



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESPECIALIDAD EN AHORRO Y USO EFICIENTE DE
LA ENERGÍA**

**Recuperación de calor en un horno industrial con
aplicación a un proceso de secado en una PyME de
manufactura.**

TESINA

Para obtener el grado de especialista en Ahorro y Uso Eficiente de la Energía

P R E S E N T A

Ing. Emmanuel Roberto Sánchez Campos

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. Guillermo Sánchez Liévano

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Junio 2018



Índice general

| | |
|--|----|
| Índice general | 2 |
| Índice de Figuras | 4 |
| Introducción | 5 |
| Problemática | 6 |
| Justificación | 6 |
| Objetivos..... | 7 |
| Objetivo General..... | 7 |
| Objetivos específicos | 7 |
| Capítulo I..... | 8 |
| Marco contextual de la empresa | 8 |
| Diagnostico Energético..... | 10 |
| Situación de los hornos | 11 |
| Horno de curado | 11 |
| Horno de vitrificado | 11 |
| Instalaciones externas..... | 12 |
| Instalaciones internas | 12 |
| Carga térmica | 13 |
| Ciclo térmico del horno..... | 13 |
| Intercambio de masa y energía..... | 14 |
| Producción | 15 |
| Capítulo II..... | 16 |
| Marco Teórico Conceptual | 16 |
| Balance energético en hornos industriales | 16 |
| Componentes del balance de calor..... | 16 |
| Eficiencia de la combustión | 16 |
| Eficiencia del horno..... | 17 |
| Transferencia de calor en el interior del horno..... | 17 |
| Conducción | 17 |
| Convección | 17 |
| Radiación..... | 18 |
| Pérdidas de calor en hornos | 18 |
| Pérdidas de calor en las paredes | 19 |
| Aislantes..... | 19 |

| | |
|--|--------------------------------------|
| Fibras cerámicas..... | 19 |
| Eficiencia energética en un horno | 20 |
| Recuperadores de calor | 21 |
| Recuperadores por radiación..... | 21 |
| Recuperadores de convección | 22 |
| Recuperadores de combinados | 22 |
| Procesos de manufactura en la empresa | 22 |
| Proceso de decapado..... | 22 |
| Proceso de esmalte porcelanizado | 23 |
| Capítulo III..... | 25 |
| Metodología | 25 |
| Calor sensible en la carga..... | 25 |
| Calor de la atmosfera controlada | 25 |
| Calor de los gases de escape..... | 26 |
| Análisis de los gases de combustión | 26 |
| Balance estequiometrico | 26 |
| Calor perdido en las paredes | 29 |
| Calor perdido por apertura de puertas..... | 30 |
| Calor en los ductos radiantes..... | 30 |
| Calor de combustión | 32 |
| Calor sensible de precalentamiento de aire | 32 |
| Eficiencia del horno..... | 33 |
| Diagrama de Sankey..... | 33 |
| Análisis de alternativas | 34 |
| Intercambiador de calor..... | 34 |
| Cámara de secado..... | 35 |
| Capítulo IV | 38 |
| Resultados | ¡Error! Marcador no definido. |
| Anexo. Imágenes | 39 |
| Anexo. Siglas y abreviaturas | 47 |
| Bibliografía..... | 57 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| IMAGEN 1. 1 PROCESO DE CONFORMADO DE LA CARGA Y TIPO DE ENERGÍA ASOCIADA | 10 |
| IMAGEN 1. 2 CICLO TÉRMICO DEL HORNO | 14 |
| IMAGEN 1. 3 GRAFO DE MASA Y ENERGÍA | 15 |
| IMAGEN 1. 4 POTENCIA EN TUBOS RADIANTES | 18 |
| IMAGEN 1. 5 GRÁFICA DE AHORROS DE ENERGÍA POR PRECALENTAMIENTO | 21 |
| IMAGEN 1. 6 GRÁFICA DE AJUSTE POLINÓMICO DE LA ENERGÍA RADIADA POR ΔT ENTRE LA SUPERFICIE Y EL HORNO ... | 31 |
| IMAGEN 1. 7 GRÁFICA DE PARÁMETROS DE AHORRO DE COMBUSTIBLE PARA EL HORNO DE VITRIFICADO | 32 |
| IMAGEN 1. 8 DIAGRAMA DE SANKEY DEL HORNO DE VITRIFICADO | 33 |
| IMAGEN 1. 9 HORNO DE CURADO (180°C) Y HORNO DE ESMALTE PORCELANIZADO (835°C) | 41 |
| | |
| IMAGEN 2. 1 REGIÓN DE DEGRADACIÓN Y TERMOGRAFÍA DE LA ZONA AFECTADA | 41 |
| IMAGEN 2. 2 INSTALACIONES EN PARTE POSTERIOR Y LATERAL | 41 |
| IMAGEN 2. 3 LEVANTAMIENTO DE LAS INSTALACIONES EXTERNAS EN EL HORNO | 42 |
| IMAGEN 2. 4 ARREGLO DE DUCTOS AL INTERIOR DEL HORNO | 42 |
| IMAGEN 2. 5 SUPERFICIES RECUBIERTAS DE AISLANTE | 42 |
| IMAGEN 2. 6 CARGA PREVIO AL PROCESO DE HORNEADO Y CARGA DESPUÉS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO | 43 |
| IMAGEN 2. 7 ÁREA DE DECAPADO DE LA EMPRESA | 43 |
| IMAGEN 2. 8 VISTA SUPERIOR DEL CICLO DE OPERACIÓN DEL HORNO DE PORCELANIZADO | 43 |
| IMAGEN 2. 9 TERMOGRAFÍA DEL DUCTO DE GASES DE ESCAPE | 44 |
| | |
| IMAGEN 3. 1 PLANO GENERAL DEL HORNO | 44 |
| IMAGEN 3. 2 TERMOGRAFÍA EN LA PARED POSTERIOR DEL HORNO | 44 |
| IMAGEN 3. 3 TERMOGRAFÍA DE LA PARED LATERAL DERECHA | 45 |
| IMAGEN 3. 4 TERMOGRAFÍA EN LA PARED LATERAL IZQUIERDA | 45 |
| IMAGEN 3. 5 TERMOGRAFÍA DE LA PARED FRONTAL | 45 |
| IMAGEN 3. 6 CORTE TRANSVERSAL EN EL PRECALENTADOR DE AIRE | 46 |
| IMAGEN 3. 7 POSIBLE ÁREA DEL SECADOR | 46 |
| IMAGEN 3. 8 BALANCE DE MASA EN EL SECADOR | 46 |

Índice de tablas

| | |
|--|--------------------------------------|
| TABLA 1. 1 DEMANDA DE ENERGÍA EN LA EMPRESA | 10 |
| TABLA 1. 2 RESUMEN DEL CONSUMO EN EQUIPOS TÉRMICOS | 10 |
| TABLA 1. 3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS HORNOS INSTALADOS..... | 11 |
| TABLA 1. 4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL HORNO DE VITRIFICADO | 11 |
| TABLA 1. 5 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS DUCTOS DEL HORNO | 12 |
| TABLA 1. 6 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL AISLANTE | 12 |
| TABLA 1. 7 CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA SOMETIDA A TRATAMIENTO | 13 |
| TABLA 1. 8 PROCESO TÉRMICO DEL ESMALTE PORCELANIZADO DENTRO DEL HORNO | 13 |
| TABLA 1. 9 NOMENCLATURA DEL GRAFO DE MASA Y ENERGÍA..... | 14 |
| | |
| TABLA 2. 1 PRODUCCIÓN DE ENERO A SEPTIEMBRE DE 2017 | 15 |
| TABLA 2. 2 CALIDADES DE LA FIBRA CERÁMICA | 20 |
| TABLA 2. 3 PROCESO DE DECAPADO DE LA EMPRESA..... | 22 |
| TABLA 2. 4 MEDICIONES DE GASES DE COMBUSTIÓN..... | 26 |
| TABLA 2. 5 FRACCIONES MOLARES DE LOS PRODUCTOS DE LA REACCIÓN DE COMBUSTIÓN | 27 |
| TABLA 2. 6 CALCULO DE LA ENTALPIA DE LA COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN | 29 |
| TABLA 2. 7 CONDICIONES DEL AIRE PARA LA TEMPERATURA LOCAL DE LA PARED POSTERIOR | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| TABLA 2. 8 CONDICIONES DEL AIRE PARA LA TEMPERATURA LOCAL DE LA PARED LATERAL IZQUIERDA..... | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| TABLA 2. 9 CONDICIONES DEL AIRE PARA LA TEMPERATURA LOCAL DE LA PARED LATERAL DERECHA | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| | |
| TABLA 3. 1 CONDICIONES DEL AIRE PARA LA TEMPERATURA LOCAL DE LA PARED FRONTAL | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| TABLA 3. 2 POLINOMIOS PARA DISTINTOS ΔT ENTRE LA SUPERFICIE DE LOS DUCTOS Y EL AIRE..... | 30 |
| TABLA 3. 3 RESUMEN DE LOS RECEPTORES DE CALOR DURANTE UN CICLO DE HORNEADO | 31 |

Introducción

La eficiencia energética permite mejorar el desarrollo y desempeño estratégico de las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMES), en México puede representar un índice de mejora de la productividad y de la competitividad en el sector industrial, motivo por el cual representa una práctica de mejora continua del desempeño energético en la industria. La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) ha puesto en marcha el proyecto piloto “Introducción a la Eficiencia Energética y Sistemas de Gestión de la Energía en Pymes de México” con el fin de reducir costos de operación en insumos energéticos y dar apertura a la realización de diagnósticos energéticos para lograr un ahorro o uso eficiente de la energía asociada a sus procesos. En el sector de Industrias manufactureras, una de las tecnologías que representa un mayor consumo de energía son aquellas en donde el proceso requiere el uso de hornos industriales, los cuales son equipos productivos que tienen el objetivo de transformar la carga que ingresa, para alcanzar un nivel térmico determinado, para ello es necesario suministrarle energía a la carga, de la manera más rápida posible y conseguir un producto final con propiedades distintas. El presente documento presenta el análisis térmico de un horno industrial en una PyME de manufactura, en el cual se realiza un tratamiento térmico, conocido como esmalte porcelanizado, el cual se aplica con el fin de obtener una mayor resistencia a la corrosión en las piezas fabricadas mediante un recubrimiento superficial vitrificado a las piezas de calentadores y generadores de vapor manufacturados por la empresa. Durante el proceso de fabricación, se utilizan dos hornos industriales, uno de alta temperatura (835°C) y otro de baja temperatura (180°C). El proceso de fabricación de las piezas se realiza de manera intermitente, dependiendo del lote que se desee fabricar.

El horno de alta temperatura es el principal consumidor de energía de la empresa, motivo por el cual, representa nuestro motivo de estudio con el objetivo de lograr un uso eficiente de su energía residual presente en los gases de combustión, planteando un sistema de recuperación de calor, el cual estará aplicado dentro del proceso de producción mediante una cámara de secado para mejorar la productividad y calidad requerida en las piezas.

Problemática

La empresa requiere mejorar la productividad en el proceso de manufactura de sus piezas, la mayor demanda de energía térmica está representada por el consumo de combustible (Gas L.P.) que requieren sus hornos industriales, en especial el horno que realiza un tratamiento de esmalte porcelanizado a alta temperatura.

Justificación

Con base en los resultados del diagnóstico energético, se realizará un análisis termodinámico al horno de alta temperatura, enfocado en el uso eficiente de la energía de desecho presente en los gases de combustión, con el objetivo de reincorporarla al proceso de manufactura de la empresa mediante una cámara de secado.

Objetivos

Objetivo General.

Evaluar el potencial térmico de recuperación de calor en los gases de combustión del horno, reincorporando esa energía a un proceso de producción, optimizando el tiempo de secado de las piezas manufacturadas.

Objetivos específicos

- I. Analizar el balance de energía en el horno y proponer medidas de ahorro o uso eficiente de la energía.
- II. Evaluar las condiciones de la energía presente en los gases de combustión, del horno de alta temperatura.
- III. Evaluar las condiciones del proceso secado de las piezas manufacturadas dentro de la empresa.
- IV. Determinar si la energía de presente en los gases de escape es viable para proponer una cámara de secado.
- V. Realizar un análisis de sensibilidad de la capacidad de secado de las piezas.

Capítulo I

Antecedentes

En el caso de México, el tema de eficiencia energética en la industria se encuentra presente en la LTE, en la *Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios*, en la cual, en su capítulo tres, se analiza el panorama internacional de las energías limpias y de eficiencia energética y se plantea la viabilidad de contar con un mecanismo de mercado, llamado: *Certificados blancos de eficiencia energética*, el cual tiene como objetivo fomentar las inversiones en esta área, que consiste en la emisión por parte de un regulador, que pueda comercializarse entre distintas empresas con obligaciones en términos de eficiencia energética. El Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, manifiesta que las tres características distintivas de este esquema son: el carácter regulatorio y los objetivos asignados, el conjunto restrictivos de acciones permitidas para alcanzar las metas en eficiencia y la evaluación de los mecanismos. Se trata de un mecanismo de contabilidad como un bien comerciable, por ello, dependiendo del contexto del mercado y del marco regulatorio de cada país, se podría adoptar este mecanismo. [12]

El documento *Propuestas de Instrumentos para facilitar medidas de eficiencia energética en el sector industrial de México* de la CONUEE, se plantea la metodología aplicada al fortalecimiento de una hoja de ruta, en la cual, durante su planteamiento y preparación, menciona que hasta 2015, se tenían lagunas en la información existente a potenciales de eficiencia energética en las distintas ramas industriales y sus subsectores. Sin embargo la hoja de ruta concluye que existe un potencial, no aprovechado de eficiencia energética en todas las ramas industriales de los denominados sectores estratégicos, una situación similar se verifica en el sector PyMEs, que puede llegar a representar un porcentaje muy elevado (hasta un 50%) del potencial total identificado, en donde la principal dificultad para intervenir es la poca accesibilidad técnica y financiera para efectuar el pago de consultores y la inversión de las mejoras. Las políticas relacionadas con el aprovechamiento del potencial de eficiencia energética muestran cierto grado de ausencia y transparencia de los beneficios, como elemento impulsor de una mayor y mejor competitividad y productividad. El subsector de industria PyMEs, requiere de atención diferenciada y mejorar su conocimiento y confianza para mejorar su nivel de participación en varios de los programas descritos. [11]

Para el sector industrial, la demanda de energía crecerá en un 100% entre 2013 y 2027, el INECC y la SEMARNAT, publicaron el reporte: *Primer Informe de Actualización ante la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, en el cual se incorporan los siguientes aspectos relacionados con la eficiencia energética:

- Apoyar el aumento a la eficiencia energética y la adopción de mejores prácticas, en particular en PyMEs industriales.
- Formular normas, estándares y un sistema de incentivos para regular el consumo energético industrial futuro, incluyendo mercados de servicios energéticos.
- Adoptar mejores prácticas y conductas tanto en la cadena productiva industrial, como en lo consumidores finales de los bienes.
- Certificar productos generados a partir de tecnologías eficientes.

Marco contextual de la empresa

Con una antigüedad de 36 años, la empresa se dedica al sector de industrias manufactureras¹, en específico a la fabricación y comercialización de calentadores de agua de rápida recuperación y generadores de vapor de uso doméstico, con una jornada laboral de 8:00 a 17:00 horas de lunes a viernes y un área de 3,920 m² entre oficinas, producción y servicios. A continuación se describen las principales actividades del área de producción:

1. Corte. En esta sección se realizan cortes de lámina y de tubos que forman parte de las piezas manufacturadas
2. Rolado. Se da forma cilíndrica o curva a las piezas que lo requieren, generalmente piezas de lámina de acero.
3. Troquelado. En este proceso se realizan perforaciones a láminas de acero que formaran parte del cuerpo de los calentadores.
4. Soldadura: En este proceso se logra la unión de tubos y placas de los calentadores, se tienen seis casetas de soldadura.
5. Decapado: Este tratamiento consta de cinco procesos, cada uno de ellos se realiza en una tina de 700 litros; en las primeras tres, se llevan a cabo el desengrase, decapado y pasivado de tubos y láminas, y en las últimas se realiza la limpieza de impurezas. Se requiere del suministro de agua caliente mediante tres calentadores de agua de diferentes capacidades, con sus respectivas bombas de agua de ½ hp cada una.
6. Vitrificado: Se realiza al interior de un horno que consume Gas L.P. y opera a una temperatura de 830 °C, se aplica a los ensambles de tubos que van al interior de los calentadores fabricados, con el fin de evitar la corrosión durante su ciclo de vida.
7. Curado: Se lleva a cabo en un horno que también consume Gas L.P. y opera a 180 °C, con el fin de la obtener características finales de la aplicación de pintura.
8. Embalaje y almacén. Cuentan con tres polipastos para subir y bajar los productos del almacén.
9. Servicios al empleado. Como parte del consumo eléctrico se tienen dispensadores de agua, horno de microondas, refrigeradores y otros equipos. En el consumo térmico disponen de dos calentadores de agua para el baño diario y dos generadores de vapor que sólo se usan una vez a la semana.

¹ Clasificación 31- 33 “Industrias manufactureras” ,SCIAN 2007

La producción es de tipo intermitente, se procesan lotes de manera diferida, por esa razón, la mayoría de los equipos no se usan de manera continua. El proceso de manufactura requiere de energía asociada para poder consolidarse y posteriormente las piezas se certifican en el laboratorio de calidad de la empresa, el diagrama mostrado en la imagen 1.1, nos muestra el proceso cronológico de transformación de la carga.

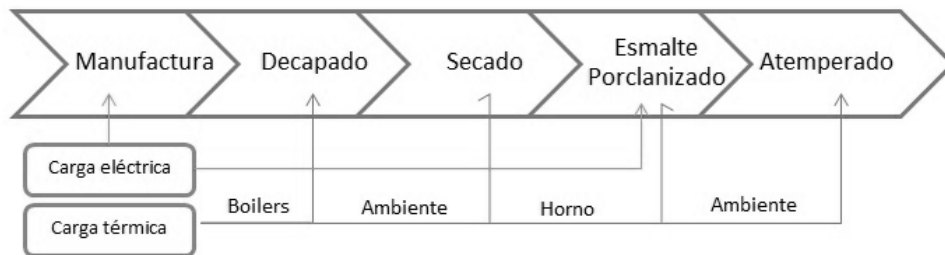


Imagen 1. 1 Proceso de conformado de la carga y tipo de energía asociada

Diagnostico Energético

En el diagnostico energético realizado previamente por el Departamento de Proyectos de Ahorro de Energía (PAE) de la Facultad de Ingeniería, se contabilizaron los dos tipos de energéticos necesarios para el desarrollo de las diferentes actividades de producción durante el periodo 2016 – 2017. En tabla 1.1 se describe la distribución de la demanda durante un año, siendo la energía térmica la más representativa, asociada al consumo de Gas L.P.

Tabla 1. 1 Demanda de energía en la empresa

| Energéticos en la empresa | Demanda anual [MJ] | Porcentaje % |
|---------------------------|--------------------|--------------|
| Electricidad | 241,765 | 29.43 |
| Combustible | 579,834.44 | 70.57 |
| Total anual | 821,599.44 | 100 |

Se ha identificado que los procesos de mayor demanda, son aquellos asociados a un tratamiento térmico (decapado y vitrificado), los cuales no se realizan en serie, ya que, las piezas requieren de un proceso intermedio de secado a condiciones ambiente, el cual dura aproximadamente 24 horas.

La planta cuenta con diez equipos que demandan combustible Gas L.P, tal como se muestra en la tabla 1.2, siendo los hornos industriales los equipos más representativos del consumo de energía.

Tabla 1. 2 Resumen del consumo en equipos térmicos

| Proceso | Equipo | Consumo [kJ/h] | Porcentaje de consumo [%] |
|----------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|
| Porcelanizado | Horno de vitrificado | 311,130.6 | 29.30 |
| Pintura | Horno de curado | 118,139.5 | 11.88 |
| Lavado | Calentador de agua 02 Plus | 125,280 | 11.13 |
| Decapado | Calentador Raptor 9 | 56,160 | 5.29 |
| | Calentador de agua 02 Plus | 125,280 | 11.13 |
| | Calentador Delta 01 | 75,348 | 7.10 |
| Baños | Calentador 02 Plus | 125,280 | 11.13 |
| | Calentador 02 Plus | 125,280 | 11.13 |
| Vapor | Generador de vapor Delta 10 | 12.2 | 1.10 |
| | Generador de vapor Delta 05 | 10.3 | 0.81 |

Situación de los hornos

La empresa cuenta con dos hornos, los cuales poseen diferentes características, ya que, pertenecen a diferentes puntos de la producción, a procesos de tratamiento térmico a distintas condiciones y a la transformación de diferentes tipos de carga, ambos operan hasta que se junta un lote significativo de piezas, en la tabla 1.3 se resumen sus principales características. Ambos hornos se muestran en la imagen 1.9 del anexo. Actualmente no se cuenta con la edad exacta de cada horno, para determinar pérdidas por desgaste.

Tabla 1. 3 Características principales de los hornos instalados

| Tratamiento térmico | Tipo | Temperatura de operación | Aplicación |
|---------------------|------------|--------------------------|--|
| Curado | Convectivo | 180°C | Secado de pintura electrostática superficial de los calentadores |
| Vitrificado | Radiante | 830°C | Vitrificado de piezas internas de los calentadores de agua fabricados en la planta |

Horno de curado

Después de la aplicación de una capa de pintura electrostática, las piezas ingresan al horno para obtener características finales en la superficie, la carga incorporada depende del tipo de pieza que se desee tratar; si son cajas pequeñas se ingresan hasta 65 piezas, y si son cajas grandes solo 30. El estado general del horno es bueno, las puertas y paredes están en buenas condiciones y no existen fugas de calor significativas. A pesar de que es un horno de baja temperatura (180°C) y que el tiempo del proceso es de aproximadamente de 35 minutos, es el segundo equipo más representativo en el consumo de combustible.

Horno de vitrificado

El objetivo de este proceso es dar un tratamiento térmico a los ensambles de tubos que van al interior de los calentadores fabricados, esta aplicación permite que sus piezas ofrezcan mayor resistencia a la corrosión y fenómenos químicos que ocurren dentro de la operación de su producto final, este proceso también es conocido como vitrificado. Se procesan 16 piezas por carga, con una duración de 50 minutos, la temperatura de operación es de 830°C y es el equipo más representativo en el consumo de combustible, sin embargo existe una región en la pared posterior del horno en la cual se detectó una temperatura mayor, justamente en las juntas del precalentador de aire, en donde la pintura del recubrimiento ya se desprendió y existe corrosión considerable, tal como se puede observar en la Imagen 2.1 del anexo. El horno cuenta con un ventilador de tiro forzado de 2 HP.

A continuación en la tabla 1.4 se muestra una breve descripción de las principales características técnicas del horno de vitrificado.

Tabla 1. 4 Características principales del horno de vitrificado

| | |
|--|---|
| Tipo de carga: | Cilindros de acero |
| Tipo de atmosfera interna | Controlada |
| Numero de quemadores: | Cuatro |
| Salidas de gases de escape: | Dos tuberías unidas a una campana de extracción |
| Volumen interno: | 5.134 m ³ |
| Mecanismo de transferencia de calor | Convección |

Instalaciones externas

En el exterior del horno se encuentran las instalaciones no invasivas necesarias para el uso y control del proceso: tren de combustible, ductos de aire e instalación eléctrica, en su mayoría se encuentran instaladas en la parte posterior y lateral (Imagen 2.2 del anexo). Los equipos instalados en la parte posterior (quemadores, precalentadores y campana de extracción), se encuentran colocados de manera simétrica, con lo cual aseguran que la temperatura del aire dentro del horno sea lo más homogénea posible. En la imagen 2.3 del anexo, se muestra el levantamiento de las instalaciones posteriores del horno, con su respectiva nomenclatura.

Instalaciones internas

Ductos radiantes

En cada una de las paredes laterales se encuentran dos juegos de tubos radiantes, colocados en forma de “U”, tienen la función de transferir energía en forma de calor al aire a través de la radiación y dentro ellos se lleva a cabo el proceso de combustión mediante los quemadores ubicados en sus extremos iniciales, por su parte los ductos del centro tienen la función principal de dirigir a los gases producto de la combustión a una campana de extracción. En el transitorio de este proceso se realiza un primer uso eficiente de energía a través de un intercambiador de calor colocado dentro del precalentador de aire, es decir, que una parte del contenido energético de los gases se transfiere al aire de ingreso necesario para la combustión. En la imagen 2.4 del anexo se observa el arreglo de ductos al interior del horno de una pared lateral, también se ejemplifica el sentido de los gases de combustión a través de su paso por los tubos radiantes. Las características principales de los ductos radiantes se resumen en la tabla 1.5

Tabla 1. 5 Características principales de los ductos del horno

| | |
|---|-----------------|
| Material | Acero al carbón |
| Emisividad del material | 0.7 |
| Diámetro interno de ductos radiantes | 10.16 cm = 4 in |
| Espesor de los ductos | 2.4 cm |
| Longitud total de los ductos | 1.80 m x 6 |

Aislantes

Todas paredes del horno se encuentran cubiertas con fibra cerámica refractaria, así como el techo y las compuertas, tal como se puede observar en la imagen 2.5 del anexo, en la parte superior se tiene una pequeña abertura que no está cubierta por aislante, ya que, es el riel de entrada para los polipastos. Los parámetros del recubrimiento se encuentran descritos en la tabla 1.6

Tabla 1. 6 Características principales del aislante

| | |
|------------------------------|--|
| Material | Fibra Cerámica Refractaria |
| Conductividad térmica | $f(\rho)$ es función de la densidad del material |
| Espesor | 27.5 cm |
| Área cubierta | $14.6 m^2$ |
| Volumen total | $3.96 m^3$ |

Carga térmica

Las piezas son sometidas a dos procesos térmicos, un decapado y posteriormente un esmalte porcelanizado (vitrificado), por motivos de calidad, se busca evitar el contacto entre los gases de combustión y las piezas, por ello la transferencia de calor se realiza a través de los ductos radiantes, a esto se le conoce como un proceso de atmosfera controlada, y se realiza con el propósito de mantener la calidad final de las piezas. Las cuales ingresan al horno a temperatura ambiente y a su salida se enfrían a condiciones ambiente, lo que genera un incremento de la temperatura local en el área de operación después del primer ciclo de trabajo del horno. Se introducen al horno dieciséis piezas por ciclo, compuestas por cilindros de acero como las que se muestran en la imagen 2.6 incluida en el anexo.

También se procesan productos de iguales características de menor longitud, en la tabla 1.7 se especifica las propiedades de cada uno de las cargas manufacturadas por la empresa.

Tabla 1. 7 Características de la carga sometida a tratamiento

| Tipo de carga | Tratamiento térmico | Masa kg | Superficie m ² |
|--------------------|--------------------------|---------|---------------------------|
| Cilindros grandes | Previo Decapado | 14.60 | 2.64 |
| | Posterior al vitrificado | 15.150 | |
| Cilindros pequeños | Previo Decapado | 9.100 | 2.18 |
| | Posterior al vitrificado | 9.400 | |

Ciclo térmico del horno

El ciclo comienza cuando se ingresa una canastilla que contiene una carga de aproximadamente 16 piezas, posteriormente se cierra el horno (Imagen 2.7 del anexo) y se monitorea la temperatura al interior mediante un termómetro digital colocado en un costado. Al abrir las puertas para retirar la carga e ingresar la siguiente, se tiene una diferencia de temperaturas entre el horno y la atmosfera local, lo cual provoca una disminución en la temperatura de operación del horno. Este parámetro se utiliza para limitar la duración del tratamiento térmico, ya que, se debe esperar la recuperación térmica de la atmosfera interna.

Con el propósito de identificar potenciales de ahorro de energía en el horno de vitrificado, se segmentó la transformación de la carga durante el ciclo de operación en diferentes el procesos térmicos, los cuales se encuentran descritos en la tabla 1.8, y en la imagen 1.2, la cual está basada en la termografía tomada durante el ciclo.

Tabla 1. 8 Proceso térmico del esmalte porcelanizado dentro del horno

| Ciclo | Proceso |
|-------|---------------------------|
| A 1-2 | Preparación del Horno |
| B 2-3 | Introducción de la carga |
| C 3-4 | Inicio del porcelanizado |
| D 4-5 | Formado del porcelanizado |
| E 6-7 | Extracción de la carga |
| F 7-8 | Recuperación térmica |

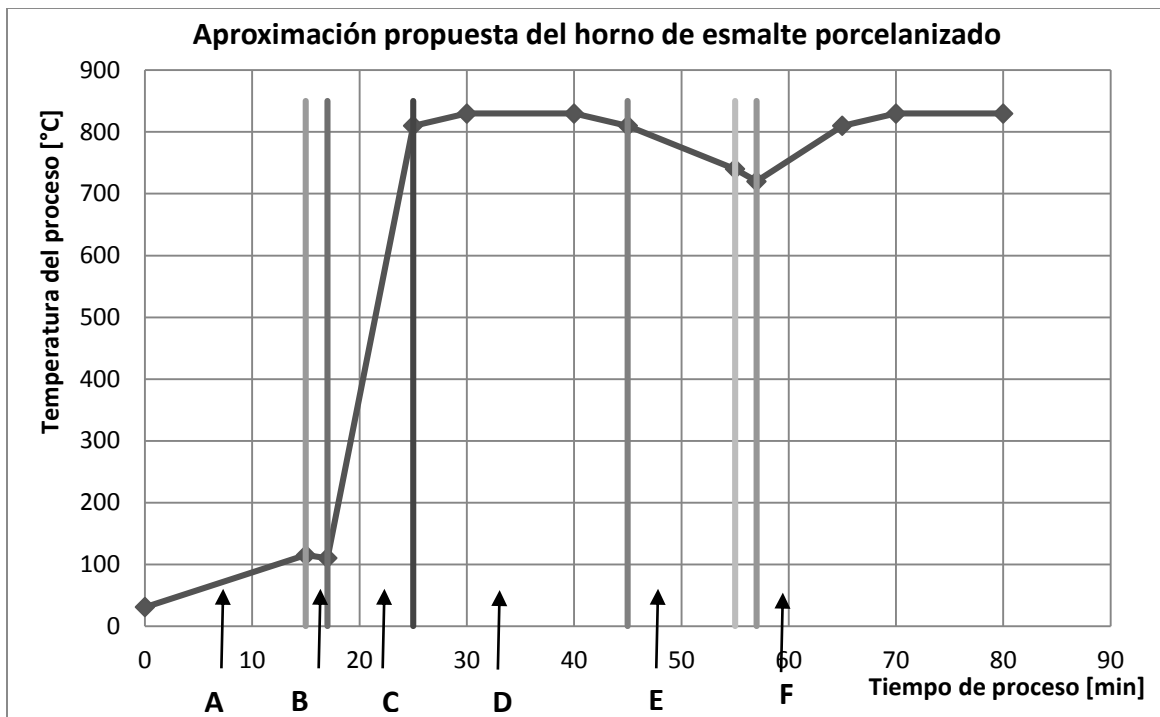


Imagen 1. 2 Ciclo térmico del horno

Intercambio de masa y energía

La transferencia de energía dentro del horno se lleva a cabo mediante diferentes procesos y flujos de energía, los cuales adquieren diferentes propiedades a su paso por los equipos instalados. El fluido de mayor potencial es el combustible (Gas L.P.), el cual se transporta mediante un tren de instalaciones y se distribuye hacia los cuatro quemadores, los cuales cuentan con una estación de control que también regula el flujo de aire necesario para el proceso de combustión. El aire ingresa mediante un soplador que lo distribuye hacia los dos intercambiadores de calor, en donde se le transfiere energía en forma de calor proveniente de los gases de la combustión con el propósito de precalentarse y posteriormente distribuirse hacia los quemadores y realizar el proceso de combustión a estas nuevas condiciones.

Dentro de los ductos radiantes, se lleva a cabo la combustión y se transfiere esa energía a través de su superficie, la cual se emite en forma de radiación hacia el aire contenido dentro del horno, que a su vez se transfiere a la carga con el objetivo de adquirir propiedades diferentes, en este caso en particular, se requiere realizar un tratamiento térmico a las piezas conocido como vitrificado. En la tabla 1.9 se detalla la nomenclatura del gráfico de intercambio de masa y energía de la imagen 1.3

Tabla 1. 9 Nomenclatura del grafo de masa y energía

| Nomenclatura | Equipo | Nomenclatura | Equipo |
|--------------|-----------------------|--------------|--|
| 0 | Sumidero | Q_n | Quemador "n" |
| TC | Tren de combustible | P_n | Precalentador "n" de aire |
| S | Soplador de aire | D | Ductos radiantes |
| C | Carga del horno | A | Aire dentro del horno |
| CE | Campana de extracción | E | Ducto de escape de los gases de combustión |
| e | Electricidad | | |

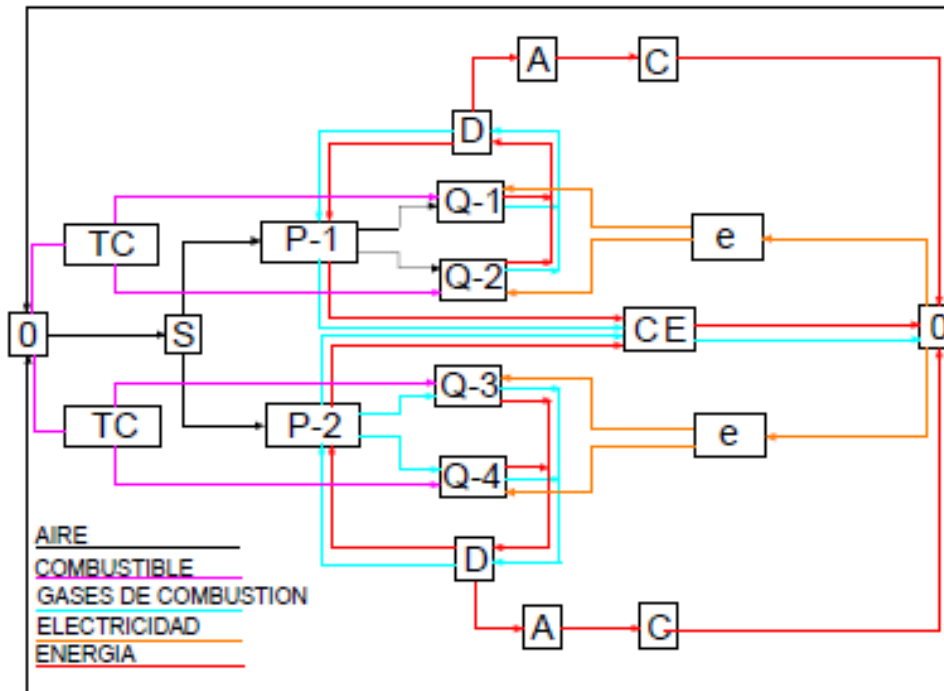


Imagen 1. 3 Grafo de masa y energía

Producción

La empresa manufactura dos modelos de calentadores de agua y uno de generadores de vapor, cada uno con diferentes capacidades volumétricas para uso comercial y domestico residencial. [7]

- Calentador de agua Modelo 1: (10,12,16 y 60 l/m³)
- Calentador de agua Modelo 2: (7 y 9 l/m³)
- Generador de vapor (5,10,15,20,30 y 40 l/m³)

En la tabla 2.1, se muestran los datos de producción del periodo de enero a septiembre de 2017.

Tabla 2. 1 Producción de enero a septiembre de 2017

| | Calentador Modelo 1 | Calentador Modelo 2 | Generador de vapor | Total |
|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------|
| Enero | 92 | 94 | 28 | 214 |
| Febrero | 49 | 49 | 44 | 142 |
| Marzo | 117 | 199 | 44 | 360 |
| Abril | 91 | 172 | 68 | 331 |
| Mayo | 60 | 55 | 32 | 147 |
| Junio | 25 | 68 | 29 | 122 |
| Julio | 93 | 34 | 15 | 142 |
| Agosto | 62 | 89 | 25 | 176 |
| Septiembre | 40 | 51 | 20 | 111 |
| Total periodo | 629 | 811 | 305 | 1745 |

Capítulo II

Marco Teórico Conceptual

Balance energético en hornos industriales

Una de las características principales del proceso en un horno industrial es el consumo de combustible, el cual se determina mediante el cálculo de los componentes del balance de calor, es fundamental que durante las mediciones, las condiciones al final del periodo, sean las mismas que al comienzo; por ello, en los hornos intermitentes las mediciones cubren una carga o ciclo completo, mientras que en los hornos continuos las condiciones de trabajo deben ser suficientemente constantes, para que las pequeñas variables resulten despreciables. Sin embargo el balance de calor de un horno difiere en el tipo de producción, si la producción es continua se debe considerar en kg/h o Ton/h, por otro lado cuando la producción es intermitente, se considera la carga introducida en cada ciclo de operación, en kg o ton. [2]

Componentes del balance de calor

El horno que se analiza en el presente documento, trabaja de manera intermitente, por lo tanto los componentes del balance de calor quedan distinguidos en dos grupos, los que aportan energía al proceso y los receptores de energía del proceso

Aportaciones de calor al proceso:

- 1.- Calor de combustión..... Q_c
- 2.- Calor sensible de precalentamiento de aire..... Q_{pa}
- 3.- Otros aportes..... Q_o

Receptores de calor durante el proceso:

- 1.- Calor sensible de la carga..... Q_s
- 2.- Calor de la atmosfera controlada..... Q_a
- 3.- Calor perdido en los gases de combustión..... $Q_{G.C}$
- 4.- Perdidas de calor en paredes por transferencia simultánea..... Q_p
- 5.- Perdidas de calor por apertura de puertas..... Q_{ap}
- 6.- Calor en los ductos radiantes..... Q_r

Eficiencia de la combustión

La eficiencia del proceso de combustión depende de que los tres elementos combustibles C, H₂ y S reaccionen a una oxidación total asociándose como CO₂, H₂O y SO₂ como productos del proceso, sin que exista combustible no quemado ni oxidación parcial. Para la eficiencia de la combustión, se realiza el cálculo de manera indirecta, se toma como parámetros la relación aire combustible considerando la humedad del aire y el exceso de aire, con respecto a la relación en base seca. [6]

- Relación aire combustible (base seca)..... AC_1
- Relación aire combustible (humedad y exceso de aire)..... AC_2

La expresión de la eficiencia de la combustión, queda definido como:

$$\eta_{comb} = \frac{AC_2 - AC_1}{AC_2} \quad \dots\dots Ec (1)$$

La eficiencia de la combustión se afecta debido a diversos factores como:

1. Tipo y calidad del combustible.
2. Relación adecuada de aire / combustible que permita una combustión completa con muy poco exceso de aire.
3. La cantidad de agua libre del combustible y la formada en el proceso de combustión.
4. La humedad relativa en el ambiente.
5. Mantenimiento de los quemadores y fugas.

Exceso de aire

En la práctica siempre existe un exceso de oxígeno que el requerido teóricamente, en donde el objetivo es asegurar la combustión completa de cada elemento. Este exceso de oxígeno (aire), aumenta las pérdidas de calor sensible de los gases de escape y disminuye la temperatura de flama, un exceso de aire alto produce un mayor gasto de masa y pérdidas en los gases de escape, lo cual se puede corregir con un ajuste de los quemadores. [6]

Eficiencia del horno

Por su parte, la eficiencia del horno, es la relación entre el calor absorbido y el calor aportado, con base en las definiciones anteriores, queda definida de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{Q_s}{Q_e} = \frac{Q_s + Q_a + Q_{G.C} + Q_p + Q_{ap} + Q_r}{Q_c + Q_{pa} + Q_o} \quad \dots\dots Ec (2)$$

Transferencia de calor en el interior del horno

La transferencia de calor en el horno se produce por una combinación de diferentes mecanismos de transporte de energía, cada uno de ellos juega un papel preponderante en algunas circunstancias del ciclo de horneado [5]

Conducción: Este tipo de transferencia de calor, presenta un papel secundario en los hornos, excepto en dos aspectos particulares importantes: las pérdidas de calor a través de las paredes, la cual es determinada por las propiedades de los materiales que la constituyen y el calentamiento de sólidos de gran masa, particularmente en regímenes transitorios. En ambos casos existen dos factores que se deben tomar en cuenta: la resistencia al paso del calor y la difusividad térmica del material [5].

Convección: En este mecanismo de transferencia existen propiedades interesantes para el ahorro de energía mediante alguna de las siguientes maneras [5]:

1. Homogenización de temperaturas del horno.
2. La recuperación de calor de los gases que abandonan la zona de radiación.

El horno analizado en el presente trabajo, la transferencia de calor se realiza mediante la convección natural, ya que, no se cuentan con ventiladores para forzar el movimiento del aire al interior. Para determinar el calor perdido por unidad de área, se calculan los siguientes números adimensionales:

El número de Grashoff

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_a)L_c^3}{\nu^2} \quad \dots\dots Ec (3)$$

El número de Rayleigh

$$Ra = Gr * Pr \quad \dots\dots Ec (4)$$

El número de Nusselt

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387 * Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \quad \dots\dots Ec (5)$$

El coeficiente convectivo

$$Nu = \frac{h * Lc}{k} \quad \dots\dots Ec (6)$$

$$h = \frac{Nu * k}{Lc} \quad \dots\dots Ec (7)$$

Radiación: Cuando el proceso exige de altas temperaturas y densidades de energía calorífica transmitida muy elevadas, es imprescindible utilizar este mecanismo a través de zonas radiantes. La expresión para calcular el calor por radiación, depende de la constante de Stefan- Boltzmann (σ)

Cuando el horno se encuentra a plena carga, se tiene la máxima transferencia de calor a través de los ductos, para unas condiciones medias, la diferencia de temperatura entre la superficie y el interior del horno determina la potencia específica en los ductos. La grafica de la imagen 1.4 permite determinar la potencia, considerando como condiciones máximas en servicio continuo, temperatura del horno de 1000°C y potencia especifica de 4.55 W/ cm² [2].

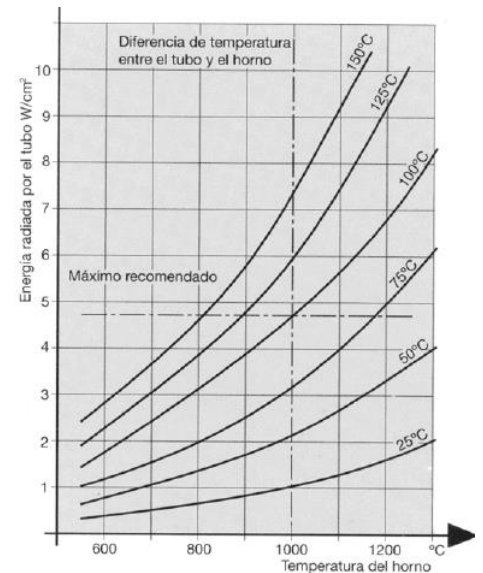


Imagen 1. 4 Potencia en tubos radiantes

Pérdidas de calor en hornos

En el consumo energético de hornos industriales intervienen, la energía absorbida por la carga y las diferentes pérdidas de calor de la instalación que pueden agruparse en:

- Pérdidas de calor en las paredes
- Calor almacenado en los revestimientos
- Pérdidas por puertas y aberturas
- Pérdidas a través del agua de refrigeración
- Calor de los gases de combustión
- Influencia del exceso de aire

Pérdidas de calor en las paredes

Las pérdidas de calor a través de las paredes dependen fundamentalmente de las características de aislamiento de los materiales empleados en su construcción, y la transmisión de calor simultánea a través de ellas, las cuales se dan por radiación y convección natural, se calculan en cada una de ellas con sus respectivas condiciones de operación, en este caso cuando el horno se encuentra en su carga máxima.

Para calcular la transferencia de calor por convección natural en el horno, es necesario identificar las temperaturas de superficie de las paredes, la de referencia y la local promedio, si es posible mediante una cámara termográfica y un higrómetro, posteriormente conocer las propiedades del aire correspondientes a la temperatura. Con base en estos parámetros se realiza el cálculo de los siguientes números adimensionales: Grashoff, Rayleigh y el número de Nusselt para determinar el coeficiente de convección. En el caso de la radiación, se debe de determinar la emisividad de la superficie de las paredes del horno, la cual depende del tipo de material, es importante colocar este valor en el análisis de las imágenes térmicas, para obtener una buena aproximación de las temperaturas emitidas en la superficie.

Aislantes

El campo de los aislantes térmicos es amplio, aparentemente su único objetivo es aislar el interior de hornos, calderas o tuberías con un doble propósito; reducir las pérdidas de calor y conseguir en el entorno unas condiciones aceptables para la manipulación entre el operario y la carga. [3]

Realmente las condiciones del aislante al interior deben ser capaces de cumplir con los siguientes parámetros generales:

- Soportar el ambiente al interior (humos, aire, gases, etc.)
- Contener sin reacción química en términos generales metales o no metales fundidos a alta temperatura.

Por ello, el aislamiento térmico puede requerir resistencia al ataque químico, a la abrasión, al desgaste, etc., lo cual es vital para la selección de un aislamiento correcto, en donde la temperatura de trabajo no es el único parámetro a considerar [3].

La selección de aislantes es relevante en la construcción de un horno con el fin de disminuir las pérdidas de calor excesivas, por consiguiente un consumo de combustible desmedido, por ello, es importante que el horno cuente con aislante en paredes, techos, puertas y chimenea. El horno de alta temperatura de la empresa cuenta con fibra cerámica refractaria como aislante.

Fibras cerámicas

Es una fibra vítrea sintética que contiene aluminio o silicatos de calcio, trazas de óxidos y metales. Algunas de las aplicaciones de la fibra cerámica refractaria en diferentes sectores de la industria [1]:

- Metalúrgica: Hornos de forja, de recocido continuo, de tratamiento térmico, de recocido.
- Cerámica: Hornos para arcilla, para vidrieras, para abrasivos de adhesión.

Las fibras cerámicas son ampliamente utilizadas en procesos de aislamiento térmico llegando a aislar temperaturas cercanas a 1500°C. Para su fabricación se funden materiales aluminosos de diversos contenidos de alúmina y en el vertido se produce la fibrilación por soplado con aire comprimido o vapor, o por centrifugado con lo cual se forman fibras más largas y menor contenido de polvo, normalmente se fabrica en cuatro tipos de calidades tal como se muestra en la tabla 2.2 [3]:

Tabla 2. 2 Calidades de la fibra cerámica

| Composición | Temperatura máxima de empleo |
|--|-------------------------------------|
| 40 % Al₂ O₃ | 1000 °C |
| 48 % Al₂ O₃ | 1250 °C |
| 56% Al₂ O₃ | 1400 °C |
| 85% Al₂ O₃ | 1600 °C |

Las fibras cerámicas se producen en mantas de diferentes densidades comprendidas entre 150 y 130 kg/m³ y se suministran en forma de papel, cartón, fieltro húmedo, placas rígidas, piezas de forma, tejido, etc. Tienen un calor específico medio de 0.27 kcal/k°C [3]. Sus propiedades son:

1. **Rendimiento térmico elevado**, por su baja conductividad y su enormemente reducida capacidad de acumulación de calor.
2. **Facilidad de instalación**, así como de reparación, mucho mayor que las construcciones a base de ladrillo
3. **Resistencia al choque térmico**, muy elevada por su propia naturaleza fibrosa que permite calentamientos y enfriamientos sin limitación de velocidad.
4. **Puesta en funcionamiento inmediato**, al instalarse totalmente en seco.
5. **Excelente coeficiente de absorción sonora**.

Eficiencia energética en un horno

En el análisis energético de un horno los mejores resultados de eficiencia energética, se consiguen al alcanzarse la mayor transferencia de calor a la carga introducida y al minimizar las pérdidas de todo tipo, ya que, dentro del horno ocurren diferentes fenómenos de transporte de energía como la convección y radiación, por ello la localización y cuantificación de las pérdidas es el primer paso para determinar medidas de ahorro de energía [5].

Existen diversas modalidades para disminuir el consumo de energía en hornos, según la naturaleza de las pérdidas [5]:

- Recuperación de calor de los gases de combustión
- Recuperación de calor de la materia prima o carga
- Disminución de las pérdidas por las paredes del horno
- Operar con el exceso de aire mínimo preciso
- Instalar precalentadores de aire a la entrada del horno o de los quemadores
- Mantenimiento de los quemadores: Buscar la ausencia de productos residuales de la combustión incompleta (inquemados, hollin, h₂, CO)

La energía necesaria para conseguir las transformaciones de la carga pueden proceder de dos orígenes; el primero, se obtiene de un combustible al liberar energía química almacenada mediante el proceso de combustión, el segundo es la energía térmica que se obtiene por precalentamiento de aire. [5]

El ahorro de combustible por precalentamiento de aire, consiste de varios factores; la temperatura de los humos, el exceso de aire presente en la combustión, y la temperatura a la que se desea precalentar el aire, lo cual depende del pinch point del intercambiador de calor. La gráfica de la imagen 1.5 muestra la relación entre las tres variables y su gama de ahorro de energía [4]

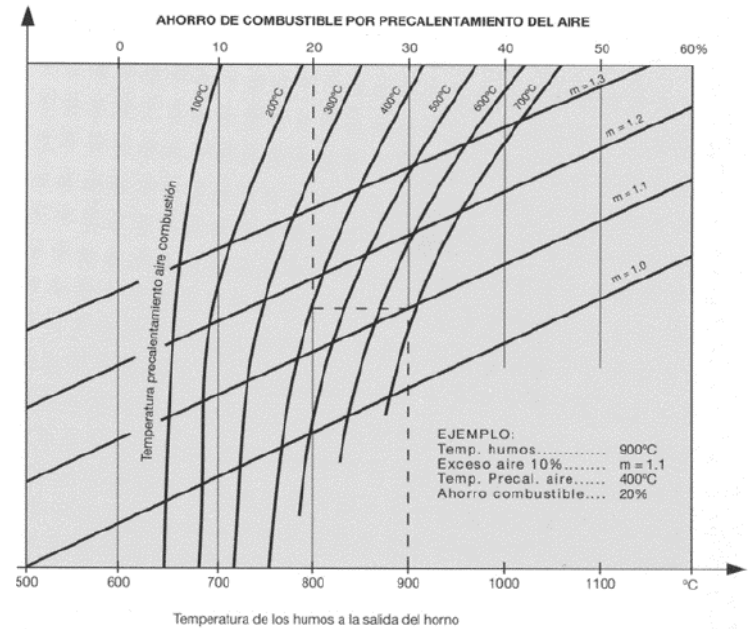


Imagen 1. 5 Gráfica de ahorros de energía por precalentamiento

Recuperadores de calor

La recuperación de calor utilizada en hornos industriales, calentados por combustibles líquidos y gaseosos, se realiza mediante:

1. Precalentamiento de la carga
2. Generación de vapor, calentamiento de agua o aire
3. Precalentamiento del aire de combustión

El precalentamiento de la carga es normalmente un método ideal de recuperación de calor, especialmente en hornos de operación continua; consiste en alargar la cámara de entrada, haciendo que los humos se pongan en contacto con la carga que avanza.

Los tipos de recuperadores de calor, se pueden clasificar en el modo de transferencia de calor de los humos al aire de combustión y se distinguen en tres maneras [4]:

1. Recuperadores por radiación
2. Recuperadores por convección
3. Recuperadores combinados de radiación y convección

Recuperadores por radiación

Se utilizan cuando la temperatura de los gases de combustión es elevada (superior a 1000-1100 °C) y cuando contienen una gran cantidad de polvo. La pérdida de presión es muy pequeña, su eficiencia a bajas temperaturas es muy reducida, únicamente pueden montarse en posición vertical y el diámetro máximo aceptable es de 2 m, la pequeña superficie de contacto con los humos evita el ensuciamiento y a la corrosión queda notablemente disminuida [4].

Recuperadores de convección

Son normalmente tubulares, presentan una gran superficie y en eficacia y costo resultan altamente competitivos, pueden colocarse en posición horizontal, vertical o inclinada. Cuando la temperatura de los humos es elevada, se reduce diluyendo aire a temperatura ambiente. La pérdida de presión de los humos es grande y debe reconsiderarse el tiro de la chimenea antes de su instalación. [4]

Recuperadores de combinados

Estos dispositivos tratan de reunir las ventajas de los de radiación con la distribución compacta de los tubulares o de convección. Comprenden una camisa de intercambio por radiación y un haz tubular para la convección, su instalación es preferentemente vertical y permiten operar humos hasta 1300°C, consiguiendo precalentar el aire de combustión hasta 650°C. [4]

Procesos de manufactura en la empresa

Proceso de decapado

Con el fin de lograr un buen vitrificado las piezas deben de estar libres de sustancias perjudiciales, como pueden ser grasas y óxidos, a este proceso se le conoce como “Decapado”. [8]

El sistema para este tratamiento se compone de inmersiones de las piezas en tanques, el proceso más común en la aplicación, se describe a continuación. Tanque de desengrase

1. Tanque de enjuague
2. Tanque para el acido
3. Tanque de enjuague del ácido
4. Tanque para la aplicación de Níquel
5. Tanque de enjuague
6. Tanque de neutralización del acido
7. Secado de las piezas

Sin embargo, la empresa presenta un proceso de cinco tanques, a las temperaturas necesarias para el tratamiento de sus piezas, en la tabla 2.3, se muestra las características en cada paso mientras que en la imagen 2.8 del anexo se muestra el área de decapado de la empresa.

Tabla 2. 3 Proceso de decapado de la empresa

| Número de tanque | Tratamiento térmico | Rango de operación | térmico | de | Tiempo de operación | de |
|------------------|---------------------|--------------------|---------|----|---------------------|----|
| # | Sustancia | | [°C] | | [min] | |
| 1 | Desengrase alcalino | | 60-90 | | 15-30 | |
| 2 | Enjuague | | 25-40 | | 1 | |
| 3 | Decapado | | 60-70 | | 15-30 | |
| 4 | Enjuague | | 25-40 | | 1 | |
| 5 | Pasivado | | 50-70 | | 1-2 | |
| 6 | Secado | | 25 | | 24 [hrs] | |

Proceso de esmalte porcelanizado

El tratamiento térmico conocido como esmalte porcelanizado es un acabado superficial inorgánico fundido a un metal a temperaturas en un rango entre 480°C y 1000°C, lo cual varía por el tipo de metal, de esmalte y aplicación del acabado. El término “vidrio en metal o vitrificado” quizá sea el más descriptivo para señalar la durabilidad y características de la superficie del metal y aplicación a diversos procesos y productos. [8]

A grandes rasgos, el esmalte porcelanizado es una capa de vidrio aplicada a un metal, la cual debe de estar elaborada de tal manera que sea homogénea, es decir, que lo cubra completamente, sin perder las rasgos originalmente en la pieza. El vidrio para esmalte porcelanizado, visto a microscopio, contiene pequeñas burbujas, por lo tanto, la superficie esmaltada final tiene una textura que varía entre la pintura orgánica horneada y la textura del vidrio pulido. [8]

Existen muchas formas de obtener el vidrio para esmaltar, una de ellas es introducir vidrio fundido en agua, de tal manera que al contacto con ella, el vidrio se fragmenta debido a un choque térmico, produciendo infinidad de pequeñas partículas que en su conjunto se llaman “frita”. Otro método para obtener la frita, con la granulometría debida para su aplicación, es rolar una hoja de vidrio entre dos rodillos enfriados por agua, a esta última se le conoce como “frita escamada”. Las propiedades físicas a considerar en la composición del vidrio son principalmente. [8]

- Expansión
- Temperatura requerida para fundir el vidrio
- Solubilidad en agua
- Compatibilidad con el metal
- Retención de sus propiedades tras repetidos procesos cercanos al punto de fusión

El esmalte aplicado, está hecho principalmente de frita diluida en agua con varias adiciones de molienda como arcillas y productos químicos, estas variaciones le otorgan diversas características a la solubilidad del esmalte, lo cual impacta en el grosor y durabilidad de los productos bajo este proceso. El proceso general para el tratamiento térmico de esmalte porcelanizado, se describe a continuación. [8]

1. Preparación de la frita
2. Preparación del esmalte
3. Aplicación del esmalte (Decapado)
4. Secado
5. Inspección de la calidad de la producción
6. Aplicación del vitrificado (Esmalte porcelanizado)

Indicadores energéticos

El sector industrial es heterogéneo y de gran complejidad, no hay una definición única respecto a lo que se debe incluir o no dentro de él. Las clasificaciones de las actividades (valor económico añadido o índice de producción física), no necesariamente concuerdan de forma directa con la asignación del consumo energético. En general, el sector industrial incluye actividades como; la manufactura de bienes y productos, minería y extracción de materias primas, y la construcción, sin embargo hay algunas que se encuentran excluidas de sector, como son; la generación de energía eléctrica y calor comercial, las refinerías, la distribución de agua, electricidad y gas.

La energía es un factor clave para todos los productos manufacturados. Manteniendo todos los otros parámetros constantes, un aumento en la producción industrial generalmente dará lugar a un aumento en el consumo de energético; dado que la mayoría de los procesos tienen componentes fijos y variables en su funcionamiento, cuando la demanda de productos de un cierto proceso disminuye, la intensidad energética aumentará. Esta relación entre la energía y la producción, está influenciada por varios factores, algunos de ellos son: la antigüedad promedio de las plantas, las prácticas de mantenimiento, la calidad de la energía utilizada, la calidad del producto manufacturado, las materias primas y la calidad requerida del producto. Sin embargo, se reconoce que un análisis exacto de la eficiencia energética en el sector, requiere de un estudio más detallado para cada proceso utilizado en la industria.

Para desarrollar indicadores en el sector industrial, el primer factor clave es desarrollar indicadores agregados para entender la importancia del sector industrial en la economía, tal como se observa en la imagen 1.6, luego se necesitarán indicadores por sub sector-industrial para evaluar dónde y cómo se utiliza la energía, y donde hay mayor potencial para reducir el consumo. Deben desarrollarse indicadores más representativos para asegurar que las políticas y acciones tendentes a reducir el consumo energético están siendo dirigidas a las áreas donde existe potencial.

Para el análisis realizado en este documento, se realizarán indicadores de nivel 4 (De proceso) que corresponden a un proceso de uso eficiente de la energía, actualmente en la AIE no se tiene una base de datos de usos finales de la energía en este sector, sin embargo, la información en forma parcial para este nivel, podría ayudar a explicar las tendencias en consumo energético.

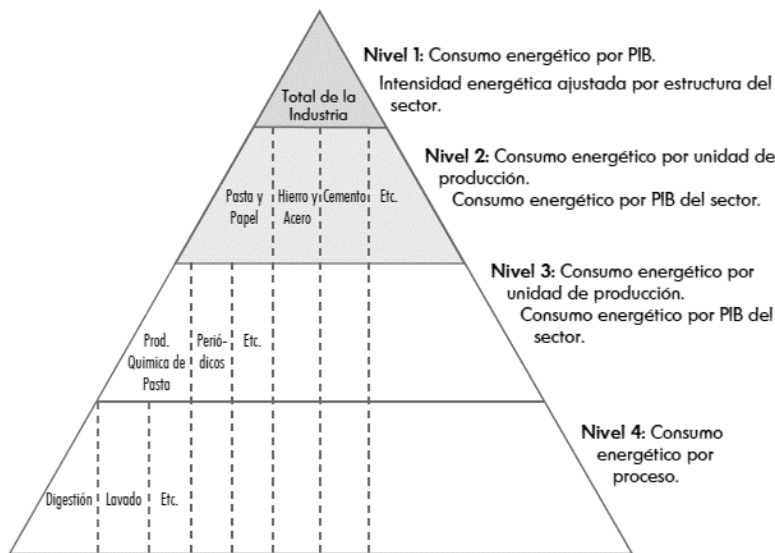


Imagen 1.6 Pirámide

Capítulo III

Metodología

En el análisis energético del horno, se pondera la cuantificación del consumo térmico, por ser el más representativo, y para ello se inicia con el cálculo del balance de energía necesario para el proceso, el cual incluye las aportaciones y los distintos usos durante la duración del tratamiento térmico. Un indicador del uso de la energía es la eficiencia del horno, sin embargo se aporta energía a través del proceso de combustión por lo cual también es importante conocer los parámetros bajo los cuales se está realizando este proceso químico.

Calor sensible en la carga

Durante el tratamiento térmico, la carga adquiere energía en forma de calor presente en el aire, hasta que alcanza el punto óptimo de temperatura, y se mantiene a esas condiciones durante 20 minutos aproximadamente. Cuando es retirada del horno, las piezas aún tienen contenido energético y se mantienen a condiciones ambiente hasta alcanzar el equilibrio termodinámico, por lo cual la temperatura local aumenta. Como la carga almacena energía, también se cuantifica para el balance de calor.²

$$Q_s = m_{carga} C_{p_{acero}} \Delta T \quad \dots\dots Ec (8)$$
$$Q_s = 16 * 15.150 \text{ kg} * 0.52 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} - \text{K}} * (1103.15 - 298.15)[\text{K}]$$
$$Q_s = 101.46 \text{ MJ}$$

Calor de la atmosfera controlada

El horno, realiza una serie de procesos de transferencia de calor en diferentes medios, uno de los principales, es el aire que se encuentra contenido en su interior, el cual le cede esa energía a las piezas, dentro del balance se debe contabilizar la energía necesaria para llegar a 830°C. Para el cálculo de la densidad del aire se tomaron las siguientes condiciones ambiente, presión local de 77 KPa, temperatura del aire de 1200°C

$$\rho_{aire} = 0.3008 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para el calor del aire (Q_a) al interior se tiene:

$$Q_a = m_{aire} C_{p_{aire}} * \Delta T \quad \dots\dots Ec (9)$$

Calculando la masa de aire:

$$m_{aire} = V_{aire} * \rho_{aire}$$
$$m_{aire} = 5.11 \text{ m}^3 * 0.3008 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$
$$m_{aire} = 1.55 \text{ kg}_{aire}$$

Por lo tanto, de la ecuación 9:

$$Q_a = 1.53 \text{ kg}_{aire} * 1.169 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} (1105.15 - 298.15)^\circ\text{C}$$
$$Q_{aire} = 1.19 \text{ MJ}$$

² La carga almacenada en el horno, son 16 piezas por ciclo, las piezas salen a 800°C, aproximadamente

Calor de los gases de escape

Análisis de los gases de combustión

Con el objetivo de cuantificar la máxima disponibilidad de energía presente en los gases, las mediciones se realizaron cuando el horno se encuentra a plena carga³ con el analizador de gases ORSAT, los resultados del analizador mostraron una eficiencia de la combustión de 79.4% y un exceso de aire promedio de 33.7%. Los gases a la salida de la chimenea tienen una temperatura promedio de 306.6 °C, sin embargo también se realizaron mediciones de temperatura en la chimenea del horno con la cámara termográfica, las cuales se muestran en la imagen 2.9 del anexo, las cuales coinciden con las mostradas por el analizador. A continuación en la tabla 2.4 se muestran las mediciones más altas registradas por el analizador. [7]

Tabla 2. 4 Mediciones de Gases de Combustión

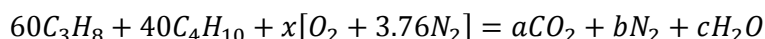
| Parámetros de registro | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Promedio |
|--|------------|------------|------------|----------|
| Temperatura de salida de gases de combustión | 304 °C | 308 °C | 308 °C | 306.6°C |
| CO2 (%) | 10 % | 10.1% | 10.1 % | 10.06 % |
| O2 (%) | 5.7 % | 5.7% | 5.6 % | 5.6 % |
| CO(ppm) | 2 | 0 | 0 | 0.6 |
| NOx (ppm) | 208 | 211 | 211 | 210 |
| SOx (ppm) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Exceso de aire | 34.1 % | 33.6 % | 33.4 % | 33.7 % |

Es necesario conocer la masa de los gases de combustión que están escapando por la chimenea y su contenido energético para determinar el calor que se está desechando al ambiente y su posible uso en alguna otra aplicación que requiera de energía. Es necesario realizar el análisis estequiométrico y calcular la relación de aire/combustible necesaria para este tipo de proceso.

Balance estequiométrico

Combustión completa

A continuación se muestran los análisis de la combustión, partiendo de la ecuación estequiometría para la reacción del Gas LP, tomando los porcentajes de los combustibles de la hoja de datos de seguridad para sustancias químicas de PEMEX [6], se tiene que:



Por lo tanto el balance teórico en moles, queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} [0.0136C_3H_8 + 0.007C_4H_{10}] + 0.1135[O_2 + 3.76N_2] & \dots\dots Ec (10) \\ = 0.0688CO_2 + 0.426N_2 + 0.0894H_2O & \end{aligned}$$

La relación aire / combustible del proceso de combustión, de manera teórica, se especifica a continuación.

³ Las mediciones se realizaron en el intervalo del inicio del porcelanizado hasta la extracción de la carga (Gráfica 1.1)

$$AC_{teorico} = 15.59 \frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$$

Combustión Incompleta

Con los datos del analizador de gases, se obtuvo la media de cinco mediciones, con porcentajes peso de 5.71% de O_2 y de 10.04% de CO_2 . Con estos porcentajes, se realiza el balance de los moles presentes en la reacción y en la tabla 2.5 se comprueba que la suma de las fracciones molares de los productos corresponde a la unidad.

$$y[0.0136C_3H_8 + 0.007C_4H_{10}] + x[O_2 + 3.76N_2] = 1.7843 \times 10^{-3} O_2 + 2.282 \times 10^{-3} CO_2 + aN_2 + bH_2O$$

Por lo tanto, el balance queda expresado en moles, de la siguiente manera:

$$0.0331[0.0136C_3H_8 + 0.007C_4H_{10}] + 4.80 \times 10^{-3} [O_2 + 3.76N_2] = 1.7843 \times 10^{-3} O_2 + 2.282 \times 10^{-3} CO_2 + 0.01806N_2 + 1.479 \times 10^{-3} H_2O$$

Tabla 2. 5 Fracciones molares de los productos de la reacción de combustión

| Compuestos | % |
|------------|--------|
| O2 | 7.56 |
| CO2 | 9.67 |
| N2 | 76.56 |
| H2O | 6.26 |
| Total | 100.00 |

Se debe de considerar la humedad presente en aire de ingreso a los quemadores cuando el horno se encuentra a plena carga, la humedad relativa de sitio es de aproximadamente del 60% Las condiciones ambiente del sitio son $P_{atm} = 77 KPa$ y $T_{amb} = 30^\circ C$, la presión de saturación en la mezcla a esta temperatura es ($P_g = 3.1657 KPa$)

Se determina la presión parcial correspondiente del vapor en la mezcla de aire, se tiene que:

$$P_v = \phi P_g \quad \dots\dots Ec (11)$$

$$P_v = (0.6) * 3.1657 KPa$$

$$P_v = 1.899 KPa$$

$$P_a = 75.10 KPa$$

Se considera al aire como gas ideal y calculando la masa de aire en la mezcla:

$$m_a = \frac{75.10 KPa * 1 m^3 * 29 \frac{gr}{mol}}{8.3143 \frac{KJ}{kmol K} (298.15)K}$$

$$m_a = 0.878 gr_{aire}$$

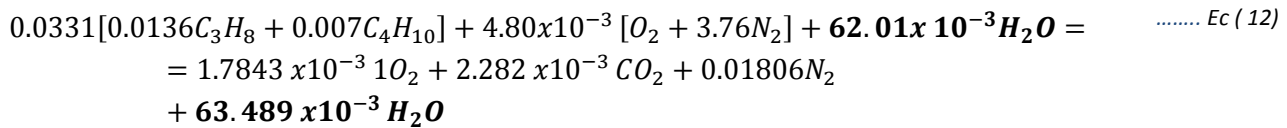
$$m_v = 0.112 gr_{agua}$$

Es necesario conocer los moles de agua presente en la mezcla para añadirlos al balance:

$$M = \frac{m_v}{m_{agua}} = \frac{0.112 gr_{agua}}{18.06 \frac{gr_{agua}}{mol}}$$

$$M = 62.01 \times 10^{-3} mol$$

Por lo tanto el balance estequiometrico quedaría de la siguiente manera:



Relación aire combustible

Con base en los moles presentes en la reacción, se calcula la relación aire-combustible:

$$AC_r = \frac{29 \frac{kg_{aire}}{kmol} * 4.80 \times 10^{-3} * 4.76}{0.0136 * 0.0331 (12 * 3 + 8) \frac{kg_{comb}}{kmol} + 0.007 * 0.0331 (12 * 4 + 10) \frac{kg_{comb}}{kmol}}$$

$$AC_{real} = 20.71 \frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$$

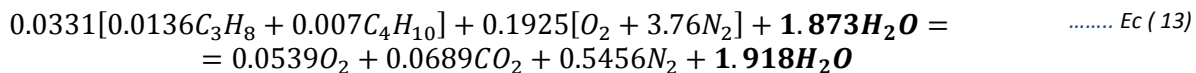
Exceso de aire

El exceso de aire, se cuantifica del cociente entre las relaciones de aire / combustible del proceso real y teórico:

$$\%Exceso\ de\ aire = \frac{AC_{real}}{AC_{estequiometrico}} - 1$$

$$\%Exceso\ de\ aire = 32.78\% [kg_{aire}]$$

Considerando un exceso el aire del 32.57%, el balance estequiometrico normalizado, se expresa de la siguiente manera:



La relación aire / combustible también es aplicable para el gasto de ambos fluidos, de esta manera se conoce el gasto de los gases de combustión.

$$R = \frac{\dot{M}_{aire}}{\dot{M}_{combustible}} \dots\dots Ec (14)$$

De los datos del diagnóstico energético se obtuvieron lecturas del gasto de combustible en la toma principal es, con lo cual es posible determinar el gasto de aire.

$$\dot{M}_{combustible} = \frac{0.048m^3}{67\ seg} = 7.164 \times 10^{-4} \frac{m^3}{seg} * 2.46 \frac{kg}{m^3} = 1.762 \times 10^{-3} \frac{kg}{seg}$$

$$\dot{M}_{combustible} = 1.762 \times 10^{-4} \frac{kg_{combustible}}{seg}$$

$$\dot{M}_{aire} = \dot{M}_{combustible} * R = 20.71 \frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}} * 1.762 \times 10^{-3} \frac{kg_{combustible}}{seg}$$

$$\dot{M}_{aire} = 0.0349 \frac{kg_{aire}}{seg}$$

Por lo tanto, es posible determinar el gasto de los gases de combustión.

$$\dot{M}_{humos} = \dot{M}_{aire} + \dot{M}_{combustible} \dots\dots Ec (15)$$

$$\dot{M}_{humos} = 0.03667 \frac{kg_{humos}}{seg}$$

Para determinar el calor específico en los gases de escape, se tiene que determinar el calor específico de cada uno de sus componentes.

$$Cp_{G.C.} = Cp_{O_2} + Cp_{CO_2} + Cp_{N_2} + Cp_{H_2O} \quad \dots\dots Ec (16)$$

En la tabla 2.6, se muestran los coeficientes de los polinomios para el cálculo del Cp ^[10]

Tabla 2. 6 Calculo de la entalpia de la composición de los gases de combustión

| Compuesto | a | B (E-03) | C (E-06) | D (E-09) | ma | mb (E-03) | mc (E-06) | md (E-9) |
|--------------|------|----------|----------|----------|--------|-----------|-----------|----------|
| CO2 | 22.2 | 59.8 | -35.0 | 7.47 | 1.98 | 5.34 | -3.13 | 0.667 |
| O2 | 25.4 | 15.2 | -7.16 | 1.31 | 1.29 | 0.772 | -0.364 | 0.0667 |
| N2 | 28.9 | -1.57 | 8.08 | -2.87 | 21.50 | -1.17 | 6.01 | -2.14 |
| H2O | 32.2 | 1.92 | 10.6 | -3.59 | 3.72 | 0.22 | 1.22 | -0.415 |
| Total | | | | | 28.514 | 5.17 | 3.74 | -1.82 |

El modelo de solución queda de la siguiente manera:

$$Cp_{G.C.} = \sum_{O_2}^{h_2O} \int_{T_0}^t Cp(T)dT + h \text{vap}_{H_2O} \quad \dots\dots Ec (17)$$

$$\Delta h = m_{O_2} \int_{T_0}^t Cp_{O_2}(T)dT + m_{CO_2} \int_{T_0}^t Cp_{CO_2}(T)dT + m_{N_2} \int_{T_0}^t Cp_{N_2}(T)dT$$

$$+ m_{H_2O} \int_{T_0}^t [Cp_{H_2O}(T)]dT + h \text{vap}_{H_2O}$$

$$Cp_{G.C.} = 1.096 \frac{KJ}{kg - K}$$

Por lo tanto:

$$Q_{G.C.} = m_{G.C} Cp_{G.C.} \Delta T \quad \dots\dots Ec (18)$$

$$\dot{Q}_{G.C.} = 0.03667 \frac{kg_{humos}}{seg} * 1.096 \frac{KJ}{kg - K} * (579.65 - 298.15)[K]$$

$$\dot{Q}_{G.C.} = 11.31 \frac{KJ}{s}$$

Si la operación del horno permanece a estas condiciones a plena carga de operación⁴ el calor presente en los gases de combustión por ciclo, será.

$$\dot{Q} = 11.31 \frac{KJ}{s} * 1200 [s]$$

$$Q_{G.C.} = 13.57 MJ$$

Calor perdido en las paredes

Las pérdidas de calor a través de las paredes del horno se dan por radiación y convección natural, con base en el plano del horno mostrado en la imagen 3.1 del anexo, se calculan las pérdidas en cada una de las paredes con sus respectivas condiciones de operación, tomando en cuenta el periodo cuando de carga máxima durante el proceso. En la tabla 2.7, se muestran los valores para cada una de ellas.⁵

⁴ De acuerdo a la gráfica 1.1, el periodo de máxima carga es de 20 minutos, las mediciones con el analizador se tomaron en ese intervalo de tiempo.

⁵ La memoria de cálculo de las pérdidas de calor, se encuentra en el anexo.

Tabla 2.7 Parámetros y pérdidas de calor en las paredes del horno.

| | Pared | | | |
|---|-----------|-------------------|-----------------|--------------------|
| | Posterior | Lateral Izquierda | Lateral Derecha | Frontal |
| Área (m ²) | 2.22 | 3.17 | 3.17 | 2.22 |
| Tiempo del proceso (seg) | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |
| Pérdidas por convección (W) | 119.82 | 44.8 | 9.75 | 113.21 |
| Pérdidas por radiación (W) | 4,048.76 | 1,416.01 | 287.44 | 4,828.54 |
| Total (W) | 4,168.58 | 1,460.81 | 296.61 | 4,961.10 |
| Total (KJ) | 5,002.301 | 1,752.97 | 355.93 | 5,954.10 |
| Total por transferencia simultanea | | | | 13,065.3 KJ |

Calor perdido por apertura de puertas

Al final de cada ciclo del horno, las puertas se abren para poder extraer la carga, por lo cual, el horno pierde contenido energético cuando el aire escapa hacia los alrededores. Se estima que se pierde el 10% de la masa de aire del interior del horno.

$$Q_{ap} = m_{aire} C_{p_{aire}} * \Delta T \quad \dots\dots Ec (19)$$

$$Q_{ap} = 0.457 \text{ kg}_{aire} * 1.169 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} (1105.15 - 298.15)^\circ\text{C}$$

$$Q_{aire} = 431.12 \text{ KJ}$$

Calor en los ductos radiantes

Durante el diagnostico energético, no fue posible realizar lecturas con la cámara termográfica al interior del horno durante su ciclo de operación, por esta razón se desconoce la temperatura a la que irradian los ductos, sin embargo con la finalidad de transferir el calor a través de ellos, se ha elegido una diferencia de temperatura de 50°C entre la temperatura de la superficie de los ductos y el aire.

De la gráfica 1.2 se tomaron datos y se ajustaron a un modelo polinómico, con el objetivo de tener una ecuación para cada una de las curvas. En la gráfica de la imagen 1.6, se muestra el ajuste de los datos, los modelos polinómicos para cada ΔT, se muestran a continuación en la tabla 3.2

Tabla 3. 1 Polinomios para distintos ΔT entre la superficie de los ductos y el aire

| ΔT [°C] | Ecuación de ajuste |
|---------|---------------------------------------|
| 25 | $y = 2x10^{-6}x^2 - 0.0015x + 0.6649$ |
| 50 | $y = 3x10^{-6}x^2 - 0.0019x + 0.7514$ |
| 75 | $y = 7x10^{-6}x^2 - 0.0057x + 2.2554$ |
| 100 | $y = 4x10^{-6}x^2 - 0.0006x + 0.1014$ |
| 125 | $y = 1x10^{-5}x^2 - 0.0088x + 3.7237$ |
| 150 | $y = 1x10^{-5}x^2 - 0.0116x + 4.9076$ |

Se realizó una segunda visita a la empresa, con el objetivo de tomar mediciones internas del horno, en estado estable, durante este levantamiento se tomaron las medidas de los ductos, con el propósito de calcular la superficie, el área total de ambos juegos de ductos, es 4712.4 cm².

$$Q_r = Q_t * A$$

$$Q_r = 1.24 \frac{W}{cm^2} * 4712.4 cm^2 * 2700 s$$

$$Q_r = 15.77 MJ$$

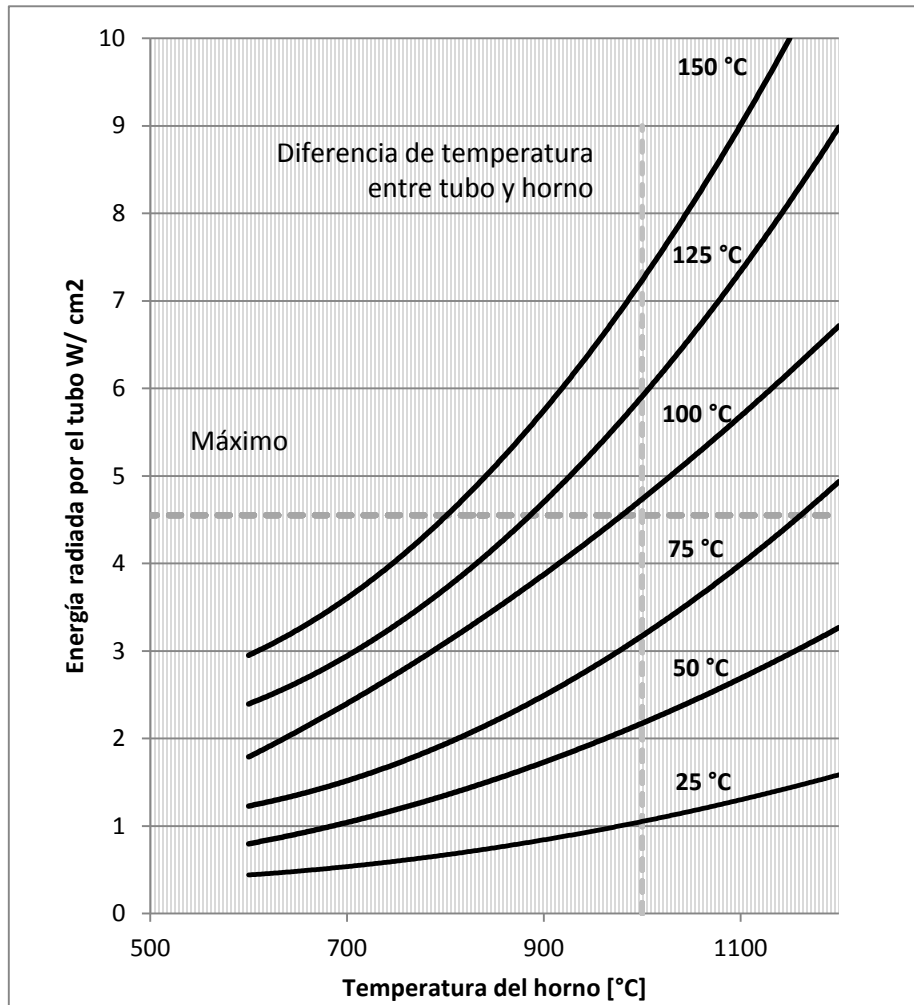


Imagen 1. 6 Gráfica de ajuste polinómico de la energía radiada por ΔT entre la superficie y el horno

Con el cálculo del calor emitido por los ductos radiantes, se han contabilizado los receptores de calor durante el transitorio del ciclo de horneado, en la tabla 3.3, se resumen la energía que posee cada uno de ellos.

Tabla 3. 2 Resumen de los receptores de calor durante un ciclo de horneado

| | Nomenclatura | Energía [KJ] |
|---|--------------|-----------------------|
| Calor sensible de la carga | Q_s | 101.46×10^3 |
| Calor en los ductos radiantes | Q_r | 15.77×10^3 |
| Calor perdido en los gases de combustión | $Q_{G.C}$ | 13.6×10^3 |
| Calor de la atmosfera controlada | Q_a | 1.19×10^3 |
| Perdidas de calor en paredes por transferencia simultánea | Q_p | 13,065.3 |
| Perdidas de calor por apertura de puertas | Q_{ap} | 371.38 |
| Total | Q_s | 145.456×10^3 |

Calor de combustión

A partir del análisis realizado para el cálculo del gasto del combustible, con un tiempo de 45 minutos por ciclo, es posible determinar la energía que se entrega al horno durante un ciclo.

$$PCI_{Gas\ L.P.} = 49,053 \frac{KJ}{kg}$$

$$Q_c = PCI_{Gas\ L.P.} * \dot{M}_{combustible} * t_{ciclo}$$

$$Q_c = 49,053 \frac{KJ}{kg} * 17.97 \times 10^{-4} \frac{kg_{combustible}}{seg} * 2700\ seg$$

$$Q_c = 238\ MJ$$

Calor sensible de precalentamiento de aire

Uno de los parámetros para determinar el ahorro de combustible por precalentamiento de aire en la combustión, es la temperatura de los humos⁶, la cual no se puede determinar con ayuda del equipo de medición. Sin embargo, retomando la imagen 3.2 del anexo, se observa una fuga en uno de los precalentadores de aire, en este punto fue posible medir con la cámara termográfica que se escapan aproximadamente 80°C⁷. Es posible observar cierto grado de oxidación en parte más cercana a la fuga, debido al desgaste entre la junta del intercambiador y el ducto de gases de combustión⁸, por esta razón su temperatura se aproxima en un rango de 800 °C a 900 °C. De la gráfica de la imagen 1.7 se aproximan ambos porcentajes de ahorro.

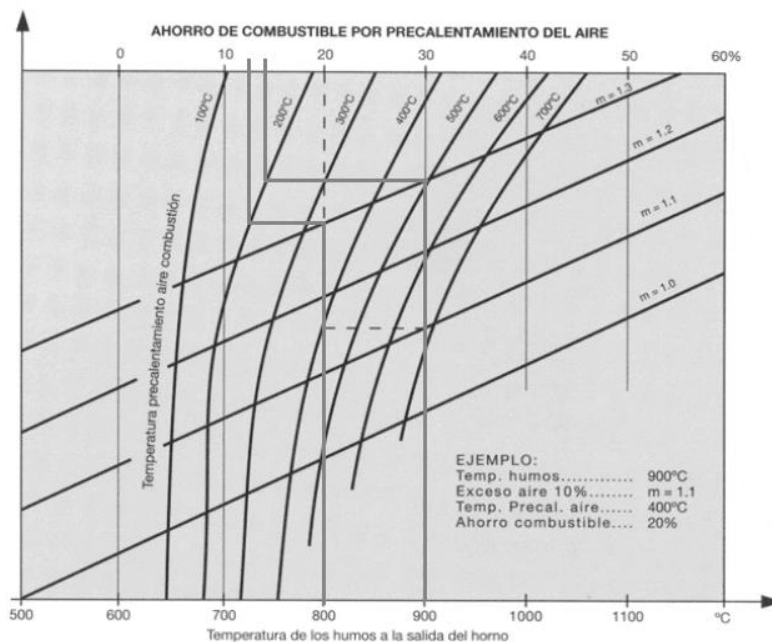


Imagen 1. 7 Gráfica de parámetros de ahorro de combustible para el horno de vitrificado

⁶ Temperatura de los humos previa a la entrada del precalentador de aire

⁷ La cámara termográfica detectó una temperatura de 385°C en la fuga, mientras que en los gases de combustión 305 °C

⁸ Se concluye que se escapan los gases de combustión, por la configuración básica del intercambiador de calor (Imagen 3.6 del anexo)

Eficiencia del horno

Con una temperatura de 800°C, se ahorra aproximadamente 12% del calor de combustión, que equivale a 209.44 MJ, para una temperatura de 900°C, se ahorra el 14% (204.68 MJ) por lo tanto se pueden calcular ambas eficiencias, es importante compararlas con una de referencia, el caso base es cuando no hay precalentador de aire.

Caso 1:
Sin precalentador

$$\eta_1 = \frac{145.456 \text{ MJ}}{238 \text{ MJ}}$$
$$\eta_1 = 61.12 \%$$

Caso 2:
12% de ahorro

$$\eta_{12\%} = \frac{132.93 \text{ MJ}}{209.44 \text{ MJ}}$$
$$\eta_{12\%} = 69.44 \%$$

Caso 3:
14% de ahorro

$$\eta_{14\%} = \frac{132.93 \text{ MJ}}{204.68 \text{ MJ}}$$
$$\eta_{14\%} = 71.06 \%$$

Diagrama de Sankey

Con el objetivo de visualizar la transferencia de energía en el horno, partiendo del poder calorífico entregado del combustible (Gas L.P) como energía primaria, el diagrama de la imagen 1.8 muestra el uso final de la energía para el horno de vitrificado de la empresa.

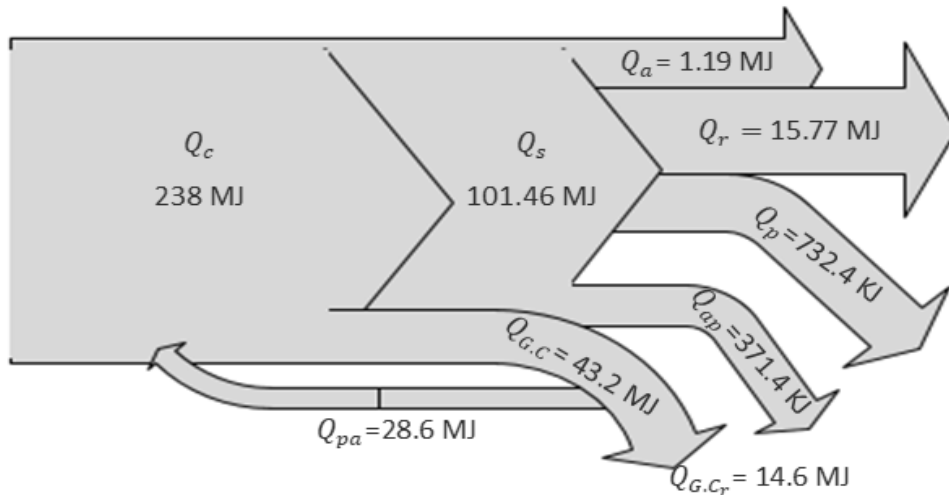


Imagen 1. 8 Diagrama de Sankey del horno de vitrificado

Análisis de alternativas

Los resultados del balance de energía, muestran un potencial de recuperación de calor en los gases de combustión del 11% del calor útil (14.6 MJ), retomando los procesos de la línea de producción en la empresa (imagen 1.1), el secado se realiza a condiciones ambiente, con una duración aproximada de 24 horas. Con el propósito de aumentar la productividad en esta parte de la cadena, se plantea un intercambio de calor entre los gases y el aire de ingreso⁹, con el propósito de transferir la energía a una cámara de secado que permita secar los productos a una mayor temperatura que la ambiente.

Intercambiador de calor

El proceso de secado de las piezas se realiza en una zona específica de la empresa, debido a que el recubrimiento no debe estar contaminado con alguna otra sustancia o impureza, de lo contrario, al realizarse el proceso de vitrificado, la calidad del producto disminuye. Por este motivo las piezas no se deben secar con el contacto directo de los gases de escape, por ello, es necesario transferir esta energía a un flujo de aire y realizar un uso eficiente de su energía. Las condiciones de entrada del intercambiador, son determinadas por las propiedades de los gases de combustión y las del aire a condiciones locales. Durante el diagnostico energético, se realizaron una serie de mediciones de temperatura y humedad¹⁰, con el objetivo de determinar la energía del aire a estas condiciones¹¹, con un promedio de 30.8 °C en la temperatura local y 60% de humedad, ($h_1 = 73.95 \frac{KJ}{kg}$).

Con los parámetros especificados, se plantean las condiciones de salida del aire en el intercambiador de 80 °C y 60% ($h_2 = 723.25 \frac{KJ}{kg}$). De la ecuación 16, se plantea el balance de energía para nuestro equipo, contemplando un pinch point de 30°C:

$$\begin{aligned}Q_a &= Q_g \\ \dot{m}_a \Delta h &= \dot{m}_h C_p \Delta T \\ \dot{m}_a (723.24 - 73.95) \frac{KJ}{kg} &= 0.03667 \frac{kg}{s} 1.073 \frac{KJ}{kgK} (578.15 - 383.15)K \\ \dot{m}_a &= 0.0118 \frac{kg}{s}\end{aligned}$$

Con las propiedades calculadas, se determina la temperatura de salida de los gases de combustión, las propiedades del intercambiador.

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{\dot{m}_a \Delta h}{\dot{m}_h C_p} \\ \Delta T &= 180.99 \text{ } ^\circ C \\ T_{2(h)} &= 100.9 \text{ } ^\circ C\end{aligned}$$

⁹ El aire ingresa al intercambiador de calor a través de un ventilador.

¹⁰ Las mediciones se realizaron cuando el horno se encuentra a plena carga

¹¹ Condiciones de la carta psicrométrica

Cámara de secado

Las condiciones de la cámara de secado a proponer, están relacionadas con el área (3.8 m x 1.15 m) y volumen (5.07 m³) disponible dentro de la planta, así como su capacidad y las condiciones térmicas de operación. En la imagen 3.7 del anexo, se muestra el espacio disponible¹², el cual se encuentra en uso para el mismo proceso a condiciones ambiente.

La capacidad del secador, es dependiente del área ocupada por las piezas en el interior, inicialmente se propone un secador con una capacidad de 10 piezas, separadas en dos niveles 5 piezas en el piso inferior y 5 en el superior, las piezas poseen aproximadamente 300 gr de agua¹³, por lo tanto se tiene que evaporar 3 kg de agua dentro de la cámara de secado. Con el objetivo de evitar condensados al interior se recomienda que la temperatura de salida sea superior a 20°C, ya que, está es la temperatura de rocío durante el mes en el cual se registró mayor temperatura ambiente durante el 2017.¹⁴

Las condiciones de entrada del aire¹⁵ en la cámara de secado son de 80 °C y 60% ($W = 0.2428 \frac{kg_{agua}}{kg_{aire}}$), con un flujo de aire (\dot{m}_a) de $0.0118 \frac{kg}{s}$, como se trata de un flujo de aire húmedo, es importante conocer la masa de aire seco y de vapor presente en la mezcla.

$$\dot{m}_{ah} = \dot{m}_{as} + \dot{m}_{va}$$

Sin embargo es posible expresar la masa de vapor de agua en términos de la humedad absoluta ^[A]

$$\dot{m}_{va} = W \dot{m}_{as}$$

Por lo tanto, la expresión del balance de masa, queda de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{ah} = \dot{m}_{as} (1 + W)$$

$$\dot{m}_{as} = \frac{\dot{m}_{ah}}{(1 + W)}$$

Sustituyendo los datos, se tiene el valor de la masa de aire seco y de la masa de vapor de agua presente en la mezcla de aire:

$$\dot{m}_{as} = \frac{0.0118 \frac{kg}{s}}{(1 + 0.2428 \frac{kg_{agua}}{kg_{aire}})}$$

$$\dot{m}_{as} = 9.495 \times 10^{-3} \frac{kg_{as}}{s}$$

$$\dot{m}_{va} = 2.30 \times 10^{-3} \frac{kg_{va}}{s}$$

El contenido de humedad de las piezas que se encuentran al interior de la cámara de secado, es un flujo estacionario, es conveniente conocer la tasa de evaporación para realizar el balance de masa.

¹²Área marcada en amarillo, lado izquierdo de la fotografía

¹³ Peso por pieza posterior al decapado

¹⁴ Datos de CONAGUA del año 2017

¹⁵ Del flujo de aire calculado del intercambiador de calor

El calor que ingresa con el aire de entrada, posee un contenido energético y el contenido de agua en el aire posee una presión parcial a la cual se lleva a cabo la evaporación. El primero queda calculado bajo la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_a &= \dot{m} C_p \Delta T \\ \dot{Q}_a &= 0.0118 \frac{kg}{s} * 1.007 \frac{KJ}{kgK} * (352.15 - 303.95)K \\ \dot{Q}_a &= 0.5847 \frac{KJ}{s} \end{aligned}$$

Para conocer la entalpia específica de vaporización a las condiciones de entrada del aire, se tiene que conocer la presión de vapor presente en la mezcla:

$$\begin{aligned} P_{sat@30^\circ C} &= 4.25 \text{ KPa} \\ P_v &= (0.6) 4.25 \text{ KPa} \\ P_v &= 2.55 \text{ KPa} \\ h_{fg@P_v} &= 2460.6 \frac{KJ}{kg} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la tasa de evaporación del agua dentro de la cámara de secado, se suma con el flujo másico del vapor de agua contenido en la corriente de aire de ingreso.

$$\begin{aligned} \dot{m}_p &= \frac{0.5847 \frac{KJ}{s}}{2460.6 \frac{KJ}{kg}} \\ \dot{m}_p &= 2.37 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

El balance de masa de la cámara de secado se expresa con la siguiente expresión, y se ejemplifica en la imagen 3.8 del anexo. El contenido de aire seco se conserva a la salida de la cámara de secado, mientras que el vapor de agua aumenta, y la mezcla de aire sufre una expansión volumétrica.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{as} + \dot{m}_{va} + \dot{m}_p &= \dot{m}_{as} + \dot{m}_{vas} \\ \dot{m}_{vas} &= 2.53 \times 10^{-3} \frac{kg_{va}}{s} \end{aligned}$$

Con estas condiciones de salida, se puede determinar dos propiedades del aire; la humedad relativa y la humedad absoluta, con el propósito de conocer los parámetros a la salida.

$$\begin{aligned} W_s &= \frac{\dot{m}_{as}}{\dot{m}_{as} + \dot{m}_{vas}} \\ W_s &\cong 79 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_s &= \frac{\dot{m}_{vas}}{\dot{m}_{as}} \\ H_s &= 0.2664 \frac{kg_{agua}}{kg_{aire}} \end{aligned}$$

Con las dos propiedades calculadas, se define el estado termodinámico del aire a la salida, el cual se muestra en la tabla 3.4

Tabla 3. 3 Propiedades del aire a la salida de la cámara de secado

| Propiedad | Valor |
|-------------------------------|--|
| Temperatura de bulbo seco | 74.9 °C |
| Temperatura de bulbo húmedo | 69.64 °C |
| Humedad relativa | 79% |
| Humedad absoluta | 0.2661 kg _a /kg _{as} |
| Temperatura de punto de rocío | 69.37 °C |
| Volumen específico | 1.4065 m ³ /kg |
| Entalpia específica | 777.52 kJ/ kg _{as} |

El tiempo de secado de las piezas es aproximadamente 210.4 minutos, el tiempo del tratamiento térmico del horno por ciclo, es de 50 minutos, a consecuencia de que la empresa tiene una producción intermitente, se realizan cuatro ciclos en un día de trabajo (200 minutos), por lo cual, se alcanza solamente el secado de una carga de diez piezas. Sin embargo, las condiciones ambiente varían durante los meses de trabajo.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede realizar un análisis de sensibilidad tomando en cuenta los parámetros psicométricos del aire de ingreso al intercambiador de calor, modelando para diferentes escenarios en el aire de salida en la cámara de secado. Sin embargo, en la industria este tipo de ensayos suelen modelarse de manera empírica, siendo un ejemplo la industria de los alimentos, ya que, se presenta una varianza en el proceso de secado, la cual depende del estado de los materiales y/o alimentos dentro de los dispositivos, uno de los motivos es la cuantificación de la demanda de energía al final del proceso de secado, según Shiri K. Sharma y col. en "Ingeniería de alimentos", las propiedades de cada pieza unitaria varían dependiendo su composición interna y externa, se recomienda hacer un análisis empírico y de allí obtener un modelo de secado propio del material. Este análisis permite observar los desvíos en el tiempo de secado que se deben a la calidad que presentan las piezas al entrar al proceso, ya que, la cantidad de calor al ingreso del intercambiador suele comportarse de manera constante durante la variación de los parámetros psicométricos, para este caso un promedio de 2.4 KJ/s, que serán transferidos a la carga (10 piezas en el la cámara de secado).

Con base en el primer análisis de evaporación del agua contenida por lote de ingreso, se obtiene un tiempo de secado aproximado de 3.5 horas (con una tolerancia de 30 min, de acuerdo a la demanda final de energía requerida por el producto), con este tiempo se realizará un análisis de variaciones en los indicadores de productividad, que presentara la empresa, en caso de la aplicación de esta tecnología.

Capítulo IV

Indicadores

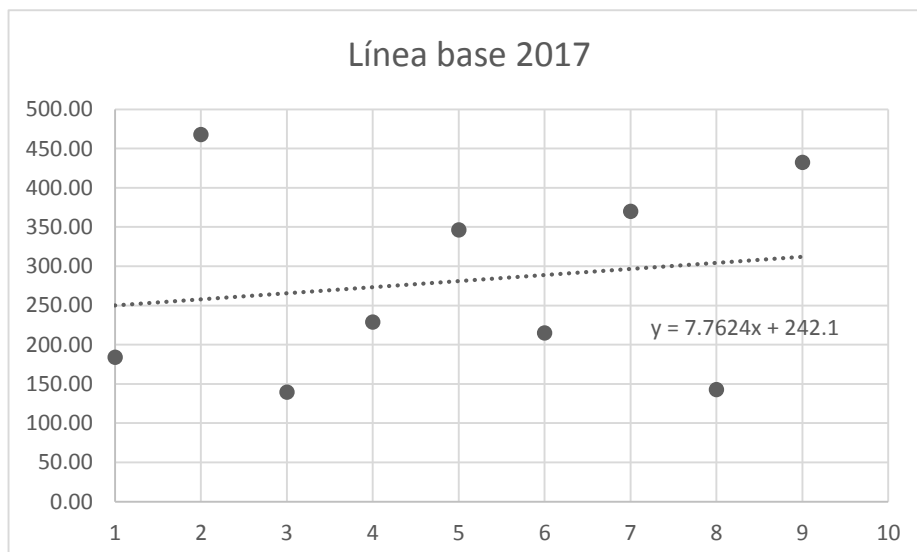
Los indicadores energéticos presentados a continuación se encuentran dentro de la categoría “Nivel 4”, según la IAE. De acuerdo al uso final de la energía, actualmente no se cuentan con datos abiertos que permitan valorar indicadores de esta industria y de la tecnología aplicada, para compararlos mediante una línea de uso eficiente de la energía y el impacto industrial de la aplicación de este tipo de medidas.

A continuación se presenta el primer caso de análisis con un aumento en la productividad, de 24 horas de secado del producto (en condiciones ambiente) contra 4 horas con la tecnología propuesta. Como primer análisis, se obtiene la energía no asociada al proceso productivo de las piezas de calentadores de gas, mediante la línea base de consumo, durante las mediciones de nueve meses del año 2017, utilizando como indicador principal (energía/producción) tal como se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3. 5 Indicadores energéticos mensuales

| Mes | Producción | Energía | IDen |
|------------------|------------|-----------|--------|
| Enero | 214 | 39,403.63 | 184.13 |
| Febrero | 142 | 66,464.13 | 468.06 |
| Marzo | 360 | 50,234.19 | 139.54 |
| Abril | 331 | 75,847.97 | 229.15 |
| Mayo | 147 | 50,919.26 | 346.39 |
| Junio | 122 | 26,257.94 | 215.23 |
| Julio | 142 | 52,579.63 | 370.28 |
| Agosto | 176 | 25,162.66 | 142.97 |
| Septiembre | 111 | 48,006.42 | 432.49 |
| Promedio mensual | 193.9 | 48,319.54 | 249.21 |

En la siguiente gráfica (Imagen 3.9), se muestra la tendencia del indicador, al tratarse de una PyME con producción intermitente, se tienen variaciones de gran amplitud durante el año, por ello la línea base tiende a modificarse mucho con respecto a la producción, en este caso lo más conveniente es graficar la línea base del año anterior y comparar los desvíos en producción y energía.



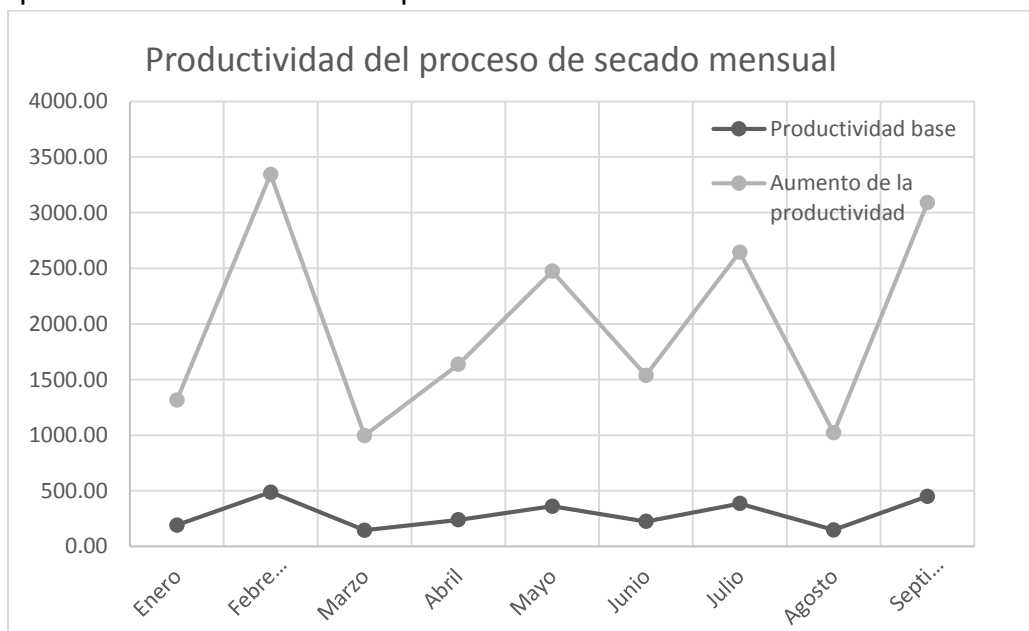
En la gráfica anterior se muestra la ecuación de la línea base ($y = 7.7x + 242.1$), en donde se aprecia que la energía no asociada al proceso es de 242.1 MJ por pieza manufacturada, esta cantidad es cercana al indicador del promedio mensual, lo cual se traduce en una mala gestión de la energía térmica, no se observa una tendencia constante de energía suministrada al proceso, existen desvíos muy grandes en el consumo, con respecto a la tendencia de la producción.

En la tabla 3.6 se muestran los indicadores de productividad, con respecto al proceso de secado de las piezas, teniendo en cuenta que las piezas se secan en lotes de 25, existe un aumento de la productividad del 85.5% de aumento mensual, lo cual se observa gráficamente en a Imagen 4.1

Tabla 3. 6 Indicadores de uso eficiente de la energía nivel 4

| Mes | Horas de secado mensuales | | Aumento de la productividad | |
|------------------|---------------------------|------------------|-----------------------------|-------------|
| | Secado Ambiente | Camara de secado | IDen prod A | IDen prod B |
| Enero | 205.44 | 29.96 | 191.80 | 1315.21 |
| Febrero | 136.32 | 19.88 | 487.56 | 3343.27 |
| Marzo | 345.60 | 50.4 | 145.35 | 996.71 |
| Abril | 317.76 | 46.34 | 238.70 | 1636.77 |
| Mayo | 141.12 | 20.58 | 360.82 | 2474.21 |
| Junio | 117.12 | 17.08 | 224.20 | 1537.35 |
| Julio | 136.32 | 19.88 | 385.71 | 2644.85 |
| Agosto | 168.96 | 24.64 | 148.93 | 1021.21 |
| Septiembre | 106.56 | 15.54 | 450.51 | 3089.22 |
| Promedio mensual | 186.13 | 27.14 | 292.62 | 2006.53 |

De acuerdo a la demanda mensual de secado, se presenta una eficiencia de 159 horas (6.6 días), en la productividad del proceso de secado, actualmente no se cuentan con cifras de la producción de piezas por hora dentro de la empresa, por lo tanto no es posible extrapolar los resultados del aumento en el proceso de secado a los procesos productivos de la empresa. En la gráfica 4.1, se muestra el aumento de la productividad mensual del proceso.



Conclusiones

El presente trabajo muestra la metodología para el cálculo de la eficiencia de un horno industrial, claramente se deben de tomar en cuenta, diversos parámetros y medidas al momento del levantamiento del equipo, mediante la gráfica de la imagen 1,6, se muestra que es importante cuantificar la energía presente en los ductos radiantes para cerrar el balance de manera completa.

Es importante realizar los gráficos de intercambio de masa y energía, para obtener un panorama de ahorros dentro del equipo y las interacciones que se llevan a cabo durante el proceso, también se recomienda realizar mediciones y análisis de gases de combustión y temperaturas externas de manera constante, ya que el análisis presentado solo se basa en una medición de un promedio de 5 puntos, es importante realizar las mediciones con respecto a la demanda de energía de las piezas que serán manufacturadas mes a mes, con el fin de obtener resultados mas aproximados de los indicadores.

Es importante que el operador mantenga una bitácora con las medidas de consumo de energía, temperaturas en las paredes del horno, de ser posible con cámara termografía y de análisis de la combustión. Sin embargo, al tratarse de una PyME es importante planificar el levantamiento de datos de un horno industrial contemplando los procesos de la empresa.

Actualmente no existen referencias en hornos industriales en donde se pueda tener un punto de comparación para conocer el rango en las eficiencias y con base en ella proponer medidas de ahorro, de igual manera se cuentan con pocos análisis del uso final de la energía en hornos industriales, el presente trabajo presenta un esfuerzo por vencer esta brecha de mediciones y medidas de uso eficiente de la energía en procesos térmicos en la industria manufacturara.

Durante el levantamiento de las condiciones del horno, la placa de datos no muestra la eficiencia nominal, por lo cual tampoco existe un punto de comparación de disminución de la efectividad del proceso a través del tiempo.

El horno cuenta con una primera medida de uso eficiente de la energía en los precalentadores, sin embargo la propuesta de una cámara de secado hace que la energía residual en los gases de escape, aun ayuden a un proceso que beneficie a la empresa. Sin embargo las condiciones analizadas en el presente trabajo del intercambiador de calor y de la cámara de secado son una referencia, ya que, el comportamiento aplicado de estos equipos cambia una vez instalado el sistema de uso eficiente, por lo cual es posible que se presente una disminución en la productividad.

Es necesario un conocimiento más profundo de las piezas manufacturadas, se propone que el encargado de calidad de las piezas, registre en una bitácora, el peso antes y después de los procesos térmicos aplicados (decapado y enjuague) con el objetivo de determinar la masa de agua que será removida, y poder optimizar la demanda de energía al final de la etapa de secado.

Para lograr esta medida de uso eficiente, la empresa tiene que realizar sus procesos en paralelo, en estos momentos presenta una producción artesanal, lo cual se visualiza en las grandes desviaciones de los indicadores de energía mensuales.

Con el fin de optimizar este proceso se debe dar seguimiento al movimiento de los indicadores durante 3 meses antes de la puesta en marcha del proyecto (reparando fugas y averías) y durante 3 meses después para poder cuantificar los ahorros reales y ver su reflejo en las facturas de gas correspondientes.

Anexo. Imágenes



Imagen 1. 9 Horno de curado (180°C) y horno de esmalte porcelanizado (835°C)



Imagen 2. 1 Región de degradación y termografía de la zona afectada



Imagen 2. 2 Instalaciones en parte posterior y lateral

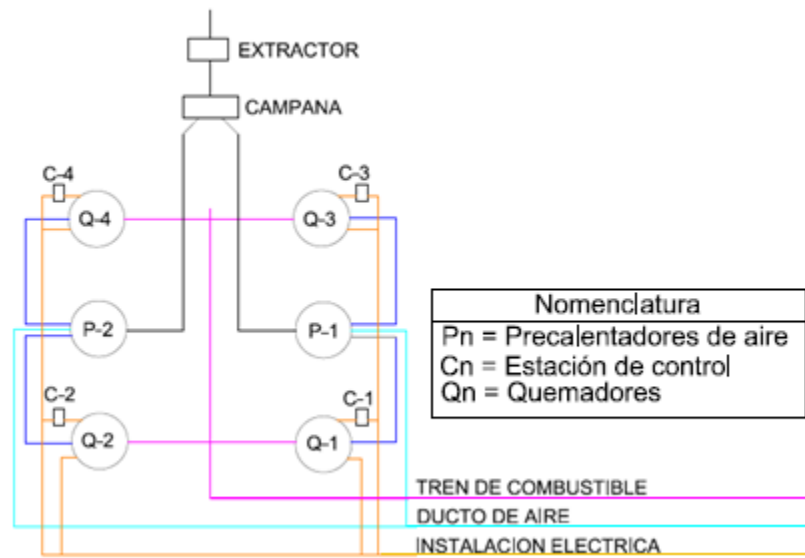


Imagen 2. 3 Levantamiento de las instalaciones externas en el horno

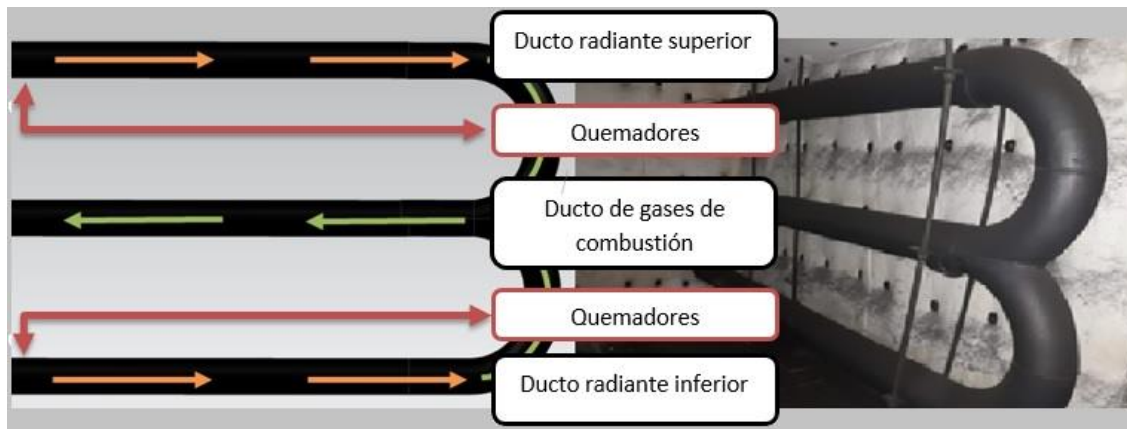


Imagen 2. 4 Arreglo de ductos al interior del horno



Imagen 2. 5 Superficies recubiertas de aislante



Imagen 2. 6 Carga previo al proceso de horneado y carga después del tratamiento térmico

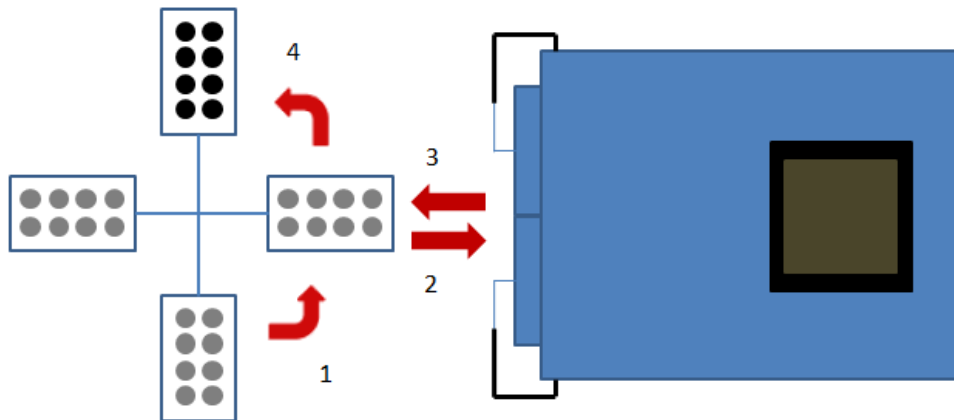


Imagen 2. 8 Vista superior del ciclo de operación del horno de porcelanizado



Imagen 2. 7 Área de decapado de la empresa

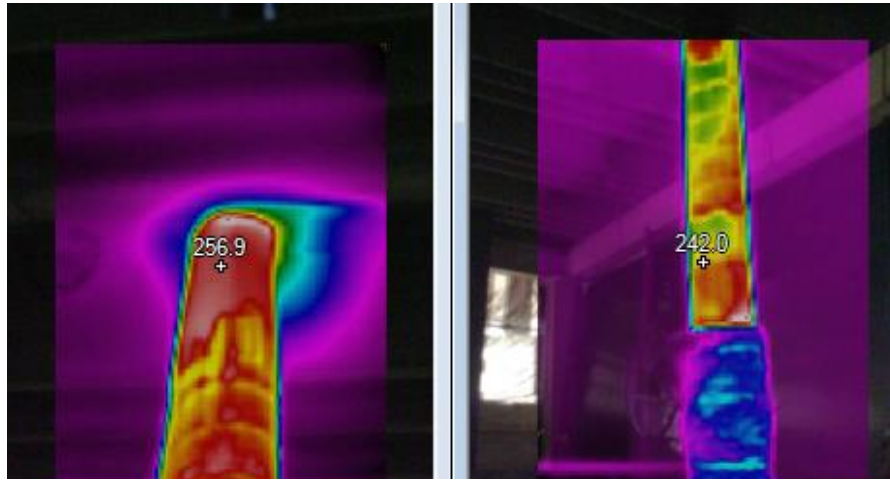


Imagen 2. 9 Termografía del ducto de gases de escape

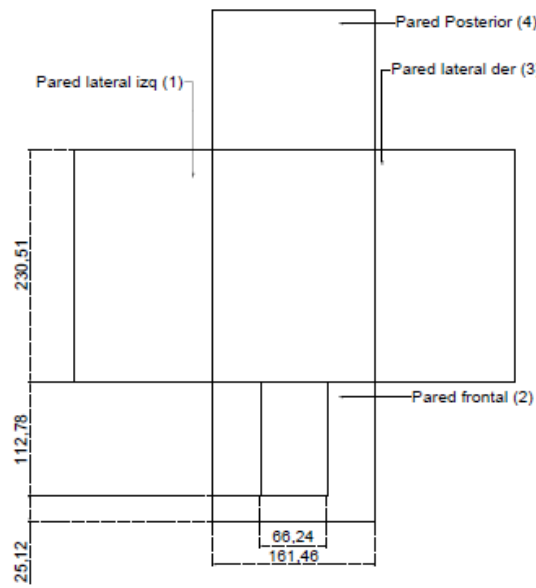


Imagen 3. 1 Plano general del horno

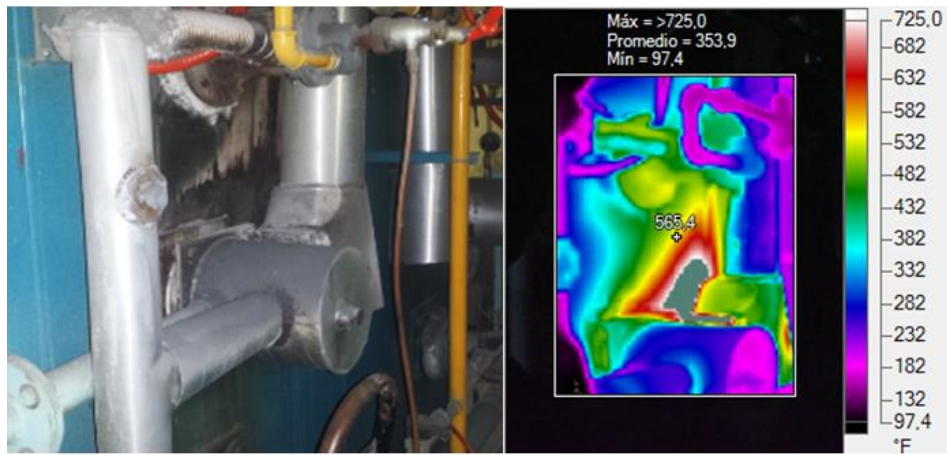


Imagen 3. 2 Termografía en la pared posterior del horno

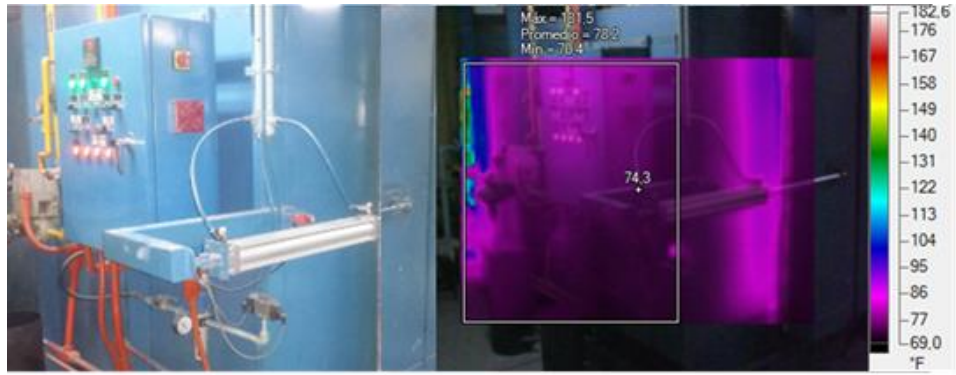


Imagen 3. 4 Termografía en la pared lateral izquierda

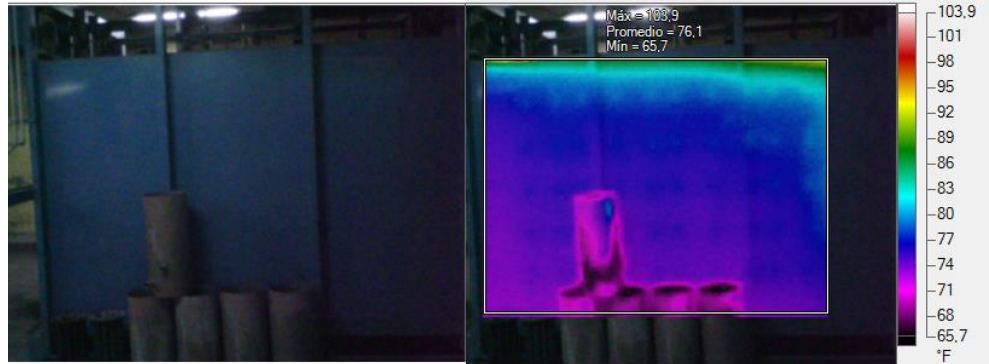


Imagen 3. 3 Termografía de la pared lateral derecha

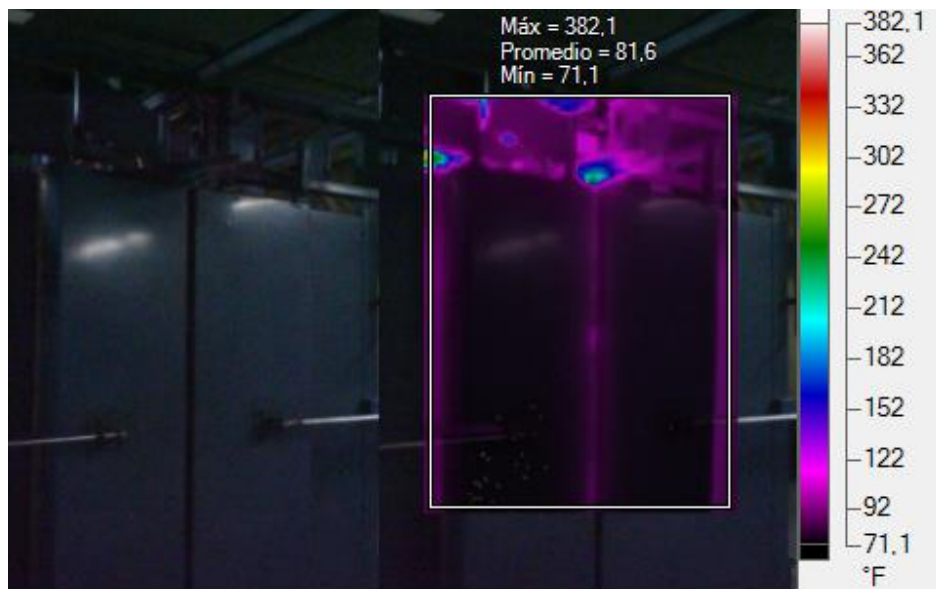


Imagen 3. 5 Termografía de la pared frontal

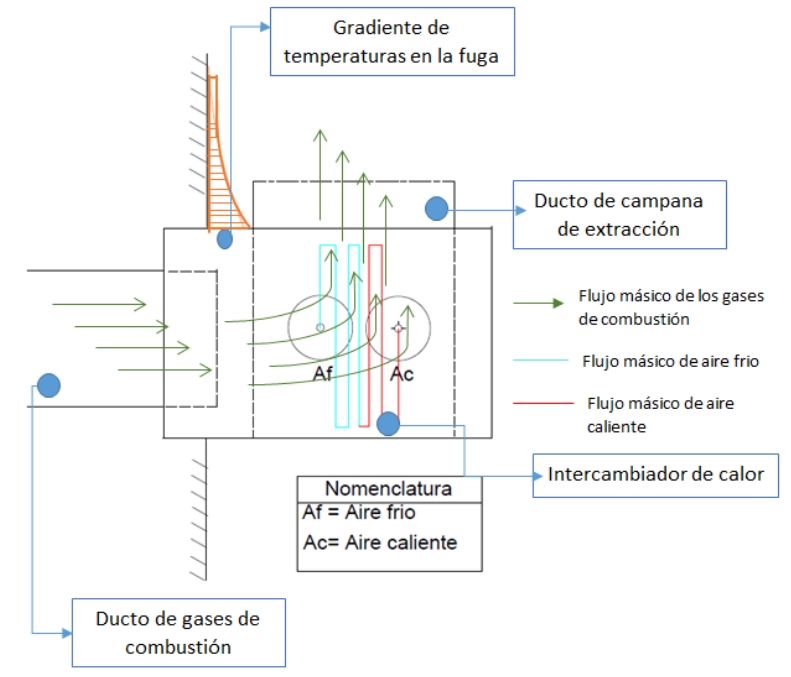


Imagen 3. 6 Corte transversal en el precalentador de aire



Imagen 3. 8 Posible área del secador

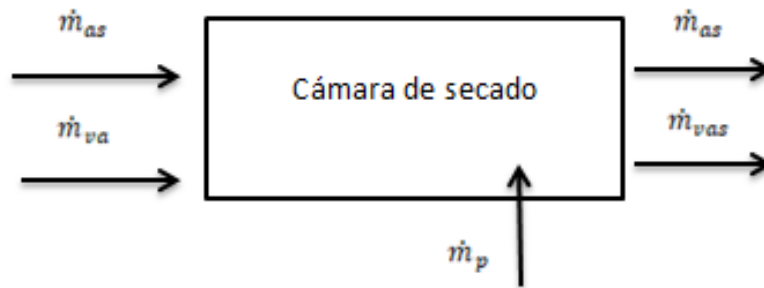


Imagen 3. 7 Balance de masa en el secador

Anexo. Memoria de cálculo

Transferencia de calor en paredes

Pared Posterior

En esta superficie se encuentran los dispositivos que realizan el proceso de combustión y los ductos de evacuación de los gases de combustión, motivo por el cual es la superficie en donde existe mayor transferencia de calor. Mediante la cámara termográfica fue posible medir el perfil de temperatura de la zona en donde existe mayor transferencia de calor, tal como se muestra en la imagen 3.2 del anexo, la temperatura promedio de la superficie se estima en 178.83 °C (353.9 °F). Las dimensiones de la pared posterior son (1.61m x 1.38m)

Pérdidas por convección natural

Para el cálculo de la convección natural, las temperaturas quedan definidas de la siguiente manera:

Temperatura de las paredes (T_1) = 178.83 °C

Temperatura de referencia (T_∞) = 25 °C

Temperatura promedio (T_2) = $\frac{T_1 + T_\infty}{2} = \frac{178.83 + 25}{2} = 101.91$ °C

Las propiedades del aire para esta temperatura se definen a continuación en la tabla 2.7

Tabla 2. 7 Condiciones del aire para la temperatura local de la pared posterior

| Temperatura | Densidad | Calor específico | Conductividad térmica | Viscosidad cinemática | Número de Prandtl |
|-------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|
| T, °C | $\rho, \text{kg/m}^3$ | $C_p, \text{J/kgK}$ | $k, \text{W/m K}$ | $\nu, \text{m}^2/\text{s}$ | Pr |
| 100 | 0.9458 | 1009 | 0.03095 | 2.306×10^{-5} | 0.7111 |
| 101.9 | 0.9412 | 1009.2 | 0.03108 | 2.3020×10^{-5} | 0.7107 |
| 120 | 0.8977 | 1011 | 0.03235 | 2.264×10^{-5} | 0.7073 |

Para calcular la transferencia de calor por unidad de área, debemos conocer el número de Nusselt apoyándonos desde los parámetros de la ecuación de Grashoff (Ec. 3)

$$Gr = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \frac{1}{(375.05) \text{K}} * (451.98 - 298.15) \text{K} * (1.61\text{m})^3}{(2.302 \times 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}^2})^2}$$
$$Gr = 3.168 \times 10^{10}$$

Calculando el número de Rayleigh (Ec. 4):

$$Ra = 3.276 \times 10^{10} * 0.7107$$
$$Ra = 2.252 \times 10^{10}$$

Calculando el número de Nusselt (Ec. 5):

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387 * (2.3282 \times 10^{10})^{1/6}}{\left[1 + (0.492/0.7107)^{9/16}\right]^{8/27}}$$
$$Nu = 18.1621$$

Calculando el coeficiente convectivo (Ec. 7):

$$h = \frac{18.1621 * 0.03108 \frac{\text{W}}{\text{m K}}}{1.61 \text{m}}$$

$$h = 0.3506 \frac{W}{m^2 K}$$

Calculando el calor perdido por convección natural:

$$Q = A * h (T_1 - T_\infty) \quad \dots\dots Ec (20)$$

$$Q = (1.61 m * 1.38 m) * 0.3487 \frac{W}{m^2 K} * (451.98 - 298.15)K$$

$$Q = 119.82 W$$

Pérdidas por radiación

El material de la pared es de un acero de superficie rugosa. Mediante los datos de la cámara termográfica se determina el valor de la emisividad es $\varepsilon = 0.95$

$$Q = A * \varepsilon * \sigma (T_1^4 - T_{ext}^4) \quad \dots\dots Ec (21)$$

$$Q = (1.61 m * 1.38 m) * 0.95 * 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (451.98^4 - 298.15^4)K^4$$

$$Q = 4,048.76 W$$

Las pérdidas por transferencia de calor simultánea son:

$$Q_{rad} + Q_{conv} = 119.82 W + 4,048.76 W$$

$$Q_{pared 4} = 4,168.58 W$$

Teniendo en cuenta que las mediciones con el analizador de gases se tomaron en un intervalo del ciclo térmico del horno de 20 min, la máxima transferencia de calor se realiza durante este intervalo.

$$Q_{pared 4} = 5,002.301 KJ$$

Paredes laterales

Pared lateral izquierda

En la pared uno, tenemos el tablero de control y algunas instalaciones de gas en donde la temperatura máxima es de 83.05 °C (181.5 °F), tal como se muestra en la toma de la cámara termográfica de la imagen 3.3 del anexo. Las dimensiones de la pared son (2.30m x 1.38m)

Pérdidas por convección natural

Para el cálculo de la convección natural, las temperaturas quedan definidas de la siguiente manera:

Temperatura de las paredes (T_1) = 83.05 °C

Temperatura de referencia (T_∞) = 25 °C

Temperatura promedio (T_2) = $\frac{T_1 + T_\infty}{2} = \frac{83.05 + 25}{2} = 54.025$ °C

Las propiedades del aire para esta temperatura se definen a continuación en la tabla 2.8

Tabla 2. 8 Condiciones del aire para la temperatura local de la pared lateral izquierda

| Temperatura | Densidad | Calor específico | Conductividad térmica | Viscosidad cinemática | Número de Prandtl |
|-------------|----------------|------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| T, °C | $\rho, kg/m^3$ | $C_p, J/kgK$ | $k, W/m K$ | $\nu, m^2/s$ | Pr |
| 50 | 1.092 | 1007 | 0.02735 | 1.789×10^{-5} | 0.7228 |
| 54.02 | 1.079 | 1007 | 0.02764 | 1.832×10^{-5} | 0.7218 |
| 60 | 1.059 | 1007 | 0.02808 | 1.896×10^{-5} | 0.7202 |

Para calcular la transferencia de calor por unidad de área, debemos conocer el número de Nusselt apoyándonos desde los parámetros de la ecuación de Grashoff (Ec. 3):

$$Gr = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} * \frac{1}{(327.15) K} * (356.2 - 298.15) K * (2.30)^3}{(1.832 \times 10^{-5} \frac{m}{s^2})^2}$$

$$Gr = 6.3104 \times 10^{10}$$

Calculando el número de Rayleigh (Ec. 4):

$$Ra = 6.31 \times 10^{10} * 0.7218$$

$$Ra = 4.554 \times 10^{10}$$

Calculando el número de Nusselt (Ec.5):

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387 * (2.3282 \times 10^{10})^{1/6}}{\left[1 + (0.492/0.7218)^{9/16}\right]^{8/27}}$$

$$Nu = 20.2362$$

Calculando el coeficiente convectivo (Ec.7):

$$h = \frac{20.2356 * 0.02764 \frac{W}{m K}}{2.3 m}$$

$$h = 0.2431 \frac{W}{m^2 K}$$

Calculando el calor perdido por convección natural (Ec. 20):

$$Q = (2.3 m * 1.38 m) * 0.2431 \frac{W}{m^2 K} * (356.2 - 298.15) K$$

$$Q = 44.8 W$$

Pérdidas por radiación

El material de la pared es de un acero de superficie rugosa. Mediante los datos de la cámara termográfica se determina el valor de la emisividad es $\varepsilon = 0.96$ (Ec. 21)

$$Q = (2.3 m * 1.38 m) * 0.96 * 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (356.2^4 - 298.15^4) K^4$$

$$Q = 1,416.01 W$$

Las pérdidas por transferencia de calor simultánea son:

$$Q_{rad} + Q_{conv} = 44.8 W + 1,416.01 W$$

$$Q_{pared 1} = 1,460.81 W$$

Teniendo en cuenta que las mediciones con el analizador de gases se tomaron en un intervalo del ciclo térmico del horno de 20 min, la máxima transferencia de calor se realiza durante este intervalo.

$$Q_{pared 1} = 1,752.97 KJ$$

Pared lateral derecha

Con respecto a la pared tres, el perfil que muestra la cámara termográfica se observa en la imagen [3.4](#) del anexo, en donde la temperatura máxima es de 39.9°C (103.9 °F) Las dimensiones de la pared son (2.30m x 1.38m)

Pérdidas por convección natural

Para el cálculo de la convección natural, las temperaturas quedan definidas de la siguiente manera:

Temperatura de las paredes (T_1) = 39.9 °C

Temperatura de referencia (T_∞) = 25 °C

Temperatura promedio (T_2) = $\frac{T_1 + T_\infty}{2} = \frac{39.9 + 25}{2} = 32.45$ °C

Las propiedades del aire para esta temperatura se definen a continuación en la tabla 2.9

Tabla 2. 9 Condiciones del aire para la temperatura local de la pared lateral derecha

| Temperatura | Densidad | Calor específico | Conductividad térmica | Viscosidad cinemática | Número de Prandtl |
|-------------|----------------|------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| T, °C | $\rho, kg/m^3$ | $C_p, J/kgK$ | $k, W/m K$ | $\nu, m^2/s$ | Pr |
| 30 | 1.164 | 1007 | 0.02588 | 1.872×10^{-5} | 0.7282 |
| 32.45 | 1.155 | 1007 | 0.02607 | 1.631×10^{-5} | 0.7275 |
| 35 | 1.145 | 1007 | 0.02625 | 1.655×10^{-5} | 0.7268 |

Para calcular la transferencia de calor por unidad de área, debemos conocer el número de Nusselt apoyándonos desde los parámetros de la ecuación de Grashoff (Ec. 3):

$$Gr = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} * \frac{1}{(305.6) K} * (313.05 - 298.15) K * (2.30)^3}{(1.631 \times 10^{-5} \frac{m}{s^2})^2}$$
$$Gr = 2.1876 \times 10^{10}$$

Calculando el número de Rayleigh (Ec. 4):

$$Ra = 6.31 \times 10^{10} * 0.7275$$
$$Ra = 1.5915 \times 10^{10}$$

Calculando el número de Nusselt (Ec. 5):

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387 * (2.3282 \times 10^{10})^{1/6}}{[1 + (0.492/0.7275)^{9/16}]^{8/27}}$$
$$Nu = 18.192$$

Calculando el coeficiente convectivo (Ec. 7):

$$h = \frac{18.192 * 0.02607 \frac{W}{m K}}{2.3 m}$$
$$h = 0.2062 \frac{W}{m^2 K}$$

Calculando el calor perdido por convección natural (Ec. 20):

$$Q = (2.3 m * 1.38 m) * 0.2062 \frac{W}{m^2 K} * (313.05 - 298.15) K$$
$$Q = 9.75 W$$

Pérdidas por radiación

El material de la pared es de un acero de superficie rugosa. Mediante los datos de la cámara termográfica se determina el valor de la emisividad es $\varepsilon = 0.96$ (Ec. 21)

$$Q = (2.3 m * 1.38 m) * 0.96 * 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (313.05^4 - 298.15^4) K^4$$

$$Q = 287.44 \text{ W}$$

Las pérdidas por transferencia de calor simultánea son:

$$Q_{rad} + Q_{conv} = 9.17 \text{ W} + 287.44 \text{ W}$$

$$Q_{pared\ 3} = 296.61 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta que las mediciones con el analizador de gases se tomaron en un intervalo del ciclo térmico del horno de 20 min, la máxima transferencia de calor se realiza durante este intervalo.

$$Q_{pared\ 1} = 355.93 \text{ KJ}$$

Pared frontal

Con respecto a la pared dos, el perfil que muestra la cámara termográfica se observa en la imagen 3.5 del anexo, en donde la temperatura máxima es de 194.5°C (382.1 °F) Las dimensiones de la pared son (1.61m x 1.38m)

Pérdidas por convección natural

Para el cálculo de la convección natural, las temperaturas quedan definidas de la siguiente manera:

Temperatura de las paredes (T_1) = 194.5 °C

Temperatura de referencia (T_∞) = 25 °C

Temperatura promedio (T_2) = $\frac{T_1 + T_\infty}{2} = \frac{194.5 + 25}{2} = 109.75 \text{ °C}$

Las propiedades del aire para esta temperatura se definen a continuación en la tabla 3.1

Tabla 3. 4 Condiciones del aire para la temperatura local de la pared frontal

| Temperatura | Densidad | Calor específico | Conductividad térmica | Viscosidad cinemática | Número de Prandtl |
|-------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|
| T, °C | $\rho, \text{kg/m}^3$ | $C_p, \text{J/kgK}$ | $k, \text{W/m K}$ | $\nu, \text{m}^2/\text{s}$ | Pr |
| 100 | 0.9458 | 1009 | 0.03095 | 2.306×10^{-5} | 0.7111 |
| 109.75 | 0.9230 | 1010 | 0.03162 | 2.411×10^{-5} | 0.7093 |
| 120 | 0.8977 | 1011 | 0.03235 | 2.522×10^{-5} | 0.7073 |

Para calcular la transferencia de calor por unidad de área, debemos conocer el número de Nusselt apoyándonos desde los parámetros de la ecuación de Grashoff (Ec.3)

$$Gr = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \frac{1}{(382.9) \text{ K}} * (467.65 - 298.15) \text{ K} * (1.61)^3}{(2.411 \times 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}^2})^2}$$

$$Gr = 3.1177 \times 10^{10}$$

Calculando el número de Rayleigh (Ec.4)

$$Ra = 3.1177 \times 10^{10} * 0.7093$$

$$Ra = 2.2113 \times 10^{10}$$

Calculando el número de Nusselt (Ec.5)

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387 * (2.3282 \times 10^{10})^{1/6}}{\left[1 + (0.492/0.7093)^{9/16}\right]^{8/27}}$$

$$Nu = 18.0115$$

Calculando el coeficiente convectivo (Ec.7)

$$h = \frac{18.0115 * 0.03162 \frac{W}{m K}}{1.61 m}$$
$$h = 0.3537 \frac{W}{m^2 K}$$

Calculando el calor perdido por convección natural (Ec.20)

$$Q = (1.61 m * 1.38 m) * 0.3538 \frac{W}{m^2 K} * (467.65 - 298.15)K$$
$$Q = 133.21 W$$

Pérdidas por radiación

El material de la pared es de un acero de superficie rugosa. Mediante los datos de la cámara termográfica se determina el valor de la emisividad es $\varepsilon = 0.96$ (Ec.21)

$$Q = (1.61 m * 1.38 m) * 0.96 * 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (467.65^4 - 298.15^4)K^4$$
$$Q = 4,828.54 W$$

Las pérdidas por transferencia de calor simultánea son:

$$Q_{rad} + Q_{conv} = 133.21 W + 4,828.54 W$$
$$Q_{pared 2} = 4,961.75 W$$

Teniendo en cuenta que las mediciones con el analizador de gases se tomaron en un intervalo del ciclo térmico del horno de 20 min, la máxima transferencia de calor se realiza durante este intervalo.

$$Q_{pared 2} = 5,954.10 KJ$$

Por lo tanto las pérdidas totales de calor simultáneas través de las paredes, se expresa de la siguiente manera

$$Q_p = \sum_{i=1}^4 Q_i \quad \dots\dots Ec (22)$$
$$Q_p = (5,002.301 + 1,752.97 + 355.93 + 5,954.10)KJ$$
$$Q_p = 13,065.3 KJ$$

Anexo. Siglas y abreviaturas

| | |
|---|--------------|
| Aire dentro del horno..... | A |
| Calor absorbido..... | Q_s |
| Calor aportado..... | Q_e |
| Calor combustión..... | Q_c |
| Calor de convección en las paredes..... | Q_{conv} |
| Calor de la atmosfera controlada..... | Q_a |
| Calor de los gases de escape..... | $Q_{G.C.}$ |
| Calor de radiación en las paredes..... | Q_{rad} |
| Calor del aire..... | Q_a |
| Calor en los ductos radiantes..... | Q_r |
| Calor especifico de gases de escape..... | $Cp_{G.C.}$ |
| Calor especifico del acero..... | Cp_{acero} |
| Calor especifico del agua..... | Cp_{H2O} |
| Calor especifico del aire..... | Cp_{aire} |
| Calor especifico del dióxido de carbono..... | Cp_{CO2} |
| Calor especifico del nitrógeno..... | Cp_{N2} |
| Calor especifico del oxígeno..... | Cp_{O2} |
| Calor perdido en los gases de combustión..... | $Q_{G.C}$ |
| Calor sensible de la carga..... | Q_s |
| Calor sensible de precalentamiento de aire..... | Q_{pa} |
| Campana extracción..... | CE |
| Carga del horno..... | C |
| Coficiente convectivo..... | h |

| | | |
|---|-----|-------------------------|
| Conductividad térmica..... | | k |
| Constante de Stefan-Boltzmann..... | | σ |
| Densidad..... | | ρ |
| Densidad aire..... | del | ρ_{aire} |
| Diferencia de entalpias aire..... | del | Δh_a |
| Diferencia de temperaturas..... | de | ΔT |
| Ducto de escape de los gases de combustión..... | | E |
| Ductos radiantes..... | | D |
| Eficiencia de la combustión..... | | η_{comb} |
| Eficiencia del horno con precalentamiento con temperatura de humos de 800 °C..... | | $\eta_{12\%}$ |
| Eficiencia del horno con precalentamiento con temperatura de humos de 900 °C..... | | $\eta_{14\%}$ |
| Eficiencia del horno sin precalentamiento..... | | η_1 |
| Electricidad..... | | e |
| Entalpía de vaporización agua..... | del | $h_{vap_{H_2O}}$ |
| Flujo másico de aire..... | de | \dot{M}_{aire} |
| Flujo másico de combustible..... | de | $\dot{M}_{combustible}$ |
| Flujo másico de gases escape..... | de | \dot{M}_h |
| Humedad relativa..... | | ϕ |
| Masa de agua..... | de | m_{agua} |
| Masa de aire..... | de | m_a |
| Masa de vapor..... | de | m_v |
| Masa de aire..... | del | m_{aire} |
| Moles..... | | M |
| Número de Grashoff..... | de | Gr |
| Número de Nusselt..... | de | Nu |

| | | |
|---|---------------------------------------|------------------------------|
| Número Prandtl..... | de | Pr |
| Número de Rayleigh..... | | Ra |
| Otros aportes..... | | Q_o |
| Pérdidas 1..... | de calor en la pared | $Q_{pared\ 1}$ |
| Pérdidas 2..... | de calor en la pared | $Q_{pared\ 2}$ |
| Pérdidas 3..... | de calor en la pared | $Q_{pared\ 3}$ |
| Pérdidas 4..... | de calor en la pared | $Q_{pared\ 4}$ |
| Perdidas simultánea..... | de calor en paredes por transferencia | Q_p |
| Perdidas puertas..... | de calor por apertura de | Q_{ap} |
| Pérdidas pared..... | totales de calor en | Q_t |
| Poder inferior..... | | calorífico $PCI_{Gas\ L.P.}$ |
| Pre calentador aire..... | "n" de | P_n |
| Presión saturación..... | | de P_{sat} |
| Presión vapor..... | | de P_v |
| Quemador "n"..... | | Q_n |
| Relación real..... | aire / combustible | AC_r |
| Relación teórica..... | aire / combustible | $AC_{teorico}$ |
| Relación seca)..... | aire combustible (base | AC_1 |
| Relación aire combustible (humedad y exceso de aire)..... | | AC_2 |
| Soplador aire..... | | de S |
| Sumidero..... | | 0 |
| Temperatura paredes..... | | de las T_1 |
| Temperatura referencia..... | | de T_∞ |
| Temperatura promedio..... | | T_2 |
| Tiempo horno..... | de ciclo térmico del | t_{ciclo} |

| | | |
|----------------------------|------------------------------|-----------------|
| Tren combustible..... | de | TC |
| Viscosidad cinemática..... | | ν |
| Volumen aire..... | de | V_{aire} |
| Flujo húmedo..... | másico de aire | \dot{m}_{ah} |
| Flujo seco..... | másico de aire | \dot{m}_{as} |
| Flujo agua..... | másico de vapor de | \dot{m}_{va} |
| Kilogramos seco..... | de aire | kg_{as} |
| Humedad relativa..... | | W_s |
| Flujo salida..... | másico de vapor de agua a la | \dot{m}_{vas} |
| Humedad absoluta..... | | H_s |
| | | CONUEE |
| | | LTE |
| | | INECC |
| | | SEMARNAT |

Bibliografía

[1] Corona, Jesús. 2007. Tesis. Análisis del proceso en la elaboración de tablas refractarias de grupo industrial Morgan, S.A. de C.V. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de Reforma, Hidalgo.

[2] Comisión Nacional para el ahorro de energía (CONAE). 1996. Fichas Técnicas: Procesos térmicos. Quemadores con tubos radiantes. Ciudad de México

[3] Comisión Nacional para el ahorro de energía (CONAE). 1996. Fichas Técnicas: Procesos térmicos. Aislamientos. Ciudad de México

[4] Comisión Nacional para el ahorro de energía (CONAE). 1996. Fichas Técnicas: Procesos térmicos. Recuperadores de calor. Ciudad de México

[A] Fundamentals, ASHRAE Handbook. 2017. I-P Editon

[5] IDAE. 1987. Manuales técnicos y de instrucción para conservación de la energía. Tomo 11: Hornos Industriales. Madrid

[6] Noriega Giral Luis E. Apuntes de clase. Tomo: Procesos de combustión. Universidad Nacional Autónoma de México.

NOM-002-SECRE-2010, Norma Oficial Mexicana, Instalaciones de Aprovechamiento de Gas natural
NOM-009-ENER-2014, Eficiencia energética en sistemas de aislamientos térmicos industriales
NOM-002-STPS-2010, Norma Oficial Mexicana, Condiciones de seguridad-Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.

NOM-009-ENER-2014. Eficiencia energética en sistemas de aislamientos térmicos industriales.

[7] PAE, 2018. Diagnostico energético en Mercantil Exportadora Rochnos, S.A. de C. V.

[8] Pascua, Felix. 1995. Tesis. Optimización del proceso de Esmalte Porcelanizado Universidad Panamericana, Ciudad de México.

[y] Hoja de seguridad de PEMEX

[10] Yañus Cengel

[11] Comisión Nacional para el Ahorro y Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). 2018. Propuestas de Instrumentos para facilitar medidas de eficiencia energética en el sector industrial de México.

[12] Secretaria de Energía. 2016. Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios.