema montado puede montarse para tener en promedio 40.000 ladrillos / mes y tener algunos días de holgura para resolver problemas de mantenimiento y de ajuste, no solo para los hornos, además también servirán para liberar tiempo de mantenimiento al sistema de la máquina extrusora de ladrillos húmedos. La figura 15, complementa lo iniciado en la figura 14.

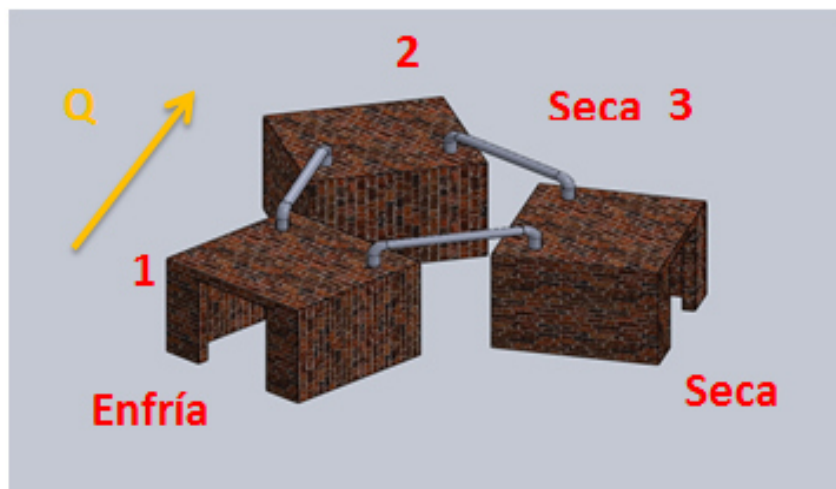
Figura 14. Configuración de los tres hornos para control de las operaciones.



Fuente: autores.

Debe quedar claro, que el manejo de las compuertas entre las diversas cámaras, se indicará por medio de un diagrama y entrenamiento al personal operativo y de mantenimiento.

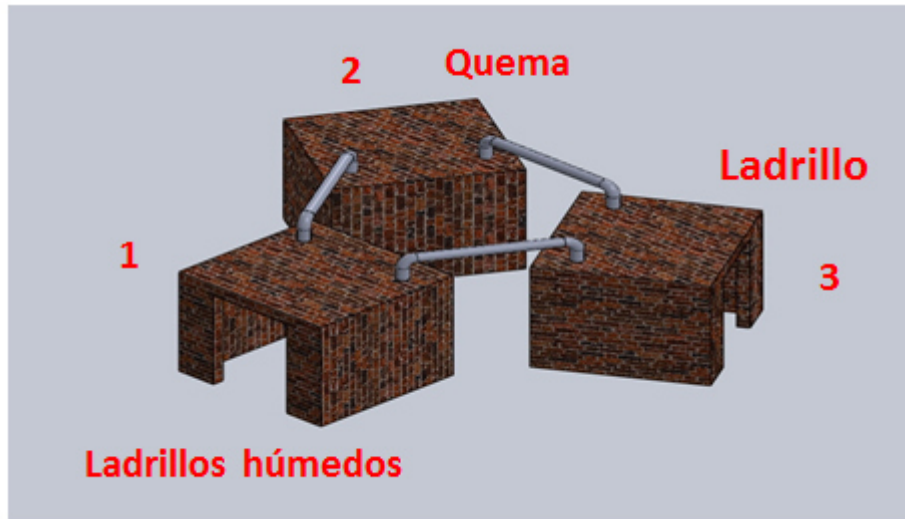
Figura 15. Proceso de secado con calor de la camara1, de la cámara 2 y la 3.



Fuente: autores.

Las figura 16 y 17, muestra los estados de las diversas cámaras para completar el ciclo en los tres hornos secuencialmente.

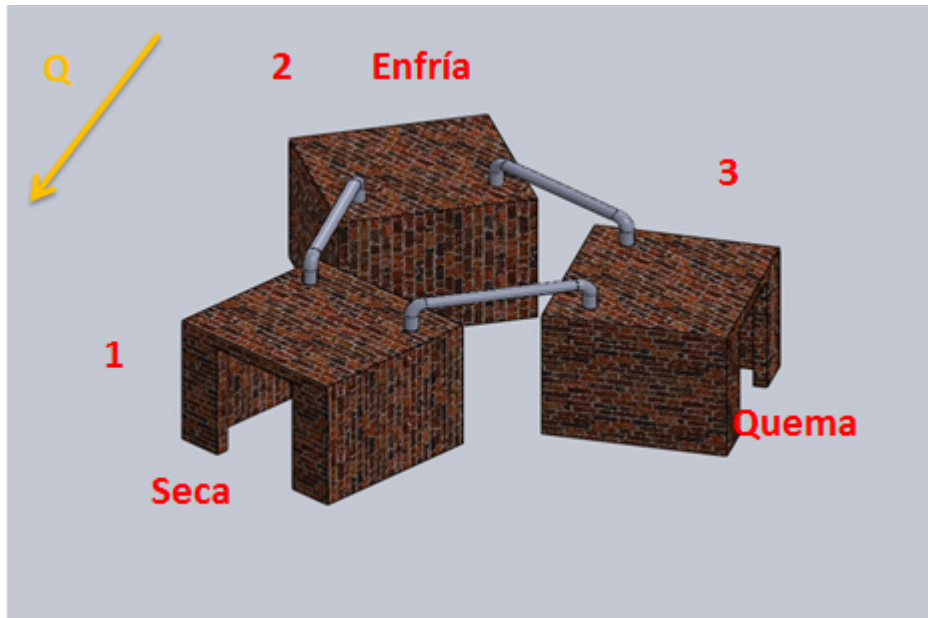
Figura 16. Cámara 2 en quema.



Fuente: autores.

El aprovechar los calores normalmente perdidos, se requiere para aumentar la eficiencia energética del sistema y ahorrar no solo combustible y dinero correspondiente, sino que además se disminuye la masa de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera y maximiza la capacidad productiva. Una vez quemados los ladrillos del horno 2, se procede a quemar los ladrillos del horno número 3 y empieza el proceso de enfriamiento del horno 2 cediendo calor a los ladrillos del horno 1 que serán secados.

Figura 17. Cámara 3 en quema.

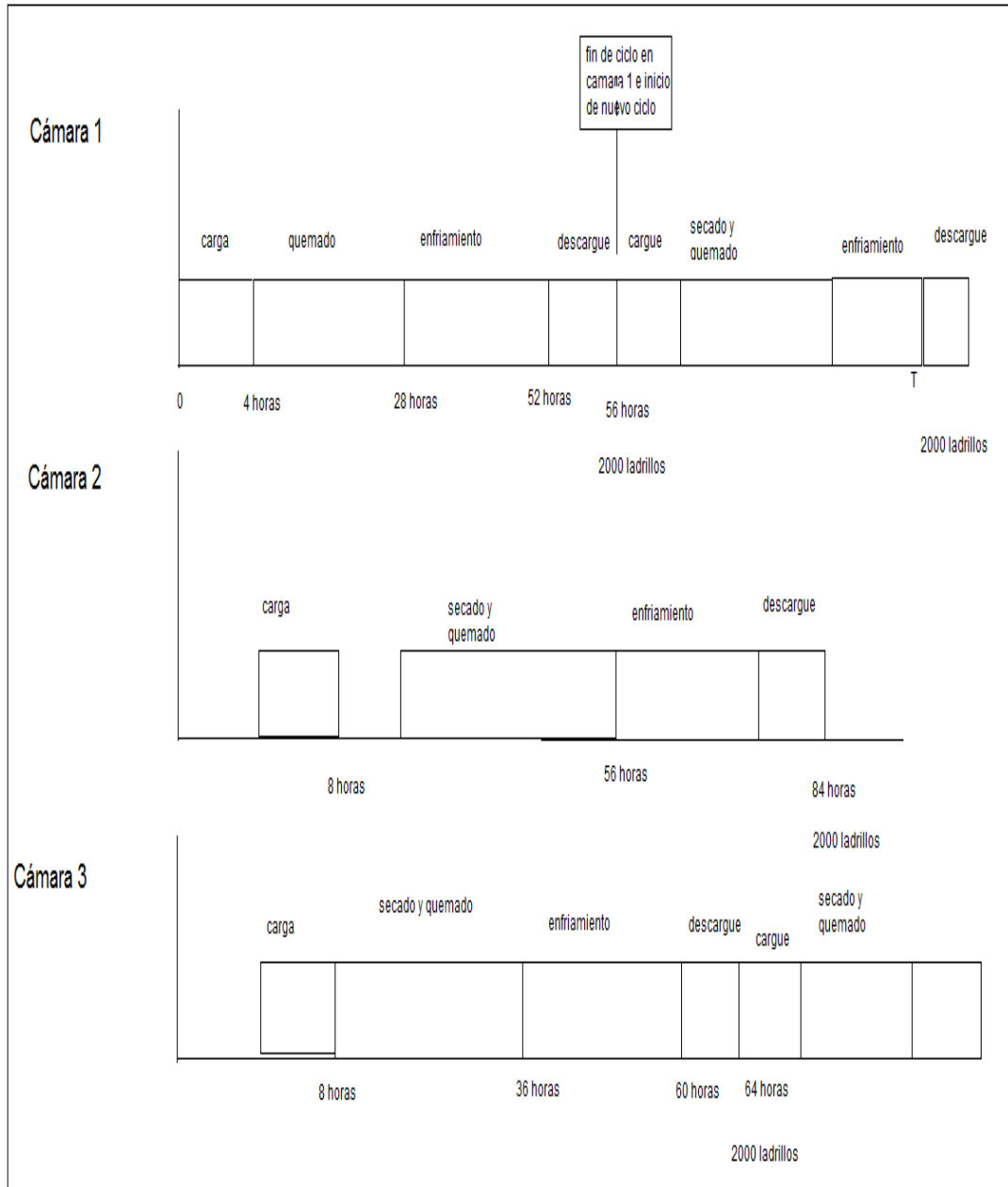


Fuente: autores.

La figura 18, muestra el diagrama de tiempo según operaciones, que permite entender el proceso de flujo productivo de los 2000 ladrillos / día de manera continua a partir del tercer día de inicio de las operaciones. En este diagrama, los tiempos de cada proceso se cuenta siempre tomando como referencia el momento de inicio en el eje horizontal de tiempos.

Del diagrama de la figura 18, puede verse que a partir de 56 horas desde el inicio, se tienen los primeros 200 ladrillos (tercer día por la tarde). A partir de este momento, se tiene un flujo de 2000 ladrillos por día, de manera sucesiva. Lo importante de resaltar es que el proceso desecado y quemado, se realiza desde que entra a trabajar las cámaras 2 y 3, utilizando gases de escape de la cámara en secado, con lo cual se mejora la eficiencia energética, al utilizar calores que de otra manera serían perdidos al medio ambiente, con lo cual también se reduce la cantidad de combustible quemado y la correspondiente reducción de emisiones tóxicas y contaminantes al medio ambiente.

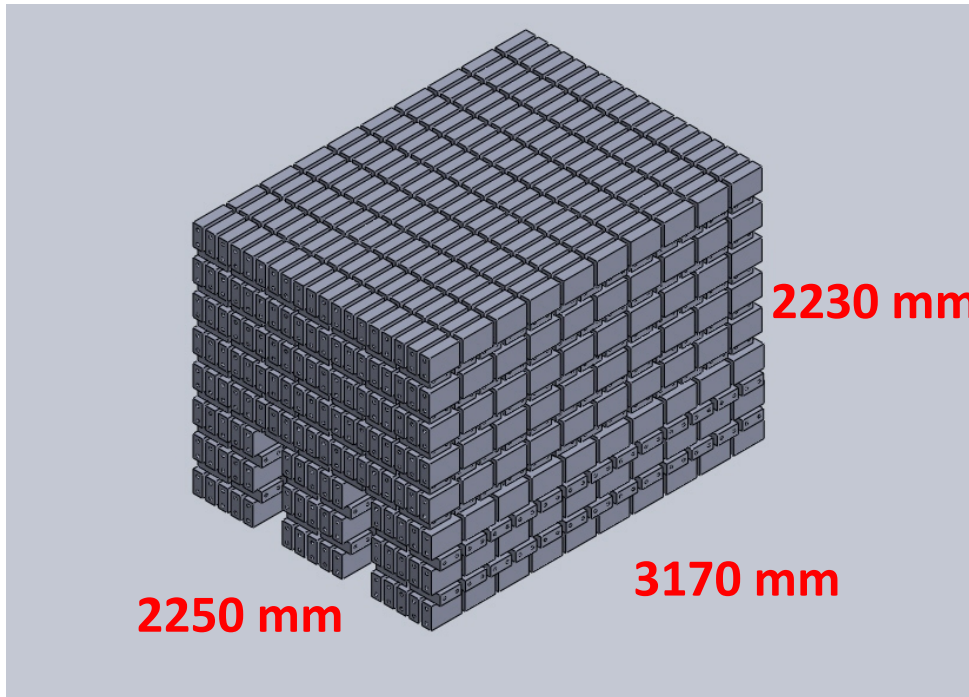
Figura 18. Diagrama de temporización de las operaciones de los tres hornos.



Fuente: autores.

La figura 19, presenta el esquema de las dimensiones fijadas para el horno internamente, con tolerancia de 20 centímetros. Los valores obedecen al intento de aprovechar al máximo el área disponible y reducir los costos de construcción para una capacidad de 2000 ladrillos por cámara.

Figura 19. Medidas internas de cada horno para albergar 2000 ladrillos, con tolerancia dimensional de 200 milímetros.



Fuente: autores.

### 3.3 DISEÑO DE DETALLE DEL HORNO

#### 3.3.1 CALCULOS TERMICOS DEL HORNO.

- Material para cimientos.

Perímetro del cimientos = 11.4 mts

Volumen del cimiento=  $11.4 \times 0.5 \times 0.5 = 2.85M^2$  .

Volumen de la piedra=  $3M^3$

Material total cimientos es de 9 m<sup>3</sup> de piedra. 3 m<sup>3</sup> de agregado y 4 bolsas de cemento.

- Ladrillos para las paredes.

Los ladrillos se colocan acostados y tienen medidas de 9x20x30 (alto x ancho x largo) en centímetros. Área de ladrillos para pared de 9 x 30 que equivalen a 0.27 m<sup>2</sup>.

Área de paredes 78.66 M<sup>2</sup> para las tres cámaras.

300 ladrillos adicionales por ser paredes doble El cálculo térmico mostrado, se realiza por horno y se totaliza según el esquema operacional a utilizar.

### 3.3.1.1 BALANCE DE CALOR Y POTENCIA PARA LA CAMARA 1.

El balance de calor para la cámara que se enciende de primero (cámara 1), es:

- El calor necesario para llevar los 2000 ladrillos (quema), desde la temperatura ambiente hasta la temperatura promedio de 1000 °C, simbolizado con Q1,

$$Q1 = 200 \left( \frac{\text{ladrillos}}{\text{quema}} \right) \times 8.5 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{ladrillo}} \right) \times 0.25 \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{K}} \right) \times (1273 - 300)^\circ\text{K}$$

$$= 4.547.500 \text{ Kcalorias} = 19.039.473 \frac{\text{Kj}}{\text{quema}}$$

Para llevar este valor a potencia calórica se divide el cálculo entre 24 horas y se tiene  $799.311 \frac{\text{Kj}}{\text{Hr}}$  que equivalen a una potencia calórica de  $757.00 \frac{\text{Btu}}{\text{Hr}}$

- El calor necesario para eliminar la humedad de los 2000 ladrillos, con contenido unitario de un kilo de agua por ladrillo, con calor latente de vaporización del agua de  $540 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$ . Simbolizado con Q2 es:

$$Q2 = 2000 \text{ Kg} \times (70 + 540) = 1.220.200 \text{ Kcal}$$



Esto equivale a  $5.107.896 \frac{KJ}{quemada}$  Para llevar este valor a potencia calórica se divide el cálculo entre 24 horas y se tiene  $212.829 \frac{Kj}{Hr}$  que equivalen a una potencia calórica de  $202.000 \frac{Btu}{Hr}$

- El calor necesario para compensar las pérdidas por transmisión de calor desde el interior hacia los alrededores, simbolizado con Q3, es:

$$Q3 = Q \text{ de paredes} + Q \text{ techo} + Q \text{ piso} \quad \text{Ecuación 5}$$

El calor por paredes y techo combina los modos de transferencia de calor por convección en la parte interna, conducción a través de superficies sólidas y Convección en la pared parte externa, por lo cual se calcula un coeficiente total de transferencia. Para el caso del piso, solo existe convección del lado interno y conducción al suelo de soporte del horno. Para el caso del cubículo del horno, para minimizar las perdidas por transferencia de calor, se acostumbra utilizar materiales con buen aislamiento térmico.

Para el caso del cálculo del coeficiente conectivo interno  $h_1$ , se tienen las relaciones mostradas en la tabla 1. En este proyecto se utiliza conservativamente, el valor de  $1,5378 \times 10^{-2} \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ K}^{-1} = 7 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

Correlación	$h_2 (\text{cal cm}^2 \text{ min}^2 \text{ K}^{-1})$
$h_1 = 0.61 \phi C_p G_0 (Pr_g)^{\frac{2}{3}} Re^{0.41}$	$3.2668 \times 10^{-3}$
$\frac{h_1 H}{k} = 0.888 Ra^{0.5}$	$1.5378 \times 10^{-2}$

$\frac{h_1 d_f}{k} \left( \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) Pr^{\frac{1}{3}} = 0.5 \left( \frac{1}{1-\varepsilon} \right)^{\frac{1}{3}} Re^{\frac{1}{2}} + 0.2 \left( \frac{1}{1-\varepsilon} \right)^{\frac{2}{3}} Re^{\frac{2}{3}}$	$4.9023 \times 10^{-4}$
---	-------------------------

Tabla 1. Diversas correlaciones para estimar H en paredes verticales con flujo interno.

Fuente: autores

Para estimar el coeficiente convectivo externo  $h_2$ , se tiene la siguiente correlación experimental.

$$Nu = \frac{h_2 L}{k} = 0.825 + 0.387 Ra_L \frac{1}{16} \left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Valido para

$$10_{-1} < Ra_L < 10_{12}$$

Aplicando valores, considerando velocidad promedio del viento en la zona de 10 m/s (conservativamente), con temperatura promedio de 30 °C, el cálculo aplicando la ecuación 6, resulta en un valor de 0.00024 cal cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, para las paredes verticales.

El coeficiente global (total) de las paredes  $h_p$ , se calcula con la siguiente ecuación.

$$h_p = \left( \frac{1}{h_1} + \frac{W_{\text{espesor}}}{k_{\text{pared}}} + \frac{1}{h_2} \right)^{-1} \quad \text{Ecuación 7}$$

El espesor de pared es de 40 centímetros.

El resultado es.

$$H_p = \left( \frac{1}{0.015} + \frac{40}{0.989} + \frac{1}{0.0024} \right) - 1 = 0.00234 \text{ cal} / \text{min} \times \text{cm}^\circ\text{K}$$

Que equivalen a 1,61 w /m<sup>2</sup>\*°C.

El coeficiente global para el domo (techo) hp2, se calcula con la siguiente ecuación.

$$h_{p2} = \left( \frac{1}{h_1} + \frac{E_{\text{espesor}}}{k_{\text{tierra}}} + \frac{1}{h_3} \right)^{-1} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde el Espesor, es el espesor de la capa de tierra (3-10 cm).

$k_{\text{tierra}}$  =Conductividad calorífica de la tierra seca =0.91 W / m K

$H_3$  =Coeficiente convectivo lado externo superficie esférica horizontal del domo. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$Nu = \frac{h_3 L}{k} = 0.27(GrLPr)^{0.25} \quad \text{Ecuación 9}$$

Procediendo con el techo de manera similar a las paredes se tiene que h3 posee un valor redondeado de 0.058 cal / min\*cm<sup>2</sup>\*°K, que equivale a 40 w /m<sup>2</sup>\*°C.

El coeficiente convectivo global del techo, aplicando la ecuación 8, resulta:

$$h_{\text{techo}} = \left( \frac{1}{0.015} + \frac{20}{0.989} + \frac{1}{0.058} \right)^{-1} = 0.00386 \frac{\text{cal}}{\text{min} \times \text{cm}^2 \times \text{K}}, \quad \text{que}$$

equivalen a 2.66 w/m<sup>2</sup> °C

$Q_3 = 1.61 * 2(2.23 * 2.25 + 2.23 * 17) * (1000 - 30) + 2.66 * 2.25 * 3.17 * (1000 - 30)37.75 + 18.4 = 18.4 = 56.14 \text{kw}$  De calor fugado por la paredes y el techo. Esto equivale a  $202.100 \frac{\text{KJ}}{\text{hr}}$  Esto equivale a  $191.564 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$ .

Los valores de transferencia de calor desde el interior hacia el lado externo, antes estimados se confrontan con valores calculados, basados en información experimental de hornos similares, como muestra la figura 20.

Se esperan temperaturas de 80 °C, dado que las medidas en el actual horno artesanal llegan a 90 °C, con espesor de pared de 30 centímetros. Con esto se espera una tasa de pérdida de calor  $900 \text{ w/m}^2$ . El área de pared es:

$$2 * (2.5 * 2.3 + 3.2 * 2.3) = 26.22 \text{ m}^2.$$

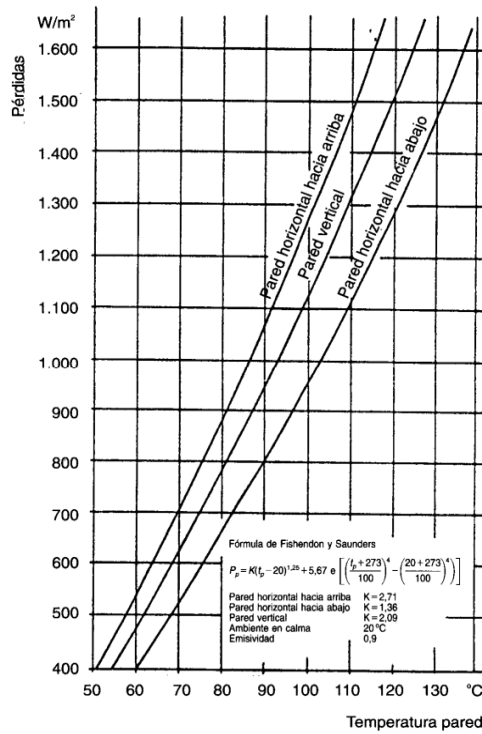
La pérdida por paredes se espera sea de 23.5Kw, que comparado con el estimado por cálculos por 0ed56 de coeficientes convectivo, con valor de 36 Kw, define que de manera conservativa, este sea el valor a utilizar. Usando el método de conductividad equivalente, tomando

$3.000 * 26.22 * 24 = 1.887.840 \text{ Kilocalorías}$ , se tiene que la pérdida de calor por las paredes es de  $3.000 \text{ kcal/m}^2 - \text{hr}$  Kilocalorías.

La tasa en 24 horas es de 7.866 Kcal/ hr que equivalen 9.13 Kw, por lo definitivamente se utilizará el valor máximo obtenido. La diferencia podría explicarse porque con el método de cociente convectivo se consideran en lo posible todas las características particulares del sistema en su estado operativo más crítico.

Para el caso del piso, la pérdida de calor se asume despreciable dada la barrera térmica del lecho o piso del horno, con espesor mínimo de 1 metro. Además que para el ajuste final se utiliza un factor de seguridad.

Figura 20. Diagrama de pérdidas totales para paredes de espesor 40 centímetros, incluyendo todos los modos de transferencia de calor.



Fuente: Norma Mexicana. NMX-C-006-1976. México. Secretaría de Comercio Y Fomento Industrial. 1976.

- Calor necesario para calentar la parrilla y los deflectores de acero bajo carbono, lamina negra de 1/16 pulgadas de espesor. Simbolizado como Q<sub>4</sub>, es:

$$Q_4 = 400 \text{ kilos} * 0.25 \frac{\text{Kcal}}{\text{kilo}} * (1000 - 30) = 97.000$$

$$Q_4 = \frac{97000}{24 \text{ horas}} = 4041 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

Arroja un valor de 4041 Kcal / hr, que equivalen a 16038 Btu / hr.

El calor total necesario para calentar y quemar los ladrillos, más el de las fugas por transferencia de calor, medido como tasa es de 799311 + 212.829 + 202.140 + 16038 = 1.230.280 Kj / hr que equivalen a 1.166.000 Btu / hr.

### 3.3.1.2 BALANCE DE CALOR Y POTENCIA PARA LAS CAMARAS 2 Y 3.

Para el caso de las cámaras 2 y 3, se anota que se recupera calor de los gases de escape de la cámara 1 durante el proceso de quemado en la misma. Asumiendo conservativamente una temperatura promedio de estos gases en 450 °C (valor mínimo medido experimentalmente en el actual horno, quemando leña).

$$\begin{aligned} \text{➤ } Q_1 &= 2000 \frac{\text{ladrillos}}{\text{quemado}} \times \left( 8,5 \frac{\text{kg}}{\text{ladrillo}} \times \frac{0,25 \text{kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{K}} \times (1273 - 723) \right) = \\ & 2.337500 \text{ Kcaloria} \end{aligned}$$

$$Q_1 = \frac{9.775.425 \frac{\text{Kj}}{\text{quemado}}}{24 \text{ horas}} = 407.309 \frac{\text{Kj}}{\text{h}} \quad \text{Equivalen a una potencia calórica de } 386.075 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}.$$

$$\text{➤ } Q_2 = 0.$$

Dado que para causar la evaporación a presión atmosférica la temperatura es de 100 °C y los gases de recuperación entran al menos a 450 °C, con lo que no es necesario suministrar calor externo para este factor.

$$\begin{aligned} \text{➤ } Q_3 &= 1,61 \times 2 \times (2,23 \times 2,25 + 2,23 \times 3,17) \times (1000 - 30) + \\ & (2,66 \times 2,25 \times 3,17) \times (1000 - 30) = 37,75 \\ Q_3 &= 37,75 + 18,4 = 56,15 \text{ Kw} \end{aligned}$$

Este es calor fugado por las paredes y el techo que equivale a  $191,564 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$

Para el caso del piso, se asume despreciable dada la barrera térmica del lecho o piso del horno, con espesor mínimo de 1 metro.

➤ Calor necesario para calentar la parrilla y los deflectores. Simbolizado como  $Q_4$ , es:

$$Q_4 = 400 \text{ kilos} \times 0,25 \frac{\text{kcal}}{\text{kilo}} \text{ } ^\circ\text{C} \times (1000 - 30) \text{ } ^\circ\text{C} = 97.000 \text{ Kcal.}$$

$$Q_4 = \frac{97.000 \text{ kcal}}{24 \text{ hr}} = 16038 \frac{\text{Btu}}{\text{Hr}}$$

El calor total necesario para calentar y quemar los ladrillos, más el de las fugas por transferencia de calor, medido como tasa para la cámaras 2 y 3 es de:

$$Q_T = 386.075 + 202.140 + 16038 = 604.213 \frac{Kj}{Hr} \text{ Igual a } 573.000 \frac{Btu}{hr}$$

### 3.4 SELECCIÓN DE QUEMADORES DE GAS PARA COMBUSTION

El montaje de los quemadores es móvil de tal manera que unos mismos quemadores puedan utilizarse en los tres hornos según se requiera. Las opciones d energético primario son: carbón natural, leña, aserrín, gas natural. La decisión de operar con gas natural es de tipo ambiental y económica, a favor de este combustible, cuando el mismo está disponible en el sitio de trabajo, esto es una realidad en la zona de las instalaciones del horno.

La cámara más crítica es la 1, dado que es la de mayor valor calórico requerido para el inicio de las operaciones, al no poder utilizar calores perdidos. El valor calórico necesario calculado es de 1.166.000 Btu/hr. Con la utilización de quemadores de 450.000 Btu/hr, el número mínimo necesario sería de 3 quemadores. Para utilizar cuatro quemadores, la potencia mínima de los mismos debe ser de 291.5000 Btu/hr. Por lo tanto se seleccionan cuatro quemadores de 400.000 Btu/hr para la cámara 1. Con esto se ataca el cubículo de quemado, con cuatro frentes de llama simétricos, que homogeniza al máximo la temperatura interna del horno (requisito para tener calidad de los productos finales o ladrillos) y se controla más fácil la operación de los quemadores individualmente. Por lo tanto, dado que las cámaras, están separadas unas de otras, en cada pared del horno se coloca una boca de quemado, con lo cual se maximiza la resistencia mecánica del horno.

Los quemadores recomendados son como el mostrado en la figura 19. La marca es Baltur, con potencia unitaria de 400.000 Btu/hr, a un costo por quemador de \$

2.250.000 más IVA. Estos quemadores poseen control automático del encendido y apagado y protecciones de seguridad para baja y alta presión, que garantizan operación libre de peligrosas explosiones por acumulación de combustible y por tapado del quemador. Los cuatro quemadores se pueden encender de manera separada con lo cual pueden utilizarse la cantidad apropiada para ajustarse a las necesidades de producción que requiera el momento.

Estos quemadores poseen mecanismos para regular la cantidad de gas a quemar, con lo cual puede regularse la potencia calórica. Además en el caso de definir un valor de referencia para la temperatura. El sistema de control activa la plena potencia automáticamente y una vez alcanzado el valor de referencia se apaga automáticamente y vuelve a arrancar una vez se inicia el descenso de la temperatura un grado por debajo del punto de consigna.

Figura 21. Quemador de gas natural, marca Baltur de 400.000 Btu/hr.





Fuente: empresa Serprogas. Bogotá.

Para el caso de utilizar los quemadores en las cámaras 2 y 3, se utilizarán dos quemadores en paredes opuestas y las dos bocas restantes se sellan con ladrillos sólidos.

El hecho de que la suma de potencias de los quemadores sea superior a la potencia requerida por el proceso, indica que los mismos no necesitan operar de manera continua durante todo el proceso de quemado con lo cual se tendrán tiempos encendidos a plena potencia y tiempos apagados. Otra opción de uso, es ajustar los quemadores a la potencia del proceso para que trabajen de manera continua durante el proceso de quemado. Esta opción es posible dado los ajuste disponibles en el quemador Baltur, no solo del proceso de combustión, sino también de la potencia del quemador. Esta opción es la recomendada dada la temperatura estable de operación deseada al interior del horno, que maximiza la vida útil y la seguridad operativa.

### **3.5 CALCULO DE CONSUMO DE GAS NATURAL.**

El poder calórico inferior del gas natural, se suministra con un valor mínimo de 35.000 Btu /m<sup>3</sup>. Para calcular los metros cúbicos consumidos en gas natural para la operación planteada, se tiene:

1. Cálculo del aire requerido para la combustión en lb de aire / lb de combustible y en m<sup>3</sup> de aire / m<sup>3</sup> de combustible.

2. El análisis del combustible, en base volumétrica es:

$$CO_2 = 0,0038, \text{ densidad} = 0,1160 \text{ lb/ft}^3, CH_4 \text{ (metano)} = 0,94$$

$$\text{densidad} = 0,042 \text{ lb/ft}^3, C_2H_6 = 0,04,$$

$$\text{Densidad} = 0,079 \text{ lbs / ft}^3. N_2 = 0,0162,$$

$$\text{Densidad} = 0,074 \text{ lbs / ft}^3.$$

3. Pasar a lb de cada gas / ft<sup>3</sup>.

$$CO_2 = 0,0038 * 0,1161 = 0,0004419 \text{ lb de } CO_2 / \text{ft}^3$$

$$CH_4 = 0,94 * 0,042 = 0,03948 \text{ lb de } CH_4 / \text{ft}^3$$

$$C_2H_6 \text{ (etano)} = 0,04 * 0,079 = 0,00316 \text{ lb de } C_2H_6 / \text{ft}^3$$

$$N_2 = 0,0162 * 0,074 = 0,001199 \text{ lb de } N_2 / \text{ft}^3$$

$$\text{Densidad total de la mezcla} = (0,0004419 + 0,03948 + 0,00316 + 0,001199) = 0,04429 \text{ lbs de mezcla / ft}^3.$$

Para tener la proporción másica de los componentes en la mezcla, se divide su densidad individual entre la densidad de la mezcla.

$$CO_2 = 0,0004419 / 0,04429 = 1 \%. \text{ 0,01 lb de } CO_2 / \text{lb de mezcla.}$$

$$CH_4 = 0,03948 / 0,04429 = 89 \%. \text{ 0,89 lb de } CH_4 / \text{lb de mezcla.}$$

$$C_2H_6 = 0,00316 / 0,04429 = 7.13 \%. \text{ 0,0713 lb de } C_2H_6 / \text{lb de mezcla.}$$

$$N_2 = 0,001199 / 0,04429 = 2.87 \%. \text{ 0,0287 lb de } N_2 / \text{lb de mezcla.}$$

Observe que al sumar los % por masa da un valor de 100 %, como lo requiere la regla de la suma de las fracciones que deben totalizar la unidad. La lb de mezcla, equivale a cada libra de combustible utilizada.

4. Cálculo de la cantidad de oxígeno estequiométrico requerida.

Las fracciones combustibles en la mezcla analizada son el metano (CH<sub>4</sub>) y el etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>).

Para metano.  $0,89 * 64/16 = 3.56$  lb de O<sub>2</sub> (oxígeno)

Para etano.  $0,0713*112/30 = 0,266$  lb de O<sub>2</sub>.

Total oxígeno para combustión de una lb de combustible = 3.826 lb de O<sub>2</sub>.

5. Cálculo de la cantidad de aire requerida.

El peso de nitrógeno, relacionado con el valor anterior de oxígeno necesario es:

$3,826*0,768/0.232 = 12,66$  lb de nitrógeno.

Se asume que la composición del aire en masa porcentual es de nitrógeno 0,768 (76,8 %) y oxígeno 0,232 (23,2 %).

El peso de aire requerido por libra de combustible, es la suma del nitrógeno y oxígeno requerido.

Aire requerido = 16.486 libras de aire / lb de combustible especificado.

$$: \text{flujo máximo requerido} = 16,486 \frac{\text{Lb aire}}{\text{Lb gas}} \times \frac{16 \text{Lb gas}}{\text{hr}} = 263.776 \frac{\text{Lb aire}}{\text{Hr}} = 119.9 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$$

$$\text{densidad del aire} = 1,24 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \text{ con flujo volumétrico de } 96,7 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

6. Cálculo del calor sensible arrastrado con los gases de escape.

Los gases de combustión están a una temperatura mayor al ambiente y por lo tanto con los mismos se escapa calor que se pierde y que necesita de quema adicional de combustible. De todos modos se asume que dada la posibilidad de formación de ácidos y similares, dañinos para la chimenea y equipos en contacto con los gases de escape, la temperatura mínima se define en 200 °C. Sin embargo dada las experiencia y mediciones con varios hornos, incluso uno de chimenea con boca de salida inferior, la temperatura de salida de estos gases, de manera conservativa se foja en 400 °C. Por lo tanto si la temperatura ambiente promedio es de 30 °C, la diferencia de temperatura es de 370 °C.

Como se dispone de la capacidad calórica en Kcal / kg-°C para cada uno de los gases, los cálculos se realizan en el sistema internacional. Como no existe cambio de fase los calores mencionados son sensibles y los clores sensibles se han ajustado a la temperatura promedio de 225°C. Los valores por gas son:

$$Co_2 = 0,004545 \times 0,235 \times 370 = 0,3952 Kcal \text{ por } \frac{Co_2}{Kg}$$

De gases de escape. (Se asume que no combustiona, ni realiza otro tipo de reacción).

$$N_2 = \left( \frac{12,6887}{2,2} \right) \times 0,25 \times 370 = 533,5 \frac{Kcal}{Kg}$$

Se suma el nitrógeno del combustible y el del aire para combustión.

$$CH_4 = 0,89 + 3,56 = 4,45 \text{ lb}$$

$$\text{Calor perdido en el metano} = 2 \times 0,245 \times 370 = 181,3 \text{ Kcal/ kg}$$

$$C_2H_6 = 0,0713 + 0,0266 = 0,0979 \text{ lb de productos.}$$

$$\text{Calor perdido en el etano} = 0,0445 \times 0,256 \times 370 = 4,215 \text{ Kcal / kg.}$$

Calor total perdido por productos de combustión = 719,4 Kcal / kg de producto de combustión enviado al ambiente.

#### 7. Calculo de cantidad de gas natural para el proceso.

El calor máximo necesario a obtener desde la quema del gas natural es de 1.166.000 Btu / hr o 293,832 Kcal / hr. Para 24 horas de quemado, la energía total es de 7,051,968 Kcal. Si se asume un 10% de seguridad adicional, por envejecimiento del horno, sistema de combustión y otros, la energía total sería de 7.757.165 Kcal.

El poder calórico inferior del gas natural es de 35.000 Btu / m<sup>3</sup>.

El calor perdido es de 719,4 Kcal / kg, que deben convertirse a Kcal / m<sup>3</sup>.

La densidad el gas natural es de 0,775 kg / m<sup>3</sup>.

Entonces el poder calórico es de 45.162 Btu / kg.

Q combustible = Q proceso

Masa de combustible = Q proceso / p.c.i

$$\begin{aligned} M_{combustible} &= 7.757.165(45162 - 719,4) \text{ Kcal} / \text{kcal} / \text{kg} \\ &= 174,5 \text{ kg quema 2000 ladrillos.} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el flujo másico de gas en 24 horas de quema es de 174,5 / 24 = 7,27 kg / hr.

Al poder calórico del gas natural se le resta lo correspondiente a pérdidas de calor por la chimenea (45162 – 719,4).

El volumen correspondiente de gas consumido es de 225 m<sup>3</sup>. A un costo de \$ 260m<sup>3</sup>. El costo de combustible / quema es de \$ 58.557 (cincuenta y ocho mil quinientos cincuenta y siete pesos).

El valor anterior es para el caso más crítico de consumo de gas.

### 3.6 CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL HORNO

La eficiencia del horno  $\eta_{\text{horno}} = \text{calor quemado ladrillos} / \text{calor total de combustible para operar}$ .

El calor para quemar 2000 ladrillos es de 757000 / 1166.000 = 0.65 (65 %).  
Eficiencia esperada.

$$hpv = 0.0001753 \frac{\text{flujo de aire} \times \text{perdida de carga}}{D} \quad \text{Ecuación 10}$$

Caída de presión en pulgadas de agua = 20 pulgadas de agua como máximo en instalaciones de hornos individuales según Lobato.

Flujo volumétrico de aire = 1,5\*120 Kg de aire / hr 2.2 lb / kg. x 1 h / 60 minutos x 1 ft<sup>3</sup> / 0,051Kg aire = 129 pies cúbicos por minuto

Ingresando estos valores en la ecuación 10 se tiene. Donde 1,5 es un factor de seguridad.

$$Hp v = 0.0001753 \times 20 \times 129 / 0.6 = 0.75 Hp$$

Por lo cual se recomienda un motor de  $\frac{3}{4}$  de caballo, dado que así trabaja con un factor de seguridad de 1.5.

#### 3.6.1 CALCULOS PARA REQUERIMIENTOS DE MATERIALES DEL HORNO.

- Material para cimientos.

$$P_{\text{cimientos}} = 11.4 \text{ mts}$$

$$V_{\text{cimientos}} = 11.4 \times 0.5 \times 0.5 = 2.85M^2 .$$

$$V_{\text{piedra}} = 3M^3$$

Material total cimientos es de 9 metros cúbicos de piedra. 3 metros cúbicos de agregado y 4 bolsas de cemento.

- Material revoque de paredes.

$$2 \times (3,2 \times 2,3 + 2,5 \times 2,3) \times 3 \text{ cámaras} = 78,66 M^2 \text{ De pared.}$$

Se divide por 23 para tener el volumen de mortero de revoque, que daría 4 metros cúbicos.

- Ladrillos para las paredes.

Los ladrillos se colocan acostados y tienen medidas de 9x20x30 (alto x ancho x largo) en centímetros. Área de ladrillos para pared de 9 x 30 que equivalen a 0.27 m<sup>2</sup>.

Área de paredes 78.66 M<sup>2</sup> para las tres cámaras.

$$N_{\text{ladrillos}} = 78,66 / 0,27 = 291 / 0,95 = 300 \text{ ladrillos refractarios}$$

300 ladrillos adicionales por ser paredes doble, para un total de 600 ladrillos con precio unitario de 1200, totalizando por ladrillos \$ 720.000.

Contratando con fabricantes de hornos de la región, estos han ofertado un precio de \$ 30.000.000 (treinta millones de pesos) por la construcción global, de los tres hornos, donde ellos colocan todos los materiales y mano de obra civil sin incluir estructuras metálicas. Estas a su vez tienen un precio ofertado mínimo de \$ 6.000.000 millones de pesos, para totalizar un precio global de la construcción del horno, según los requerimientos aquí establecidos de \$ 36.000.000, treinta y seis millones de pesos.

### 3.7 ESTIMADO DE COSTOS DE FABRICACION Y OPERACIÓN DEL HORNO.

La tabla 1 indica los costos de fabricación y puesta a punto del horno global, operando las tres cámaras con los controles de los calores de recuperación incluidos.

Tabla 1. Costos de fabricación del horno.

Articulo	Cantidad	Valor unitario COP	Subtotal costos C OP
Cámara de horno	3	10.000.000	30.000.000
Estructuras metálicas de ducteria con dámper	3	2.000.000	6.000.000
Quemadores de gas de 400.000 Btu/hr. Incluyen IVA	4	2.552.000	10.280.000
Tubería de chimenea de 8 metros de largo, diámetro 0.5 metros, en lamina negra de 3/16 pulgadas y con revoque inte rno de mortero	1	2.700.000	2.700.000



Pruebas de ajuste y puesta a punto	1	2.000.000	2.000.000
Total costos de fabricación.			50.980.000

Fuente: autores.

Costos totales de fabricación y puesta a punto, son de cincuenta millones novecientos ochenta mil pesos m/l.

Los fabricantes del horno, estiman una vida útil mínima de 4 años. Después de los cuales deben realizarse una reparación general, especialmente de la parte metal mecánica. También se tiene una garantía de fabricante para los quemadores de un año, con una vida útil esperada de cinco años, tiempo necesario para proceder a su remplazo.

Tabla 2. Costos operativos mensuales, estimados para el sistema de hornos propuesto.

Articulo	Cantidad De quemas / mes	Valor unitario COP	Subtotal costos COP
Gas natural	27	59.000.000	1.593.000
Operario hornos	3	1.300.000	3.900.000
Mantenimiento preventivo	1	1.200.000	1.200.000
Energía eléctrica	1	300.000	300.000
Costo total operativo			6.993.000

Fuente: autores.

Se anota, que existen otros activos productivos, con necesidad de recuperación de inversiones y costos operativos mensuales no incluidos, por no ser parte del proyecto e información confidencial de la empresa.

Cada ladrillo se comercializa en \$ 450, por lo que se estima que los ingresos operativos promedio, están en el orden de los \$ 18.000.000 (dieciocho millones de pesos m/l) por mes.

### 3.8 ANALISIS DE RESULTADOS

Para el proceso actual, en la quema de 12.000 ladrillos mensuales, se gastan en leña. \$ 600.000. En operarios del horno, que son tres para quemado, cargue y descarga, donde se gastan \$ 2.400.000. Para un total de costos operativos de \$ 3.000.00. Los ingresos mensuales son del orden de \$ 5.400.000. Por lo tanto los ingresos netos actuales por mes son de \$ 2.400.000 en promedio.

Con el diseño propuesto, los ingresos netos son del orden de \$ 11.000.000 mensual, de los cuales deben descontarse lo correspondiente a otros activos, que se estima sean del orden de los \$ 4.000.000 / mes. Con esto el ingreso neto promedio mensual esperado es de \$ 7.000.000 / mes. Esto representa un aumento respecto a lo actual de casi tres veces. Por lo tanto se espera una recuperación de la inversión durante el primer año y ganancias sostenidas los restantes cuatro años de vida útil, antes de reparar o reemplazar el sistema.

## CONCLUSIONES

Se han desarrollado los objetivos propuestos. Inicialmente se propone un diseño de horno especialmente apropiado para el problema planteado de tener continuidad operativa y eficiencia energética, al utilizar calores que en los hornos tradicionales se pierden y acá se recuperan. Además se ha logrado proponer un diseño del horno, con suficientes detalles técnicos que han permitido que fabricantes y proveedores, oferten sus propuestas para tener los montos de inversión que deben aplicarse. El costo de fabricación y puesta a punto, se ha redondeado en cincuenta millones de pesos para una vida de al menos cuatro años, lo que promete recuperar la inversión y obtener dividendos, que mejoran la competitividad de los inversionistas.

Con los ingresos netos esperados de al menos 7 millones / mes. Se tendrá durante los cuatro años operativos estables un ingreso de 336 millones, con lo cual la inversión de cincuenta millones se recupera ampliamente, No se incluyen detalles técnicos específicos, para proteger los resultados del proyecto para los inversionistas.

Con la nueva capacidad productiva, podrían mejorarse los ingresos de manera sustancial, si se fabrican ladrillos de otros tipos como el ladrillo llamado zamo, que tienen un costo unitario de \$ 800. Esto mediante la fabricación y puesta a punto de una extrusora de ladrillos, de la cual se ha incluido el costo mensual que se tiene estimado para tener una visión más realista de los resultados económicos esperados.

Para la construcción y puesta a punto, se tienen proveedores con amplia experiencia y operarios duchos en el manejo de estos sistemas, por lo que los aspectos de seguridad y calidad operativa están garantizados.

## BIBLIOGRAFIA

1. B. Sundén, C.A. Brebbia, Methods in Heat Transfer VII , edited for WIT Press, Boston, p.439-448.
2. [Celia, M.A. and Gray, W.G., 1992, Numerical Methods for Differential Equations: Fundamental Concepts for Scientific and Engineering Applications. Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
3. Gong, Z. and Mujumdar, A.S., 1995, a two-dimensional finite element model for kiln-drying of refractory brick, Drying Technology, Canada.
4. JONES, T., 1996, the Basics of Brick Kiln Technology, GATE, Germany.
5. McGraw-Hill, 1987, Applied Numerical Methods with Personal Computers, International edition, USA.
6. Moreno, Franco. EL LADRILLO EN LA CONSTRUCCIÓN. España. Ediciones CEAC. 1981.
7. Nakamura, S., 1992, Métodos Numéricos Aplicados con Software, 1ªed. en español, Prentice-Hall hispanoamericana S.A., México, D.F.
8. Norma Mexicana. NMX-C-006-1976. México. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. 1976.
9. R. Vuthaluru, H.B. Vuthaluru . (2006). Modelling of a wall fired furnace for different operating conditions using fluent. Fuel Processing Technology, 87, 633-639.
10. SINGER, F. y SINGER, S.S., 1976a, Enciclopedia de la Química Industrial, Tomo 9, URMO, S.A., España.
11. SINGER, F. y SINGER, S.S., 1976b, Enciclopedia de la Química Industrial, Tomo 10, URMO, S.A., España.
12. F. P. INCROPERA Y D. P. DE WITT: FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, 4A ED, PEARSON EDUCACION, MEXICO, 2000
13. FENOMENOS DE TRANSPORTE, B. BYRD ET AL, PUEBLO Y EDUCACIÓN, LA HABANA, 1977.

14. WARK, K. RICHARDS, D.E.: TERMODINAMICA, 6A EDICION MC GRAW-HILL, 2001.
15. ALARCON AGUIN, J. M.; GRANADA ALVAREZ, E.; VAZQUEZ ALFAYA, M. E. SISCECT, SIMULACION Y CALCULO DE CICLOS TERMODINAMICOS, ED. BELLISCO, 1999. **536 SIS.**
16. CHAPMAN A.J.: TRANSMISION DE CALOR, EDITORIAL LIBRERIA EDITORIAL BELLISCO, MADRID, 3A EDICION, 1990.
17. WARK, K. RICHARDS, D.E.: TERMODINAMICA, 6A EDICION MC GRAW-HILL, 2001.
18. MANUEL MÁRQUEZ MARTÍNEZ. COMBUSTIÓN Y QUEMADORES. MARCOMBO 1989.
19. RESNICK, R. HALLIDAY, D. Y KRANE, K. (1996). *FÍSICA: VOL. 1.* (4A. EDICIÓN). MÉXICO: CECSA. ISBN: 9682612306.
20. RESNICK, R. HALLIDAY, D. Y KRANE, K. (1996) *FÍSICA: VOL. 1.* (4A. ED.) MÉXICO: CECSA. ISBN: 9682612306.

# ANEXOS

## ANEXO 1

### DETALLES DE QUEMADORES BALTUR



## QUEMADORES DE GAS METANO Y GLP BALTUR

#### Elevado valor tecnológico

Los criterios con los que se fabrican los quemadores Baltur hacen que constituyan quemadores extremadamente fiables que aseguran siempre un fácil acceso a todos los componentes y, por consiguiente, una gran facilidad para realizar las operaciones de asistencia, limpieza control y mantenimiento.

Las características específicas de presurización, las dimensiones reducidas con relación a la potencia térmica y el consumo de energía eléctrica contenido completan el cuadro técnico y funcional de un producto de elevado valor tecnológico.



#### Características principales

Cuerpo del quemador monobloco en aluminio fundido.

Ventilador con estructura especial, con gran presurización, que garantiza un funcionamiento seguro, incluso cuando el quemador se instala en calderas semi-presurizadas o presurizadas.

Brida de unión corredera sobre la cabeza de combustión que permite al instalador encontrar la posición exacta de la cabeza de combustión con respecto al hogar de la caldera y obtener un perfecto acoplamiento de los



dos elementos.

Cabeza de combustión construida de modo que permita al quemador obtener los mejores valores de combustión en cada uno de los puntos del campo de trabajo.

Cajas de control y dispositivos electrónicos de accionamiento y control de ciclo de funcionamiento en su totalidad y de las funciones de seguridad.

**Amplia gama de versiones y potencias.**

Los quemadores se entregan listos para el montaje

Fácil instalación y mantenimiento.

#### Funcionamiento

Los quemadores Baltur se fabrican en las siguientes versiones: con una o dos etapas progresivas más kit de modulación (esta última posibilidad permite la obtención del funcionamiento modulante).

Con una etapa: el quemador ofrece solo las funciones de encendido y apagado.

Con dos etapas: el quemador tiene las siguientes funciones: apagado, encendido con llama reducida y encendido con la máxima potencia térmica. Desde esta posición el quemador puede volver automáticamente al funcionamiento con llama reducida (con el accionamiento del termostato o del presostato correspondiente).

Con dos etapas progresivas (DSPGN): los quemadores con dos etapas progresivas pueden funcionar con dos niveles distintos de potencia térmica, pasando de uno a otro por el accionamiento de un sensor (termostato o presostato). Requiere el tiempo necesario para que el servomotor de accionamiento de la



potencia térmica pase del valor mínimo al valor máximo y viceversa.

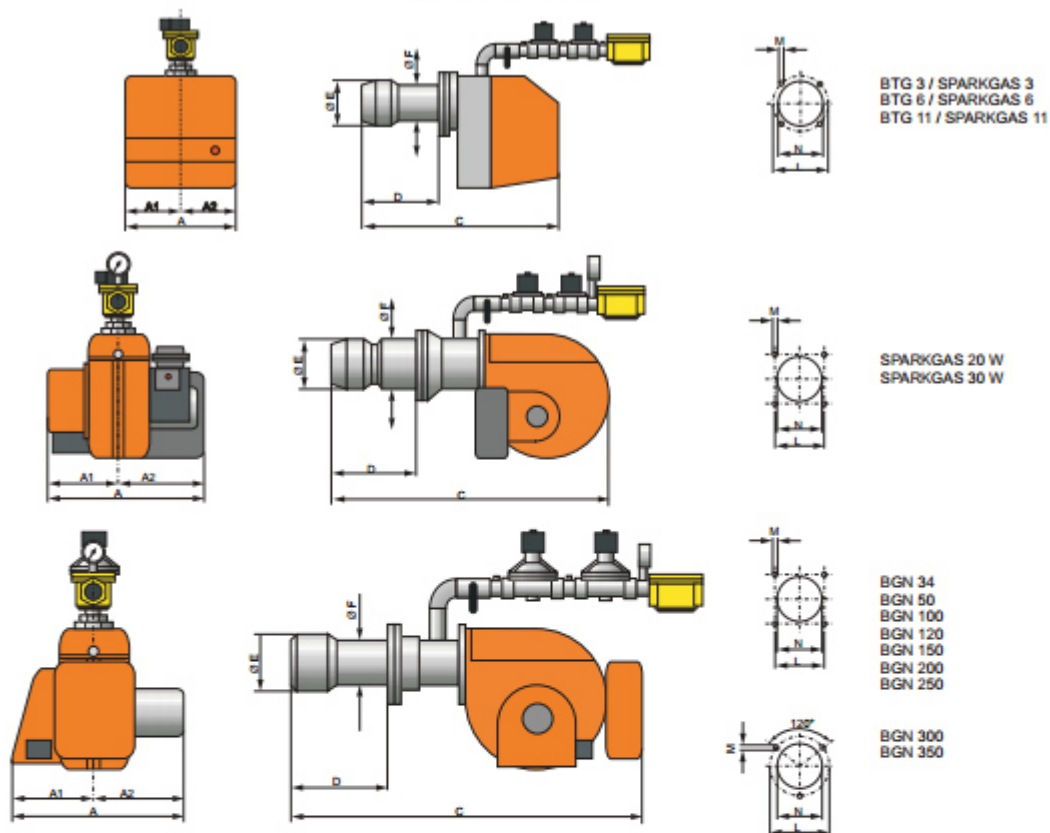
La relación aire-combustión puede regularse en todo el campo de trabajo (mínimo-máximo) con extrema precisión, en función de las exigencias de la caldera.

**Modulante:** se utilizan los quemadores modulantes cuando es necesario suministrar una potencia térmica que sea siempre variable, de acuerdo con las exigencias de la caldera.





## DIMENSIONES



BTG 3 / SPARKGAS 3  
BTG 6 / SPARKGAS 6  
BTG 11 / SPARKGAS 11

SPARKGAS 20 W  
SPARKGAS 30 W

BGN 34  
BGN 50  
BGN 100  
BGN 120  
BGN 150  
BGN 200  
BGN 250

BGN 300  
BGN 350

Modelo	A	A1	A2	B	C	D	D	E	F	L	L	M	N
						Min.	Max.			Min.	Max.		
BTG 3 / SPARKGAS 3	250	120	130	395	330	100	-	90	90	135	161	M8	95
BTG 6 / SPARKGAS 6	245	122,5	122,5	493,5	410	50	105	90	90	130	155	M8	95
BTG 11 / 11M / Sparkgas 11/11M	245	122,5	122,5	493,5	475	90	150	108	90	130	155	M8	95
Sparkgas 20 W	460	230	230	608	740	120	280	126	95	105	-	M8	130
Sparkgas 30 W	460	230	230	638	835	170	300	135	135	140	175	M12	150
BGN 34	410	180	230	645	870	150	330	155	135	140	175	M12	165
BGN 50	470	220	250	780	1150	210	400	170	135	140	175	M12	180
BGN 100 P	560	250	310	845	1330	240	460	230	160	165	-	M12	190
BGN 120 P	590	250	340	865	1400	220	440	270	195	195	-	M16	220
BGN 150 P	655	290	365	950	1500	220	440	270	195	195	-	M16	220
BGN 200 P	830	395	435	1130	1850	300	600	320	220	240	-	M16	240
BGN 250 P	875	395	480	1175	1850	300	600	320	220	240	-	M16	240
BGN 300 P	875	395	480	1205	1850	275	465	320	275	490	-	M20	340
BGN 350 P	880	400	480	1265	1850	275	465	356	275	490	-	M20	390

**CAPACIDADES:**

Estos quemadores pueden otorgar una capacidad calorífica que depende de las condiciones del hogar y del proceso (de 30.000 a 4.000.000 Kcal/h). Consultar a nuestros especialistas para determinar el modelo adecuado.

**EQA S.A.I.C. Camarones 2739 Cap. Fed. Tel: (54-11) 4585-5009 Fax: (54-11) 4581-8893 E-MAIL: eqa@eqa.com.ar**

## ANEXO 2

### DATOS DE COMBUSTIBLES PARA HORNOS



#### FORMULARIO GPIT

GAS L.P. (90% PROPANO "C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> " - 10% BUTANO "C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ")		
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>		
Densidad relativa del gas l.p. vaporizado con respecto al aire 1.5 1 lt gas l.p. = 0.5376 kg/lt (factor usado por distribuidores = 0.54) 1 lt gas l.p. líquido ocupa 273 veces su volumen vaporizado 3.66 lts de l.p. líquido = 1 m <sup>3</sup> de l.p. vaporizado m <sup>3</sup> gas l.p. vaporizado X 2.6 = m <sup>3</sup> de gas natural	Eficiencia de combustión en un quemador carburado de 89 a 96% 1 lt gas l.p. líquido = 0.273 m <sup>3</sup> gas l.p. vaporizado Gasto de orificios y espreas en natural al usarse con l.p. X 0.6763 La pres. de ap. atm. con nat. a uso con l.p. se disminuye / 23 y 54% ft <sup>3</sup> gas l.p. vaporizado X 2.6 = ft <sup>3</sup> de gas natural	
<b>CAPACIDAD CALORÍFICA</b>		
1lt gas l.p. líquido = 25,200 btu/lt X 3.66 lts/m <sup>3</sup> = 92,200 btu/m <sup>3</sup> 1 m <sup>3</sup> gas l.p. vaporizado = 92,300 btu/m <sup>3</sup>	1 ft <sup>3</sup> gas l.p. vaporizado = 2,600 btu/ft <sup>3</sup>	Por cada caballo caldera (HP boiler) se necesitan: Entre 0.42 y 0.48 m <sup>2</sup> /hr de gas l.p. = entre 39,000 y 44,400 btu/hr
<b>CAPACIDAD DE VAPORIZACIÓN DE TANQUES</b>		
D x L x T x C = vaporización en btu/hr donde: D = diam. en plg. T = constante de temperatura: a 5°C = 3 a 10°C = 4 L = largo en plg. C = constante de llenado: al 20% = 60		
GAS NATURAL (METANO "CH <sub>4</sub> ")		
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>		
La densidad relativa del gas natural con respecto al aire 0.6 Gasto de orificios y espreas en l.p. al usarse con natural / 0.6763 m <sup>3</sup> gas natural / 2.6 = m <sup>3</sup> de gas l.p. vaporizado	Eficiencia de combustión en un quemador carburado de 90 a 97% La pres. de ap. atm. con l.p. a uso con nat. se aumenta / 23 a 54% ft <sup>3</sup> gas natural / 2.6 = ft <sup>3</sup> de gas l.p. vaporizado	
<b>CAPACIDAD CALORÍFICA</b>		
1 m <sup>3</sup> gas natural = 35,500 btu/m <sup>3</sup>	1 ft <sup>3</sup> gas natural = 1,000 btu/ft <sup>3</sup>	Por cada caballo caldera (boiler hp) se necesitan: Entre 1.1 y 1.25 m <sup>2</sup> /hr de gas natural = entre 39,000 y 44,400 btu/hr
FACTORES DE CONVERSIÓN		
El factor de conversión de m <sup>3</sup> o ft <sup>3</sup> de gas l.p. a m <sup>3</sup> o ft <sup>3</sup> de gas natural (y viceversa) es de 2.6 El factor de gasto en orificios de reguladores y espreas de aparatos de consumo de gas l.p. A natural y viceversa es de 0.6763 1 kcal/hr eleva 1 lt de H <sub>2</sub> O 1°C en 1 hr = 1 kg/hr de H <sub>2</sub> O 1°C en 1 hr Tanque de expansión (aceite térmico) 1/3 del vol. total del sistema Cap. Cal. combustóleo 38,500 btu/lt, densidad 0.98 kg/lt Eficiencia de combustión en un quemador carburado de 80 a 90% Cap. Cal. comb. Ind. (gasóleo) 36,000 btu/lt, densidad 0.94 kg/lt Eficiencia de combustión en un quemador carburado de 82 a 92% Cap. Cal. diesel 32,300 btu/lt, densidad 0.92 kg/lt Eficiencia de combustión en un quemador carburado de 84 a 94%		
<b>VOLUMEN</b>		
1 lt = 0.264172052358 gal 1 m <sup>3</sup> = 264.172052358 gal 1 gal = 3.785411784 lt 1 ft <sup>3</sup> = 7.48051948052 gal	1 lt = 0.001 m <sup>3</sup> 1 m <sup>3</sup> = 1,000 lt 1 gal = 0.003785411784 m <sup>3</sup> 1 ft <sup>3</sup> = 0.028316846592 m <sup>3</sup>	1 lt = 0.0353146667215 ft <sup>3</sup> 1 m <sup>3</sup> = 35.3146667215 ft <sup>3</sup> 1 gal = 0.133680555556 ft <sup>3</sup> 1 ft <sup>3</sup> = 28.316846592 lt
<b>ENERGÍA Y PODER CALORÍFICO</b>		
1 btu = 0.251995761111 kcal 1 boiler hp = 8,437.5 kcal/hr 1 boiler hp = 15.6494522692 kg vapor 1 kg vapor = 2,139.297 btu/hr 1 kcal = 3.96832071933 btu 1 kw = 859.845221859 kcal/hr 1 kw = 0.102009588901 boiler hp 1 therm = 25,199.6751696 kcal	1 btu = 0.0000999996069058 therm 1 boiler hp = 33,480 btu/hr 1 boiler hp = 34.4827586207 lb vapor 1 lb vapor = 0.029 boiler hp 1 kcal = 0.0000396830512008 therm 1 kw = 0.034121282202 therm/hr 1 kw = 1.59639419249 kg vapor 1 therm = 100,000.393096 btu	1 btu/hr = 0.000293071070172 kw 1 boiler hp = 9.803 kw 1 kg vapor = 0.0639 boiler hp 1 lb vapor = 970.385 btu/hr 1 kcal/hr = 0.001163 kw 1 kw = 3,412.14163313 btu/hr 1 kJ = 0.947817120313 btu/hr 1 therm = 29.3072222222 kw
<b>PRESIÓN</b>		
1 bar = 14.503773773 psi 1 psi = 0.0689475729318 bar 1 osi = 0.0625 psi 1" wc = 0.0360911906568 psi	1 bar = 232.2 osi 1 psi = 16 osi 1 osi = 0.0043066322136 bar 1" wc = 0.5781 osi	1 bar = 401.864651985" wc 1 psi = 27.7075924014" wc 1 osi = 1.72980453209" wc 1" wc = 0.0024884 bar
<b>LONGITUD</b>		
1 cm = 0.00000621371192237 milla 1 milla = 160934.4 cm 1 plg = 0.0000157828282828 milla 1 ft = 0.000189393939394 milla	1 cm = 0.393700787402 plg 1 milla = 63360 plg 1 plg = 2.54 cm 1 ft = 12 plg	1 cm = 0.0328083989501 ft 1 milla = 5280 ft 1 plg = 0.0833333333333 ft 1 ft = 30.48 cm
<b>MASA</b>		
1 kg = 2.20462262185 lb 1 lb = 0.45359237 kg 1 onza = 0.0625 lb 1 slug = 32.1740485564 lb	1 kg = 35.2739619496 onzas 1 lb = 16 onzas 1 onza = 0.028349523125 kg 1 slug = 514.784776903 onzas	1 kg = 0.0685217658568 slug 1 lb = 0.0310809501716 slug 1 onza = 0.00194255938572 slug 1 slug = 14.5939029372 kg
NOTAS: Los datos de volumen, capacidad calorífica y eficiencias de combustión de los combustibles son en condiciones estándar (NMM)		

### ANEXO 3

## PODER CALORICO DE COMBUSTIBLES PARA HORNOS

### PODER CALORÍFICO DE MADERAS Y RESIDUOS AGRÍCOLAS

COMBUSTIBLE	PODER C. MEDIO kJ/kg
Bagazo húmedo	10500
Bagazo seco	19200
Cáscara de cacahuete	17800
Cascarilla de arroz	13800
Celulosa	16500
Corteza escurrida	5900
Cosetas de caña	4600
Madera seca	19000
Madera verde (*)	14400
Paja seca de trigo	12500
Paja seca de cebada	13400
Serrín húmedo	8400
Viruta seca	13400
	<b>P. C. SUPERIOR kJ/kg</b>
Cáscara de almendras	36800
Cáscara de nueces	32000
Cáscara de arroz	15300
Cáscara de pipa de girasol	17500
Cáscara de trigo	15800
Corteza de pino	20400
Corcho	20930
Orujillo de aceituna	17900
Orujo de uva	19126
Papel	17500
Jara (8% humedad)	18900 (P.C.I.)

debajo estan los coeficientes de correccion del p.c para maderas humedas

#### Coeficientes de la madera húmeda

MADERA	COEF.	MADERA	COEF.
Alamo negro	0'55	Haya	0'62
Castaño	0'48	Olivo	0'88
Chopo	0'30	Pino marítimo	0'58
Encina	0'68	Pino silvestre	0'49
Enebro	0'50	Roble	0'68

**PODER CALORIFICO DEL CARBÓN  
Y OTROS COMBUSTIBLES SOLIDOS**

Combustible	Densidad media kg/m <sup>3</sup>	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Combustible	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Turba	360	21300	22500	Aglomerados de carbón	31300	35600
Lignito	1050	28400	29600	Carbón de madera	31400	33700
Hulla	1350	30600	31400	Coque	29300	33700
Antracita	875	34300	34700	Coque de petróleo	34100	36500

**PODER CALORIFICO DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS**

Combustible	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Combustible	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Aceite de esquistos	-----	38830	Fuel-oil n°1	40600	42695
Alcohol comercial	23860	26750	Fuel-oil n°2	39765	41860
Alquitrán de hulla	-----	37025	Gasóleo <sup>1)</sup>	42275	43115
Alquitrán de madera	36420	-----	Gasolina <sup>2)</sup>	43950	46885
Etanol puro <sup>3)</sup>	26790	29720	Petróleo bruto	40895	47970
Metanol <sup>3)</sup>	19250	-----	Queroseno <sup>3)</sup>	43400	46500

<sup>1)</sup> Densidad a 15 °C, 850 kg/m<sup>3</sup>

<sup>2)</sup> Densidad a 20 °C, 730 kg/m<sup>3</sup>

<sup>3)</sup> Densidad a 15 °C, 780 kg/m<sup>3</sup>

<sup>4)</sup> Densidad a 20 °C, 790 kg/m<sup>3</sup>

**PODER CALORIFICO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS**

Combustible	Densidad kg/m <sup>3</sup>	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Combustible	Densidad kg/m <sup>3</sup>	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Gas natural	(*)	39900	44000	Gas de agua	0'711	14000	16000
Gas de hulla	0'50		46900	Gas ciudad	0'650	26000	28000
Gas de coquería	0'56	31400	35250	Gas de agua carburado	0'776	26400	27200
Gas de aire	----	10000	12000	Propano	506 (l) 1'85 (g)	46350	50450
Hidrógeno	0'0899	120011	141853	Butano	580 (l) 2'4 (g)	45790	49675

(\*) Varía según el país de procedencia

(l), (g) Densidad a 20 °C en estado líquido y gaseoso, respectivamente.

P.C. Medio del biogás = 5554 kcal/m<sup>3</sup>



## ANEXO 4

### COEFICIENTES EQUIVALENTES DE PERDIDAS POR CONDUCCION – CONVECCION EN PAREDES DE HORNOS.

#### COEFICIENTE DE PERDIDAS DE CALOR POR CONDUCCION

TEMP. PARED INTERIOR °C	Kcal. /m <sup>2</sup> .h	
	muro (0.25 m)	muro (0.45 m)
650	1900	1100
800	2500	1300
1000	3400	1800
1200	4400	2400

Fuente: adaptado de: Perry j. manual del ingeniero químico. Tomo II.

**ANEXO 5.**

**FOTOS DEL ACTUAL HORNO, CON MODIFICACIONES DE LA CHIMENEA  
OPERANDO CON LEÑA.**











