



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**REDISEÑO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE PAILAS
DE ALUMINIO PRIMARIO PARA UNA EMPRESA LAMINADORA DE
ALUMINIO.**

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para
optar al título de Ingeniero Mecánico

Tutor académico:

Nilo Espinoza. *Ing.*

Autores:

López A. Andrea.

Sáez S. Delmaira.

Naguanagua, Octubre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**REDISEÑO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE PAILAS
DE ALUMINIO PRIMARIO PARA UNA EMPRESA LAMINADORA DE
ALUMINIO.**

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para
optar al título de Ingeniero Mecánico

Tutor académico:

Nilo Espinoza. *Ing.*

Autores:

López A. Andrea.

Sáez S. Delmaira.

Naguanagua, Octubre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada “*Rediseño de un sistema de precalentamiento de pailas de aluminio primario para una empresa laminadora de aluminio.*”, presentada por los bachilleres: **López Andrea** y **Sáez Delmaira**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **15.746.412** y **14.714.177**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Nilo Espinoza, *Ing.*

Presidente del jurado

Prof. Richard Rodríguez, *Ing.*

Miembro del jurado

Prof. Arístides Boada, *Ing.*

Miembro del jurado

En Naguanagua a los ____ días del mes de _____ de 2009



RESUMEN

Actualmente en la empresa CVG Alucasa, ubicada en la urbanización industrial Caribe carretera nacional Guacara, en el área de fusión y colada se requiere del secado de la materia prima antes de su fusión para la producción de laminados de aluminio. Esta se presenta en forma de pailas de 600 kg aproximadamente y son calentadas por gas natural durante un periodo de tiempo de 8 horas hasta alcanzar una temperatura de 110 °C a través de una llama directa en un área expuesta al ambiente y eliminar la humedad presente que podría causar explosiones dentro de los hornos de fusión; lo que conlleva a un mal aprovechamiento de la energía (gas natural), así como también la posible contaminación de las pailas por impurezas. Debido a esta situación y con base en una investigación bibliográfica se plantearon posibles soluciones y se seleccionó el sistema de precalentamiento más adecuado tomando en cuenta las necesidades de la empresa. Este consiste en el secado de las pailas de aluminio primario a través del aprovechamiento de los gases residuales provenientes de los hornos de fusión, los cuales son llevados mediante conductos a la cámara de precalentamiento. Este material será transportado por un elemento móvil que se desplaza por un sistema de transmisión accionado por un motor eléctrico y una caja reductora, hasta el interior de la cámara de precalentamiento donde permanecerán por un periodo de tiempo no mayor a 4 horas. Posteriormente se determinó que el proyecto es factible desde el punto de vista económico. Finalmente se elaboraron los planos requeridos con las especificaciones y detalles necesarios para la construcción del sistema de precalentamiento de pailas de aluminio primario.



CAPÍTULO I EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La empresa CVG – ALUCASA está localizada en la Urbanización Industrial Caribe carretera nacional Guacara - San Joaquín a 19 kilómetros de la ciudad de Valencia – Estado Carabobo.

El proceso de producción en el área de fusión y colada actualmente es realizado de la siguiente forma:

El aluminio primario es entregado en forma de lingotes o pailas desde el almacén al área de precalentamiento por un operario a través de un montacargas que lo transporta en lotes apilados de 4 o 5 pailas, donde son calentados con una llama que incide directamente en ellas para eliminar toda la humedad que puedan presentar.

Esta área de precalentamiento está compuesta por una tubería de 76,2 mm (3pulg) dispuesta a lo largo de 20 m y la misma tiene agujeros de 25 mm de diámetro distanciados entre sí a 400 mm alimentada por gas natural, ver figura 1.1, teniendo como capacidad de precalentamiento 80 pailas en total.

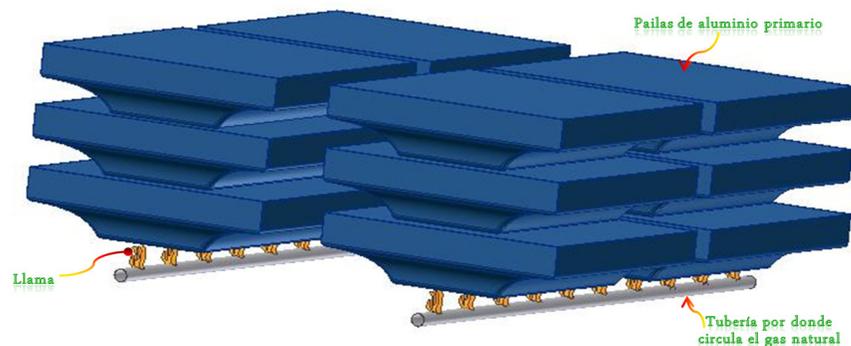


Figura 1. 1 Sistema de Precalentamiento Actual.



El tiempo de precalentamiento de las pailas es 8 horas para garantizar la eliminación de toda la humedad que puedan presentar; lo que implica un consumo de gas considerable equivalente al 20% consumido por toda la planta. Luego el aluminio primario es transportado a los hornos de fusión por el operador de montacargas en lotes apilados de cuatro pailas; además de este aluminio, se le agrega un 36 % de material de aluminio reciclable y los aleantes (hierro y silicio).

Terminada esta etapa el metal líquido que sale del horno, ver figura 1.2, es trasvasado al horno de retención con el objetivo de estabilizar la temperatura del metal fundido de allí es llevado el metal de manera gradual a la unidad de colada continua que la transforman en bobina de aluminio para luego ser procesado por los equipos de laminado.

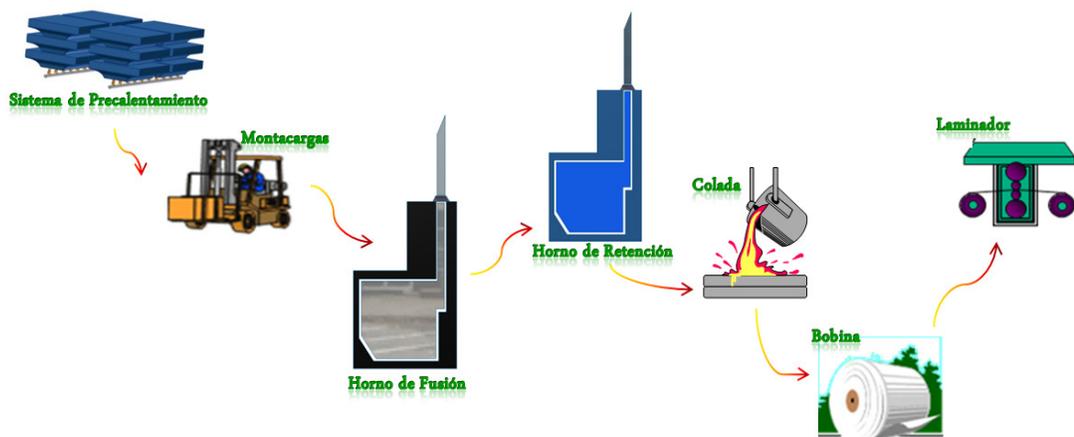


Figura 1. 2 Proceso de Producción en el Área de Fusión y Colada

Por otra parte, los modernos procesos y maquinarias con los que cuenta ALUCASA ofrecen productos laminados de aluminio de bajo espesor, utilizados en otras industrias como materia prima, tales como:

- Industria de Alimentos.
- Industria Automotriz.



- Industria Refrigeración.
- Industria Construcción.
- Industria del Empaque y Uso Doméstico.

En el área de productos de consumo masivo ALUCASA mantiene un 95% de participación del mercado nacional y en el área de refrigeración doméstica y automotriz cubre la demanda local en su totalidad. Un 50% de la producción de papel y láminas de aluminio (foil) son destinados a la exportación para los mercados de Estados Unidos, México, el Caribe, América del Sur y la Comunidad Europea con el propósito de expandir aun más su mercado y satisfacer a todos los clientes con productos de calidad en un constante empeño por proyectar la empresa hacia el futuro. La estratégica posición geográfica de Venezuela ofrece las condiciones para una variada y dinámica comercialización con todos los países del mundo.

Aluminios de Carabobo, S.A (ALUCASA) es la primera y única empresa venezolana que ofrece productos laminados y de papel de aluminio para consumo masivo e industrial, a nivel nacional e internacional.

1.2 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.

La empresa proyecta ampliar su capacidad de producción en un 60% motivado a la demanda del producto, para esto, deben haber cambios en la maquinaria y de las limitaciones operacionales que se presentan constantemente en el sistema actual de precalentamiento de las pailas, ver figura 1.3, como son: el uso inapropiado del combustible: el poco control de tiempo de permanencia del aluminio en el área de precalentamiento, así como la falta de control en la regulación de la llama (ya que se realiza visualmente, apreciando el color de la llama para graduar la relación aire



combustible); la exposición de las pailas al aire libre: en este momento no hay un sistema de precalentamiento que proteja la materia prima de las impurezas que se puedan presentar en el área de fusión y colada (ambiente) y se pierde gran parte del calor entregado por la llama; el sistema de traslado es muy lento: las pailas inicialmente se encuentran en el almacén, en donde un montacargas las traslada al área de precalentamiento; después de cumplir su ciclo allí se traslada el aluminio primario con el montacargas hasta la entrada del horno, al finalizar, el mismo operador de montacargas las introduce al horno de fusión; pero esto trae consigo una pérdida de calor, ya que la mayor parte de la energía que acumulan las pailas en el área de precalentamiento, es cedida al ambiente por el tiempo que duran hasta la entrada del horno; el riesgo presente para los operadores del área: ya que las pailas de aluminio primario deben estar libre de toda humedad antes de ser colocadas en los hornos para evitar una posible explosión de las mismas pudiendo traer pérdidas humanas.

Los problemas anteriormente mencionados traen como consecuencia: pérdida del combustible, exposición de los lingotes a impurezas que se puedan presentar en el ambiente, la baja producción de los laminados de aluminio y principalmente el riesgo de explosiones dentro de los hornos de fusión debido a la humedad que pudieran quedar en las pailas de aluminio primario causando pérdidas tanto humanas como materiales; por ello se hace evidente que el sistema de secado o precalentamiento con el que cuenta actualmente la empresa es deficiente en lo que respecta a funcionalidad.

Entonces, por lo anteriormente nombrado se requiere de un rediseño que permita optimizar las operaciones que conforman este proceso para que así haya un mejor aprovechamiento de combustible, una mayor seguridad para el operario y una disminución en el tiempo de secado, presentando un aumento significativo en la producción, satisfaciendo así la proyección de la demanda futura y logrando un importante ahorro energético para la empresa.



Figura 1. 3 Condiciones del sistema actual de precalentamiento de pailas de aluminio.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Considerando la situación problemática presente en la empresa (ALUCASA), se plantea la siguiente formulación:

¿Qué sistema de precalentamiento de pailas de aluminio primario podrá satisfacer las condiciones requeridas de producción, seguridad y ahorro energético para una empresa laminadora de aluminio?

1.4 OBJETIVO GENERAL.

Rediseñar el sistema de precalentamiento de pailas de aluminio primario para una empresa laminadora de aluminio.



1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Evaluar el sistema que presenta actualmente la empresa.
- Proponer posibles soluciones al problema planteado.
- Seleccionar la mejor propuesta de solución al problema planteado.
- Determinar los parámetros de diseño del sistema de precalentamiento de pailas de aluminio.
 - Realizar el diseño térmico y mecánico de la propuesta de solución seleccionada.
 - Seleccionar y/o diseñar los componentes según la propuesta de solución.
 - Realizar el estudio técnico-económico de la propuesta de solución seleccionada.

1.6 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

CVG Aluminio de Carabobo, S.A. (ALUCASA) es la primera y única empresa venezolana que ofrece productos laminados de aluminio para consumo masivo e industrial, en el ámbito nacional e internacional, manteniendo y mejorando la satisfacción de los clientes en el tiempo y la calidad requerida. Por esta razón la empresa tiene la necesidad de aumentar la productividad en un 60% para satisfacer demandas futuras con lo cual es necesario disminuir el tiempo de producción y aumentar la capacidad de la planta. Por el gran potencial gasífero con que cuenta Venezuela, muchas empresas entre ellas CVG-ALUCASA utilizan el Gas Natural como recurso energético indispensable en una parte importante de sus equipos en planta, debido a su bajo costo.



Debido a que el proceso productivo se inicia en el área de fusión y colada, en éste se deben presentar unas condiciones lo suficientemente favorables para garantizar la obtención del producto que cumpla con las exigencias del mercado en cuanto a calidad, volumen y oportunidad asegurando las mejores condiciones de productividad y rentabilidad.

La elaboración de este trabajo especial de grado permite en primer lugar brindar una solución a la problemática presente en la empresa, en cuanto a la disminución o eliminación del riesgo de posibles accidentes laborales como la explosión que pudiese ocasionar la presencia de humedad en las pailas de aluminio al ser introducidas a los hornos de fusión, así como la reducción de la exposición al excesivo calor al cual está sometido el operario de dicha área, presentando así unas favorables condiciones ambientales y la utilización eficiente de los recursos energéticos como el gas natural lo que generará un ahorro energético disminuyendo así los gastos operativos y el impacto ambiental.

Este estudio contribuirá a aportar información en el área de diseño de sistemas de precalentamiento de pailas de aluminio primario en una planta de laminación; completar conocimientos generales de diseño, sistemas de combustión, procesos térmicos, entre otros, por medio de la obtención de la experiencia obtenida en el desarrollo del proyecto de esta investigación.

1.7 LIMITACIONES.

Para la elaboración del estudio del rediseño del sistema de precalentamiento de pailas se consideran las siguientes limitaciones:



El espacio físico para la realización del rediseño del sistema de precalentamiento deberá ser el mismo donde se encuentra el sistema actual, el cual es de 140 m^2 .

Poca información e indisponibilidad de instrumentos de medición de variables requeridos para el rediseño (planos y manuales, entre otros), del sistema de precalentamiento que hay actualmente en ALUCASA.

Los recursos económicos que deba suministrar la empresa para la obtención de la información necesaria para el desarrollo del proyecto.

1.8 DELIMITACIONES.

Delimitación de espacio (geográfico): La investigación se desarrollara en las instalaciones de la empresa de laminados de aluminio CVG Aluminios de Carabobo, S.A. (ALUCASA), ubicada en la Urbanización Industrial Caribe carretera nacional Guacara - San Joaquín a 19 kilómetros de Valencia – Estado Carabobo.

Delimitación de contenido: En el presente proyecto se desarrollará el diseño del sistema de precalentamiento de pailas de aluminio primario de la línea de producción de CVG Aluminios de Carabobo, S.A. (ALUCASA).



CAPÍTULO II

MARCO TEÒRICO

2.1 ANTECEDENTES.

A continuación se presentan los antecedentes que se han considerado por tener relación con el tema tratado en este Trabajo Especial de Grado.

➤ Barajas V. Jesús y Contreras H. **“Cálculo de las modificaciones necesarias para incrementar la eficiencia de un horno industrial utilizado para el calentamiento de aceite.”** Universidad de Carabobo, Venezuela. 2000.

El objetivo principal es “Mejorar el aprovechamiento de la energía suministrada por la combustión en el horno de calentamiento indirecto, con el fin de que el aceite térmico absorba la mayor cantidad de calor posible con menos suministro de combustible”. En el trabajo mencionado se abordan temas de interés como son: los hornos industriales y su clasificación, evaluación de la eficiencia del horno, evaluación y cálculo del proceso de combustión entre otros.

Después de realizar el estudio se determinó que de aplicarse las modificaciones recomendadas, la eficiencia del horno aumentaría de un 55% a un 74%, adicional a esto no se requeriría ningún tipo de modificación estructural del horno.

➤ Cardoza Antonio y Pereira Leonardo. **“Diseño de un sistema de pintado y secado de noyos en una planta de fabricación de piezas automotrices por procesos de fusión.”** Universidad de Carabobo, Venezuela. Enero 2004.

Este tiene como objetivo diseñar un sistema de pintado y secado de noyos (secciones de arena que se introducen en los agujeros del molde ara producir piezas



mecánicas que contienen secciones huecas o entrantes) para aumentar la producción del proceso de moldeado en una planta de fabricación de piezas automotrices por procesos de fusión. Con este trabajo de grado se logra disminuir en un 86% el tiempo de manufactura del noyo; ya que el tiempo crítico, esta centralizado en la etapa del secado en donde actualmente el secado es realizado al aire libre de forma natural, empleando un tiempo de alrededor de 75min, mientras que con el sistema diseñado el tiempo se reduce a 3min.

➤ Estaba Pedro y Herrera Luís. “**Diseño y construcción de un horno para fundir aluminio en un laboratorio de evaluación de materiales.**” Universidad de Carabobo, Venezuela. Enero 2006.

Esta monografía explica el diseño y la construcción de un horno de crisol de aluminio y sus aleaciones utilizando como fuente de calor resistencias eléctricas. Finalmente se diseño y construyó un horno eléctrico basculante con capacidad para fundir 17 kg de aluminio y que consume una potencia de 600W, lo que es suficiente para desocupar totalmente el contenido de crisol. Se realizaron pruebas para su puesta a punto en las instalaciones de la empresa ALUCASA, dando resultados satisfactorios, el tiempo de fusión fue menor al estimado teóricamente, de esta manera se cumplió con los requerimientos de la empresa.

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

A continuación se describen las definiciones y ecuaciones que fueron utilizadas para el diseño del sistema de precalentamiento de pailas de aluminio primario.



2.2.1 HORNOS. ⁽¹⁾

Se le llama horno, a un dispositivo mediante el cual la energía suministrada por un combustible al quemarse o por una corriente eléctrica, se utiliza para elevar la temperatura en su interior, con lo que es posible efectuar en él operaciones físicas o procesos químicos que exijan temperaturas elevadas. La elección de una de las dos posibilidades (de combustión o eléctrica) para la realización de un caso concreto de operación física o proceso químico se hace de acuerdo con consideraciones económicas y técnicas. En general puede decirse que la kilocaloría producida por combustión es más barata que la producida eléctricamente. Ahora bien, los diferentes tipos de hornos, así como las operaciones o procesos que en ellos pueden efectuarse, tienen un conjunto de características a considerar para definir correctamente el balance económico. Estas circunstancias hacen posible que hayan hornos de combustión y eléctricos funcionando económicamente, aun en operaciones o procesos análogos.

2.2.2 TIPOS DE HORNOS INDUSTRIALES PARA CALENTAMIENTO. ⁽¹⁾

Los hornos para calentamiento suelen clasificarse según:

1) *El objetivo por el cual se calienta el material*; por ejemplo, para revenido, recocido, carburizado, cementación, forjado, calentamiento para formar o laminar, esmaltado, o algún otro fin.

2) *La naturaleza de la transferencia de calor del material*; las principales variedades son:



➤ **Hornos tipo estufa**, en los que el calor se transfiere de los productos de las combustión del combustible, en contacto directo con el material calentado, por convección y radiación directa de los gases calientes o por reradiación de las paredes calientes del horno.

➤ **Hornos de mufla**, en los que el calor de los gases de combustión se transmite por conducción a través de una mufla metálica o refractaria que protege el material calentado de su contacto con los gases, y luego transmitido por radiación del interior de la mufla al material calentado, que en ocasiones se rodea con gases inertes para impedir su contacto con el aire.

➤ **Hornos de baño líquido**, en los que se calienta una marmita metálica en el exterior o por inmersión. Esta marmita contiene un medio líquido de calentamiento o procesamiento en el cual se transfiere calor al material sumergido en él.

➤ **Horno calentado por tubos radiantes**, en el que el combustible es quemado dentro de tubos metálicos o refractarios los cuales transmiten el calor a la carga por radiación.

➤ **Hornos de recirculación**, en los que el combustible es quemado en una cámara externa, y el producto de dicha combustión mezclado con aire, se hace circular rápidamente a través de la cámara de calentamiento para calentar la carga.

3) **El método por el que se inyecta el combustible en el horno**; esta clasificación se aplica principalmente al horno tipo estufa e indica si es de inyección directa de combustión por arriba ó de combustión por debajo ó calentado por tubos radiantes.



4) *El método para manejar el material dentro del horno;* en los hornos tipo **discontinuo** el material calentado que se cargó en el horno permanece en la misma posición hasta que se extrae después de que se ha calentado lo suficiente. En un horno **continuo** el material se desplaza a través del mismo por medios mecánicos que se incluyen empujadores, transportadores de cadenas, hogares circulares rotatorios, vagonetas, vigas viajeras y hogares de rodillos. Los hornos continuos son principalmente para ahorrar mano de obra y pueden o no economizar combustible.

2.2.3 MÉTODOS PARA ECONOMIZAR CALOR.⁽¹⁾

Los métodos para conservar el calor incluyen el uso de recuperadores o regeneradores, calderas de calor de desecho, aislamientos de los refractarios y control automático de la temperatura en la construcción y operación del horno.

Los recuperadores extraen parte del calor de los gases de la combustión que escapan y lo devuelven al horno mediante el precalentamiento del aire de combustión o el combustible que se quema.

2.2.4 BALANCE ENERGÉTICO EN HORNOS DE LLAMA PARA RECALENTAMIENTO.

El balance energético de un horno varía, fundamentalmente, en función de si es un horno continuo o un horno intermitente. En los hornos continuos interviene la producción en kg/h o en ton/h, mientras que en los hornos intermitentes es más importante la carga introducida en cada operación en kg o en ton.



La temperatura en los hornos continuos es prácticamente constante en cada zona a lo largo del tiempo y la temperatura de la carga varía a lo largo del tiempo, pero se mantiene relativamente constante en todo el horno en un instante dado. Dentro de los hornos intermitentes deben distinguirse los procesos en que la temperatura de regulación del horno permanece prácticamente constante, de los procesos en que la temperatura del horno sigue un ciclo de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento sin extraer la carga del interior del horno; en los primeros, al introducir la carga, baja evidentemente la temperatura del horno, se enfría el revestimiento cediendo su calor a la carga y la energía cedida por los elementos calefactores se utiliza en calentar nuevamente el revestimiento y la carga hasta la temperatura de regulación del horno, cuyo valor de consigna ha permanecido constante.

El consumo de combustible de un proceso en un horno industrial se determina calculando los componentes del balance energético, cuando se trata del diseño de un horno, o midiéndolos en su funcionamiento real, cuando se trata de un horno ya construido.

En los hornos continuos, y el ciclo completo de una carga en los hornos intermitentes. Sin embargo, es frecuente que muchos hornos continuos funcionen únicamente durante 1 ó 2 turnos de trabajo al día, por lo que las pérdidas de calor durante las horas de parada del horno deben tenerse también en cuenta.

En todo balance energético es fundamental que las condiciones al final del periodo en que se hacen las mediciones sean las mismas que al comienzo. Por ello, en los hornos intermitentes las mediciones cubren una carga completa o un ciclo completo y en los hornos continuos las condiciones de trabajo deben ser suficientemente constantes para que las pequeñas variaciones que se produzcan sean despreciables.



2.2.5 EL ALUMINIO.

El aluminio es uno de los principales componentes de la corteza terrestre conocida, de la que forma parte en una proporción del 8,13%, superior a la del hierro, que se supone es de un 5%, y solamente superada entre los metales por el silicio (26,5%). El aluminio no se encuentra puro en la naturaleza, sino formando parte de los minerales, de los cuales los más importantes son las bauxitas, que están formadas por un 62-65% de alúmina (Al_2O_3), hasta un 28% de óxido de hierro (Fe_2O_3), 12-30% de agua de hidratación (H_2O) y hasta un 8% de sílice (SiO_2).

2.2.5.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ALUMINIO.

El aluminio es un metal blanco brillante, que pulido semeja a la plata. Cristaliza en red cúbica centrada en las caras (FCC). Su peso específico es igual a $2,7 \text{ g/cm}^3$, es decir, casi 1/3 del hierro ($7,87 \text{ g/cm}^3$). El único metal industrial más ligero que el aluminio es el magnesio, de peso específico $1,74 \text{ g/cm}^3$. Su conductividad eléctrica es un 60% de la del cobre y 3,5 veces mayor que la del hierro. Su punto de fusión es 660°C y el de ebullición 2.450°C . Este punto de fusión relativamente bajo, unido a su punto de ebullición bastante alto facilita su fusión y moldeo.

2.2.5.2 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ALUMINIO.

La propiedad química más destacada del aluminio es su gran afinidad con el oxígeno, por lo que se emplea entre otras cosas, para la desoxidación de los baños de acero, para la soldadura aluminio-térmica ($Al + Fe_2O_3$) y para la fabricación de explosivos, entre otros.



A pesar de esto, y aunque parezca un contrasentido, el aluminio es completamente inalterable en el aire, pues se recubre de una delgada capa de óxido, de algunas centésimas de micra, que protege el resto de la masa de la oxidación. Debido a esta película protectora, resiste también a la acción del vapor de agua, el ataque nítrico concentrado y muchos otros compuestos químicos. En cambio, es atacado por el ácido sulfúrico, el clorhídrico, el nítrico diluido y las soluciones salinas.

2.2.5.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO.

Las propiedades mecánicas del aluminio más interesantes son su débil resistencia mecánica, y su gran ductilidad y maleabilidad, que permite forjarlo, trefilarlo en hilos delgadísimos y laminarlo en láminas o panes tan finos como los del oro, hasta de un espesor de 0,0004 mm (0,4 micras). A la temperatura de 500°C se vuelve frágil y se puede pulverizar fácilmente.

2.2.6 REFRACTARIOS.

Es todo material resistente al calor (generalmente no metálico), que sea capaz de mantener su estabilidad física y química a altas temperatura. Estos materiales se clasifican de acuerdo a su presentación en el mercado en:

- a. Materiales refractarios modelados en fábrica (aislantes densos)
- b. Materiales refractarios no modelados en fábrica
- c. Fibras refractarias

Los materiales refractarios modelados en fábrica están compuestos por los ladrillos y piezas de formas y dimensiones normalizadas de acuerdo a la norma Covenin 17949-81, así como también, por piezas especiales cuyas dimensiones y



formas están establecidas por convenios entre el fabricante y el cliente. Por otro lado, los materiales refractarios no modelados en fábrica son aquellos que están formados por concretos modelables (*castables*), refractarios plásticos, mezclas apisonables (*Raming Mix*), mezclas para proyección (*Gun Mix*) y morteros. Estos materiales se presentan como preparaciones granulares de materiales refractarios que luego al requerir de su uso se mezclan con otro agente (aglutinante o agua) para formar una mezcla que luego será vaciada en moldes con el propósito de que al endurecerse forme la pieza requerida, o en el caso de los morteros forme un pegamento entre superficies refractarias.

Por último, las fibras refractarias son un producto derivado de la fusión de uno o más materiales crudos procesados, de característica físicas o químicas dispersas, los cuales pueden encontrarse con preformado mecánico o con liga química. Estos materiales son flexibles y se presentan en forma de mantas (*Blankets*), papel (*Papers*), y paneles (*Boards*), permitiendo así ser aplicados en superficies curvas e irregulares; o en el caso de las fibras a granel (*Fibers*) formando un aislamiento en forma modular el cual se instala por vaciado, soplado o a mano.

La función principal de los refractarios en los hornos es minimizar las pérdidas de calor a través de las paredes de este, además de esto permite que las radiaciones térmicas que inciden en él, se reflejen y se regresen incrementándose la eficiencia térmica del horno, de esta manera se logran mantener temperaturas suficientemente altas dentro del horno. Otra función importante del refractario es evitar que las partículas que llevan los gases de combustión en la chimenea, penetren en la armazón de acero. Tal penetración, en el caso de combustión con sulfuro puede provocar corrosión ácida en las placas de acero.



2.2.7 NÚMEROS ADIMENSIONALES.

En el análisis de la convección es práctica común quitar las dimensiones a las expresiones físico-matemáticas que modelan el mecanismo y agrupar las variables, dando lugar a los números adimensionales. En el estudio de convección se utilizarán los siguientes números adimensionales:

2.2.7.1 NÚMERO DE REYNOLDS.

Representa la relación que hay entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre un elemento de volumen de un fluido. Es un indicativo del tipo de flujo del fluido, laminar o turbulento. Se expresa como:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \quad (2.1)$$

Donde

V = Velocidad del fluido en la superficie obtenida con el velocímetro (m/s)

L = Longitud de la pared plana análoga (m)

ρ = Densidad del fluido (Kg/m^3)

μ = Viscosidad dinámica ($Kg/m.s$)

Re = Número de Reynolds (adimensional)

2.2.7.2 NÚMERO DE NUSSELT.

Representa la relación que hay entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transferiría si sólo existiese conducción. En general:



$$Nu = \frac{h.Lc}{k} \quad (2.2)$$

Donde

Lc = Longitud característica (m)

h = Coeficiente convectivo local ($W/m^2.K$)

k = Conductividad térmica del cuerpo ($W/m.K$)

Nu = Número de Nusselt (adimensional)

2.2.7.3 NÚMERO DE PRANDTL

Representa la relación que hay entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor o entre el espesor de la capa límite de velocidad y la capa límite térmica:

$$Pr = \frac{\text{(Difusividad molecular de la cantidad de movimiento)}}{\text{(Difusividad molecular del calor)}}$$

$$Pr = \frac{\mu.Cp}{k} \quad (2.3)$$

Donde

Cp = Calor específico del cuerpo ($J/Kg.K$)

k = Conductividad térmica del cuerpo ($W/m.K$)

μ = Viscosidad dinámica ($Kg/m.s$)

Pr = Número de Prandtl (adimensional)



2.2.7.4 NÚMERO DE RAYLEIGH.

Es un número adimensional asociado con la transferencia de calor en el interior del fluido, y es el producto del número de Grashof y el número de Prandtl. Para el caso de convección natural en una pared vertical el número de Rayleigh se define como:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Lc^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (2.4)$$

Donde:

Ra = Número de Rayleigh (adimensional).

g = Gravedad específica (m/s^2).

ΔT = Diferencial de temperatura.

Lc = Longitud característica.(m)

ν = Viscosidad cinemática (m^2/s).

α = Difusividad térmica (m^2/s)

β = Coeficiente de expansión térmica ($1/K$).

2.2.8 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR ⁽²⁾

Normalmente, se acepta que existen tres tipos de mecanismos básicos de transmisión de calor, conocidos como conducción, convección, y radiación. Se dará a continuación una breve introducción a los mismos.

2.2.8.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.⁽²⁾

La conducción es un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de temperatura alta a una región de temperatura baja dentro de un medio (sólido, líquido o gaseoso) o entre medios diferentes por medio de contacto intermolecular. La relación básica para la transferencia de calor por conducción es la *Ley de Fourier* y se expresa para una pared plana unidimensional como la que se muestra en la figura 2.1, la cual tiene una distribución de temperatura $T(x)$ y una sección de área A , como se muestra a continuación:

$$\frac{\dot{q}}{A} = \kappa \left(-\frac{dT}{dx} \right)$$

entonces el flujo de calor es:

$$\dot{q} = \kappa \cdot A \left(-\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.5)$$

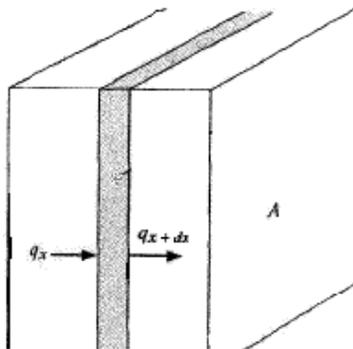
Donde:

\dot{q} = Rapidez del flujo de calor por conducción (W)

κ = Conductividad térmica del material (W/m* K)

A = Área a través de la cual fluye el calor por conducción (m^2)

dT/dx = Gradiente de temperatura en la sección (K/m)



En condiciones de estado estable la distribución de la temperatura es lineal el gradiente de temperatura se expresa como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.6)$$

Figura 2. 1 Transferencia unidimensional de calor por conducción.⁽²⁾

Sustituyendo la ecuación (2.2) en la (2.1) se tiene que, el flujo de calor se puede expresar



como:

$$\frac{\dot{q}}{A} = -\kappa \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$\frac{\dot{q}}{A} = \left(\frac{\Delta T}{L} \right) \cdot \kappa \quad (2.7)$$

2.2.8.1.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.⁽²⁾

La conductividad térmica k es una propiedad del material e indica la cantidad de calor que fluirá a través de un área unitaria si el gradiente de temperatura es la unidad. Los materiales que tienen una alta conductividad térmica se llaman *conductores*, mientras que los materiales de baja conductividad térmica se conocen como *aislantes*. La variación de la conductividad térmica con la temperatura puede despreciarse si la escala de temperatura no es grande, o si la dependencia de la conductividad con la temperatura no muy rigurosa. Pero si en un sistema dado, la diferencia de temperaturas ocasiona variaciones sustanciales en la conductividad térmica, la dependencia de esta con la temperatura deberá tomarse en cuenta.

2.2.8.1.2 CONDUCCIÓN DE CALOR EN REGIMEN TRANSITORIO.⁽³⁾

Si un cuerpo sólido es sometido, en forma rápida, a un cambio en su medio ambiente, debe transcurrir un cierto tiempo antes de que en el cuerpo se imponga la condición de la temperatura de equilibrio, este proceso se conoce como *régimen transitorio*. Se transfiere energía por convección y radiación desde la superficie hasta



los alrededores. La energía que se transfiere por conducción también ocurre desde el interior del sólido hasta la superficie, y la temperatura en cada punto del cuerpo disminuye hasta que se alcanza el estado estable. Para determinar la dependencia temporal de la distribución de temperaturas dentro de un sólido durante un proceso transitorio cuando la resistencia conductiva interna del sistema es tan pequeña comparada con la resistencia convectiva externa, que la temperatura dentro del sistema es sustancialmente uniforme en cualquier instante, se utiliza el método denominado de la *resistencia interna despreciable*.

Considérese un trozo de metal en un baño de templado después de sacarse de un horno caliente. Se supone que el sólido se extrae del horno a una temperatura uniforme T_0 y es sumergido tan rápido que el tiempo en el cual cambia a la temperatura ambiente tiende a cero. Se designa el tiempo en el que se inicia el enfriamiento como $\theta = 0$, se supone que el coeficiente de transferencia de calor h permanece constante durante el proceso y que la temperatura del baño T_∞ a una distancia lejos del lingote, no varía con el tiempo. Entonces de acuerdo con la hipótesis de que la temperatura dentro del cuerpo es sustancialmente constante en cualquier instante, un balance energético para el sólido sobre un pequeño intervalo $d\theta$ de tiempo es:

$$\begin{array}{l} \text{Cambio de energía interna} \\ \text{Del sólido durante } d\theta \end{array} = \begin{array}{l} \text{flujo neto de calor del lingote} \\ \text{al baño durante } d\theta \end{array}$$

$$-cpVdT = hA(T - T_\infty)d\theta \quad (2.8)$$

Las variables T y θ pueden ser separadas fácilmente y, para un diferencial de tiempo $d\theta$, la ecuación anterior se convierte en:



$$\frac{dT}{T - T_{\infty}} = \frac{d(T - T_{\infty})}{(T - T_{\infty})} = -\frac{hA}{cpV} d\theta \tag{2.9}$$

Donde se ha denotado $d(T - T_{\infty}) = dT$, puesto que T_{∞} es constante. Con una temperatura inicial de T_0 y una temperatura al tiempo θ de T como limites, la integración de la ecuación anterior da:

$$\ln \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = -\frac{hA}{cpV} d\theta \tag{2.10}$$

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-(hA/cpV)\theta} \tag{2.11}$$

Para desarrollar un criterio adecuado considere la conducción en estado estable a través de una pared de una pared plana de área A (figura 2.3). Una superficie se mantiene a $T_{s,1}$ Y la otra se expone a un fluido de temperatura $T_{\infty} < T_{s,1}$. La temperatura de esta última superficie será algún valor intermedio, $T_{s,2}$ para el que $T_{\infty} < T_{s,2} < T_{s,1}$. De aquí, en condiciones de estado estable, el balance de energía de la superficie se reduce a:

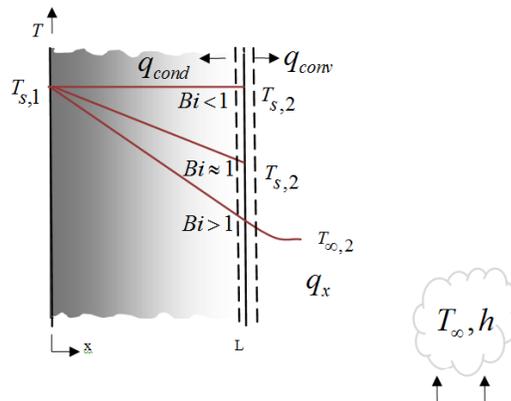


Figura 2. 2 Efecto del número de Biot en la distribución de temperatura de estado estable en una pared plana con convección en la superficie.⁽³⁾



$$\frac{kA}{L}(T_{s,1} - T_{s,2}) = hA(T_{s,2} - T_{\infty}) \quad (2.12)$$

Donde

k = Conductividad térmica del sólido

Al recomodar, se tiene:

$$Bi = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{T_{s,2} - T_{\infty}}$$
$$Bi = \frac{L/kA}{1/hA}$$
$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}}$$
$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (2.13)$$

La cantidad (hL/k) es un parámetro adimensional y se denomina *número de Biot*; este número proporciona una medida de la caída de temperatura en el sólido en relación con la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido. Entonces si $Bi \ll 1$, la resistencia a la conducción dentro del sólido es mucho menor que la resistencia a la convección a través de la capa límite del fluido; en consecuencia, es razonable la suposición de una distribución de temperatura uniforme.

Por sencillez, se acostumbra a definir la longitud característica de la ecuación (4) como la relación entre el volumen del sólido y el área de la superficie, $L = V/A$; entonces la ecuación (4) se expresa como:

$$\frac{hA}{cpV}\theta = \frac{h\theta}{cpLc}$$



$$\frac{h\theta}{cpLc} = \frac{hLc}{k} \frac{k}{cp} \frac{\theta}{Lc^2}$$
$$\frac{hLc}{k} \frac{k}{cp} \frac{\theta}{Lc^2} = \frac{hLc}{k} \frac{\alpha\theta}{Lc^2} \quad (2.14)$$

$$\frac{hA}{cpV} \theta = Bi * Fo \quad (2.15)$$

Donde

$$Fo = \frac{\alpha\theta}{Lc^2} = \text{Número de Fourier} \quad (2.16)$$

$$\alpha = \frac{k}{cp} = \text{Difusividad térmica} \quad (2.17)$$

Finalmente despejando el tiempo de la ecuación (2.21), se tiene que:

$$t = \frac{Ln\left(\frac{T(x) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}\right)}{\psi} \quad (2.18)$$

Donde

$$\Psi = \frac{h.A}{m.cp} \quad (2.19)$$

2.2.8.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN ⁽²⁾

Es la transferencia de calor asociada al transporte de masa. Básicamente la convección tiene lugar entre una superficie sólida y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo a la naturaleza del flujo en: *convección libre (o natural)*, cuando el flujo



es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidades ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido; y *convección forzada*, cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de la transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo más apropiado es la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{q} = A \cdot h \cdot \Delta T \quad (2.20)$$

Donde:

\dot{q} = Flujo de calor por convección (W)

h = Coeficiente de transferencia de calor por conducción ($W/m^2 * K$)

ΔT = Diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido (K)

A = Área de intercambio térmico (m^2)

2.2.8.2.1 CONVECCIÓN FORZADA

Los flujos forzados pueden ser internos o externos. En un flujo interno, el flujo es forzado por medio de un ventilador si el fluido es un gas, o por una bomba si se trata de un líquido. En esta sección serán considerados únicamente flujos simples de convección forzada sobre superficies lisas.

A continuación se muestra las ecuaciones utilizadas en la convección forzada para flujo en el interior de conductos:



La escala de longitud de los números de Reynolds y de Nusselt para conductos no circulares es el *diámetro hidráulico*, representada por la siguiente ecuación:

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{P} \quad (2.21)$$

Donde

D_h = Diámetro hidráulico (m)

A_c = Área de la sección transversal de flujo (m^2)

P = Perímetro mojado (m)

entonces el número de Reynolds queda:

$$Re_{D_h} = \frac{\left(\frac{\dot{m}}{A_c}\right) \cdot D_h}{\mu} \quad (2.22)$$

Siendo

Re_{D_h} = Número de Reynolds (adimensional)

\dot{m} = Flujo másico de aire (kg/s)

A_c = Área de la sección transversal de flujo (m^2)

D_h = Diámetro hidráulico (m)

El número de Nusselt:

$$Nu_{D_c} = Nu_{D_h} \cdot \Gamma \quad (2.23)$$

Y



$$Nu_{Dh} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re_{Dh} - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.24)$$

Donde

Nu_{Dhc} = Número de Nusselt corregido (adimensional)

Nu_{Dh} = Número de Nusselt (adimensional)

f = factor de fricción (adimensional)

Pr = Numero de Prandtl (adimensional)

Γ = Factor de corrección por variación de las propiedades (adimensional)

El factor de fricción es:

$$f = (0,790 \cdot \ln(Re_{Dh}) - 1,64)^{-2} \quad (2.25)$$

El coeficiente de convección h local es:

$$h_c = \left(\frac{k}{D_h}\right) \cdot Nu_{Dhc} \quad (2.26)$$

2.2.8.2.2 CONVECCIÓN NATURAL.

Un fluido caliente tiende a elevarse. Esto se debe a la fuerza de empuje producida por la acción conjunta de las diferencias de densidad y el campo gravitatorio terrestre. Cuando aparecen estos flujos se dice que hay convección natural, libre o por empuje. Siempre que el flujo se calienta o enfría en un campo gravitatorio, existe la posibilidad de que se produzca convección natural. Asimismo



la convección natural puede ser interna o externa y esta definida para diferentes superficies. A continuación se muestran los números adimensionales utilizados en la convección natural para el caso de flujo alrededor de superficies planas verticales:

Número de Nusselt para flujo sobre una superficie vertical

Con el número de Rayleigh, se determina el número de Nusselt correspondiente a la configuración de flujo en estudio, para el caso de flujo turbulento se utiliza la siguiente ecuación.

$$Nu = 0,68 + 0,670 \cdot (Ra \cdot \varphi)^{1/4} \cdot (1 + 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot Ra \cdot \varphi)^{1/12} \quad (2.27)$$

$$\varphi = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (2.28)$$

Donde

Pr = Número de Prandtl (adimensional)

Ra = Número de Rayleigh (adimensional)

Número de Nusselt para flujo sobre una superficie horizontal calentada por la cara superior

Con el número de Rayleigh, se determina el número de Nusselt correspondiente a la configuración de flujo en estudio.

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3} \quad (2.29)$$



Nu = Número de Nusselt (adimensional)

Ra = Número de Rayleigh (adimensional)

2.2.8.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN. ⁽³⁾

Es la transferencia de energía transportada por ondas electromagnéticas. Mientras que la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. De hecho la transferencia de calor por radiación es más eficiente en el vacío. Considere los procesos de transferencia de radiación para la superficie de la figura 2.5. La radiación que la superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área (W/m^2) se denomina *potencia emisiva superficial* E . Hay un límite superior para la potencia emisiva, que es establecida por la ley de Stefan Boltzman

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.30)$$

Donde

T , es la temperatura absoluta (K)

σ , es la constante de Stefan Boltzman y su valor es: $5,669 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$

Dicha superficie se le denomina radiador ideal o cuerpo negro. El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y esta dado por:

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.31)$$

Donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada *emisividad*, con valores en el intervalo de $0 \leq \varepsilon \leq 1$; esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro.

La radiación también puede incidir sobre la superficie de un material desde sus alrededores; se designa la velocidad a la que toda esa radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como la *irradiación* G , ver figura 2.5.

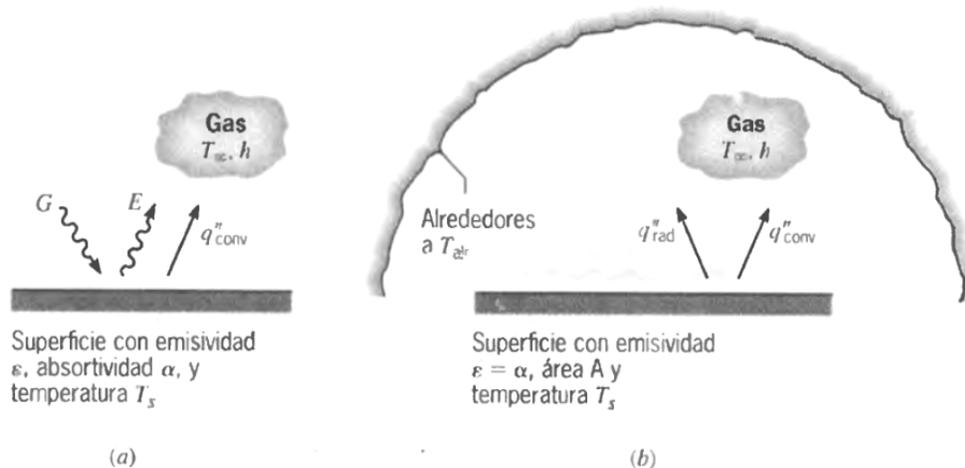


Figura 2. 3 Intercambio de radiación: (a) en la superficie, y (b) entre una superficie y sus alrededores.⁽³⁾

Una parte de la irradiación, o toda, tal vez sea *absorbida* por la superficie, y así se incrementaría la energía térmica del material; la velocidad a la que la energía radiante es absorbida por área unitaria se evalúa a partir de una propiedad de la superficie denominada absorptividad α . Es decir,

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2.32)$$



Dónde $0 \leq \alpha \leq 1$. Si $\alpha < 1$ y la superficie es opaca, partes de la irradiación se reflejan. Si la superficie es semitransparente, partes de la irradiación también se transmite. Otra propiedad presente en la radiación es la transmitancia τ que representa la fracción transmitida. La mayoría de los sólidos no transmiten radiación térmica, por lo que se toma la transmitancia igual a cero; entonces: $\rho + \alpha = 1$

Un caso especial que ocurre con frecuencia implica el intercambio de radiación entre una superficie pequeña a T_s y superficie isotérmica mucho más grande que rodea por completo a la pequeña (figura 2.5.b); entonces, la velocidad neta de transferencia de calor por radiación desde la superficie, es:

$$q_{rad} = A\epsilon\sigma(T_s^4 - T_{air}^4) \quad (2.33)$$

2.2.9 RESISTENCIAS TERMICAS ⁽³⁾

Hay una analogía entre la difusión de calor y la carga eléctrica; de la misma manera que se asocia una resistencia eléctrica con la conducción de electricidad, se asocia una resistencia térmica con la conducción de calor. La resistencia térmica para la conducción es:

$$Rt_{cond} = \frac{T_{S,2} - T_{S,1}}{q_x}$$
$$Rt_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (2.34)$$

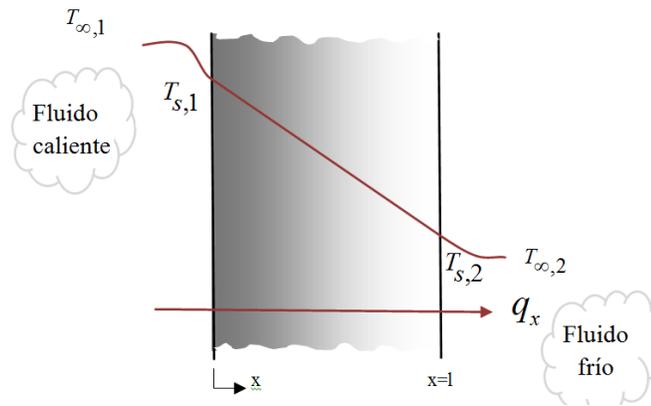


Figura 2. 4 Distribución de temperatura de la transferencia de calor por conducción a través de una pared plana.⁽³⁾

Una resistencia térmica también se asocia con la transferencia de calor mediante la convección a una superficie y mediante la radiación entre la superficie y sus alrededores.

La resistencia térmica para la convección es:

$$Rt_{conv} = \frac{\Delta T}{q}$$
$$Rt_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (2.35)$$

Y la resistencia térmica para radiación es:

$$Rt_{rad} = \frac{\Delta T}{q_{rad}}$$
$$Rt_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A} \quad (2.36)$$

Donde

$$h_{rad} \equiv \epsilon\sigma(T_S + T_{\infty})(T_S^2 + T_{\infty}^2) \quad (2.37)$$

Y

$$\Delta T = T_S - T_\infty \quad (2.38)$$

Donde:

T_S = Temperatura de la superficie.

T_∞ = Temperatura del ambiente.

Los circuitos térmicos también sirven para sistemas más complejos, como las paredes compuestas. Estas paredes incluyen cualquier número de resistencias térmicas en serie y en paralelo debido a capas de diferentes materiales; entonces para la pared compuesta en serie de la figura 2.3 respectivamente, se tiene que la transferencia unidimensional de calor se expresa como:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\Sigma Rt} \quad (2.39)$$

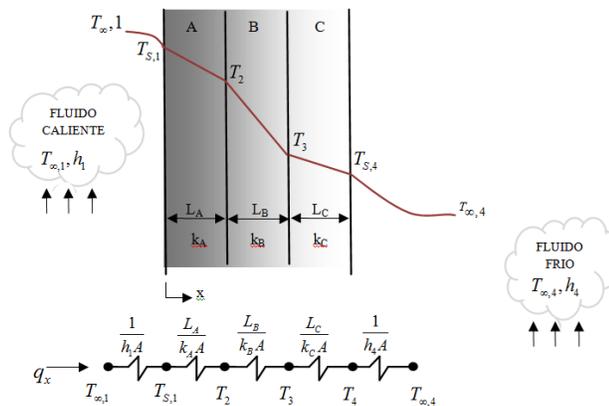


Figura 2. 5 Circuito térmico equivalente para una pared plana compuesta en serie.⁽³⁾

Donde $T_{\infty,1} - T_{\infty,4}$ es la diferencia total de temperatura, y la suma incluye todas las resistencias térmicas, por tanto



$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A} + \frac{1}{h_4 A}} \quad (2.40)$$

Con sistemas compuestos suele ser convenientes trabajar con un *coeficiente global de transferencia de calor*, U, que se define como una expresión análoga de la ley de enfriamiento de Newton. En consecuencia,

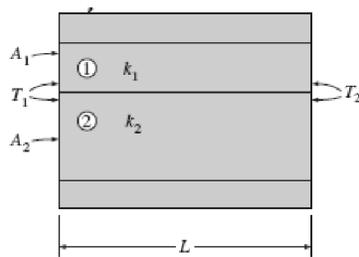
$$q_x \equiv U A \Delta T \quad (2.41)$$

Donde

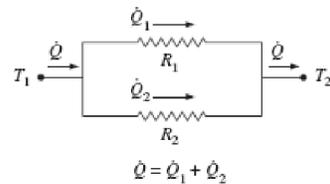
ΔT = la diferencia total de temperatura

$$U = \frac{1}{\sum RtA} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_4}} \quad (2.42)$$

Entonces la resistencia total para una configuración en serie-paralelo como la que se observa en la figura 2.4, queda como:



$$\frac{1}{\sum Rt} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.43)$$



$$\sum Rt = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.44)$$

Figura 2. 6 Circuito térmico equivalente para una pared plana compuesta en paralelo.⁽³⁾



2.2.10 ESFUERZOS EN VIGAS. ⁽⁹⁾

Una viga es cualquier elemento que soporta cargas de manera transversal a su eje longitudinal, y puede soportar cargas también en dirección axial. Una viga puede quedar cargada con alguna combinación de fuerzas o momentos distribuidos y/o concentrados; a su vez, las fuerzas aplicadas crearán fuerzas cortantes y momentos de flexión. Un análisis de carga debe encontrar la magnitud y distribución espacial de estas fuerzas cortantes y estos momentos de flexión en la viga.

2.2.10.1 TENSIÓN AXIAL.

La carga axial es uno de los tipos más sencillos de carga que se puede aplicar a un elemento. Se supone que la carga se aplica a través del centroide de área del elemento y que las dos fuerzas de oposición son colineales a lo largo del eje de las x . Los esfuerzos normales aplicados para tensión pura se pueden calcular a partir de:

$$\sigma_x = \frac{P}{A} \quad (2.45)$$

Donde

P = Fuerza aplicada sobre la viga (N)

A = Área de sección transversal (m^2)

σ_x = Esfuerzo por tensión (Pa)

2.2.10.2 ESFUERZOS DE FLEXIÓN.

Cuando la viga está sometida a flexión pura sin cargas axiales o cortantes se puede calcular el esfuerzo máximo de flexión, el cual ocurre en las fibras exteriores



de la viga, y se expresa de la forma:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z} \quad (2.46)$$

Donde

M = Momento de flexión aplicado en la sección ($N.m$)

Z = Módulo de sección de la viga (m^3)

σ_{\max} = Esfuerzo por flexión (Pa)

$$Z = \frac{I}{c} \quad (2.47)$$

Donde

I = Momento de inercia del área (m^4)

c = Distancia del eje neutro a la fibra externa (m)

2.2.10.3 ESFUERZO POR CORTE DIRECTO.

El corte directo ocurre en situaciones donde no hay flexión presente; este se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_{xy} = \frac{P}{A_{\text{cor tate}}} \quad (2.48)$$

Donde

P = Fuerza aplicada (N)

A = Área de sección transversal de corte (m^2)

τ_{xy} = Esfuerzo por corte (Pa)

2.2.10.4 COMPRESIÓN AXIAL (COLUMNAS).



Cuando se invierte la dirección de la carga axial para colocar la viga a compresión, la ecuación (2.33) no es suficiente para determinar cuál es la carga segura para este; se trata entonces de una *columna*, y puede fallar por pandeo más que por compresión.

Una columna corta fallará a compresión, una columna intermedia o una larga fallará por pandeo. El factor que determina si una columna es corta o larga es su *razón de esbeltez*, la cual se expresa como:

$$S_r = \frac{L_e}{K} \quad (2.49)$$

L_e = Longitud efectiva (m)

K = Radio de giro (m)

$$K = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.50)$$

Entonces si S_r es ligeramente menor a 10, se considera a la viga como una columna corta y se aplicará el límite elástico del material a compresión como factor límite. Para columnas largas e intermedias se requiere el cálculo de la carga crítica; para las columnas largas se utiliza la fórmula de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_e^2} = \frac{A \cdot \pi^2 \cdot E}{\left(\frac{L_e}{K}\right)^2} \quad (2.51)$$

Y para las intermedias la de Johnson:



$$P_{cr} = A \left[S_y - \frac{1}{E} \left(\frac{S_y \cdot S_r}{2\pi} \right)^2 \right] \quad (2.52)$$

Donde

P_r = Carga crítica (kN)

A = Área de la sección transversal (m²)

E = Módulo de elasticidad (Pa)

I = Momento de inercia (cm⁴)

S_y = Limite de fluencia elástico a compresión (Pa)

Para decidir si se requiere la ecuación de Euler o la de Johnson se determina la razón de esbeltez en el punto tangente S_{rD} y se compara con el S_r real de la columna; entonces si la razón de esbeltez de la columna queda hacia la izquierda del punto tangente será una columna Johnson y si queda del lado derecho se tratará como una Euler. Ver figura 2.7

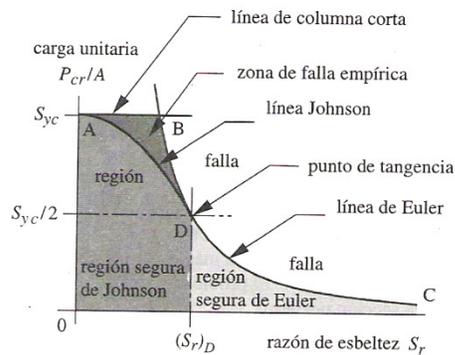


Figura 2.7 Líneas de fallas de columnas Euler, Johnson y cortas⁽⁹⁾.

$$S_{rD} = \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E}{S_y}} \quad (2.53)$$



Donde

E = Módulo de elasticidad (Pa)

S_y = Límite de fluencia elástico a compresión (Pa)

2.2.11 DISEÑO DE CONDUCTOS.

La función de un sistema de conductos es proporcionar un medio para transportar el aire desde los equipos de tratamiento (calentamiento, ventilación o acondicionamiento) de aire.

Los objetivos del proceso de diseño son especificar las dimensiones razonables para las diferentes secciones del sistema de conductos, para estimar la presión en puntos clave, para determinar los requerimientos que deberá cumplir el ventilador, y para equilibrar el sistema. El equilibrio requiere que la caída de presión desde la salida del ventilador hasta cada elemento difusor (rejilla) sea la misma cuando las secciones del conducto transporten sus capacidades de diseño (5).

El dimensionado de una red de distribución de aire exige el conocimiento previo del trazado de ésta, de todos sus obstáculos, del material de construcción de los conductos, de los elementos de difusión (rejillas y difusores), de los caudales de aire en cada una de las derivaciones, así como de la temperatura del aire. La red debe ser simple y económica, buscando un equilibrio entre esta premisa y las necesidades de la instalación.

Para el cálculo de las dimensiones de los conductos se emplea fundamentalmente el método de la “pérdida de presión constante” y el método de la “recuperación estática” mientras que el método de “reducción de velocidad” no se utiliza



comúnmente porque para resolver el problema con una precisión razonable, se requiere mucha experiencia y conocer perfectamente el cálculo de conductos. Solamente debe usarse en sistemas muy elementales. (7)

2.2.12 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN MECÁNICAS.

A continuación se describen los sistemas de transmisión de energía mecánica utilizados para el desarrollo de este proyecto.

2.2.12.1 DISEÑO DE CADENAS.

El diseño de una cadena de rodillos consiste, principalmente, en seleccionar los tamaños de la cadena y de las ruedas catalinas. Esto también incluye determinar la longitud de la cadena, la distancia entre centros, método de lubricación y, en algunos casos la colocación de la envoltura de la cadena, así como de sus ruedas guías.

Factores de Diseño.

La selección de la cadena y de la rueda está basado en los siguientes puntos:

- a) La potencia y el tipo de transmisión.
- b) La velocidad y el tamaño del eje.
- c) El medio ambiente.
- d) Horas de operación continua.



2.2.12.2 SELECCIÓN DE CADENAS DE RODILLOS. ⁽⁸⁾

En la selección de las cadenas se debe conocer la potencia que transmiten y la velocidad y el tamaño del eje más rápido. También se debe determinar si se necesita uno o varios ramales.

En la selección de cadenas abarcan los siguientes puntos:

a) Rueda catalina pequeña: se usan ruedas con pasos pequeños en aplicaciones silenciosas y a altas velocidades. Para grandes relaciones de transmisión, el tamaño de la rueda pequeña está limitado por el tamaño deseable de la rueda grande; se ha determinado que 120 dientes es un valor máximo práctico. Para seleccionar el tamaño de la rueda catalina pequeña se puede usar el gráfico presente en el Anexo B; luego para comprobar la selección se consultan las tablas de capacidad de potencia (HP) de cadenas de rodillos por un solo ramal (Anexo B) donde se muestran los valores de potencia más precisos.

$$d = \frac{P}{\text{Sen}\left(180/N\right)}$$

b) Rueda catalina grande: luego que se ha seleccionado la rueda pequeña, el número de dientes de la grande depende de la relación de velocidades. Así:

$$Rt = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N}{n} \tag{2.54}$$

Donde

Rt = Relación de transmisión (adimensional).

ω_1 = Velocidad de la rueda catalina pequeña (rpm).

ω_2 = Velocidad de la rueda catalina grande (rpm).

N = número de dientes de rueda catalina grande (adimensional).

n = número de dientes de rueda catalina pequeña (adimensional).



c) Distancia entre centros: en general una distancia entre centros de 30 a 50 veces el paso es lo aconsejable. La distancia máxima entre centros se puede considerar como 80 veces el paso de la cadena, en una primera aproximación. En los casos que la distancia entre centros sea muy larga la cadena debe ser soportada por guías o usar dos o más transmisiones en serie.

$$C = \frac{L - \frac{N+n}{2} + \sqrt{\left(L - \frac{N+n}{2}\right)^2 - 8 \cdot \frac{(N-n)^2}{4 \cdot \Pi^2}}}{4} \quad (2.55)$$

Siendo

C = Distancia entre centros (m).

L = Longitud de la cadena (m).

N = Número de dientes de rueda catalina grande (adimensional).

n = Número de dientes de rueda catalina pequeña (adimensional).

d) Longitud de la cadena: esta debe tener un número exacto de pasos, preferiblemente un número par. Generalmente la longitud de la cadena se determina en términos del paso de la misma y si se requiere en medidas de longitud, entonces se multiplica el número de pasos por la longitud del mismo.

$$L = 2 \cdot C + \frac{N+n}{2} + \frac{(N-n)^2}{4 \cdot \Pi^2 C} \quad (2.56)$$

2.2.13 DISEÑO DE EJES. ⁽¹⁰⁾



Un eje de transmisión es un elemento cilíndrico de sección circular, que puede estar fijo o puede estar girando, sobre el que se montan engranajes poleas, volantes, ruedas de cadena, manivelas así como elementos de transmisión de fuerza o potencia. Los ejes de transmisión, son barras sometidas a cargas de tensión, flexión, compresión o torsión, que actúan individualmente o combinadas.

El diseño de ejes consiste prácticamente en la determinación del diámetro correcto del eje para asegurar rigidez y resistencia satisfactoria cuando transmite potencia en diferentes condiciones de carga y operación.

Los esfuerzos en la superficie de un eje macizo de sección circular, sometido a cargas combinadas por tensión y torsión son:

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (2.57)$$

$$\tau_{xy} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (2.58)$$

Donde

σ_x = Esfuerzo de flexión. $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

τ_{xy} = Esfuerzo por torsión. $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

d= Diámetro del eje $\left(m^2\right)$.

M= Momento flector en la sección crítica $(N.m)$.

T= Momento torsor en la sección crítica $(N.m)$.



Mediante el círculo de Mohr se halla que el esfuerzo cortante máximo es

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.59)$$

Sustituyendo a σ_x y τ_{xy} por las ecuaciones (2.56) y (2.57), se tiene

$$\tau_{\max} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M^2 + T^2} \quad (2.60)$$

La teoría del esfuerzo cortante máximo para la falla estática expresa que $S_{sy} = S_y/2$, empleando un factor de seguridad n la ecuación (2.59) puede escribirse como:

$$\frac{S_y}{2n} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M^2 + T^2} \quad (2.61)$$

O bien

$$d = \left(\frac{32n}{\pi S_y} \sqrt{M^2 + T^2} \right)^{1/3} \quad (2.62)$$



CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

En el siguiente capítulo se presentara un procedimiento basado en un conjunto de etapas que de manera secuencial ayudó a cumplir con el propósito general de la investigación planteada.

3.1 NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo al problema planteado referido al “Rediseño de un sistema de precalentamiento de pailas de aluminio primario para la empresa laminadora de aluminio” CVG - ALUCASA y en función de los objetivos este proyecto se incorpora dentro de la clasificación de la *investigación descriptiva*.

Según Arias (2006.pag 24), una investigación descriptiva “consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con la finalidad de establecer su estructura o comportamiento”. En este proyecto se analizará el comportamiento del área de fusión y colada bajo la configuración actual del sistema de precalentamiento de pailas de aluminio primario.

Por otra parte la metodología utilizada para efectuar la investigación se enmarca dentro de la modalidad de proyecto factible, la cual según Gómez C (2000) se define como “el método de procesar la información para producir un conocimiento útil capaz de transformar la realidad local, regional y nacional que permita mejorar la calidad de vida en los rubros relacionados con la investigación, la ciencia y la tecnología”.



3.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo de este proyecto se logró a través de la combinación de estrategias proporcionadas por los *tipos de investigación documental y de campo* según Arias F (1999) en las cuales se realiza “la obtención y análisis de datos provenientes de material impreso u otros tipos de documentos” (p.27) y “la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos”. (p.31)

3.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En función de las características del problema investigado y de los objetivos delimitados al inicio de la misma, el presente trabajo se clasificó en un conjunto de etapas de manera secuencial que ayudaron a cumplir con el propósito general de la investigación planteada.; dichas etapas son: evaluación del sistema actual, selección de la propuesta de solución, selección y/o diseño de los componentes, estudio técnico – económico.

3.3.1 PRIMERA ETAPA: Evaluación del sistema actual

Esta etapa se desarrolló en tres fases las cuales se muestran a continuación:

Fase 1: Se basó en la observación de los procesos que se realizan en la empresa para la obtención de sus productos finales, los cuales son: calentamiento de materia prima (aluminio primario), fusión de aluminio, preparación de la aleación, laminación, acabado y empaque. Esta etapa también comprende la visita a los departamentos de colada, proceso, y producción, así como también, entrevistas con



las personas encargadas de estos departamentos los cuales representaron una potencial referencia para la consulta de información técnica.

Fase 2: Consistió en la revisión del material bibliográfico disponible que se encuentra relacionado a sistemas de secado, propiedades del aluminio, propiedades de los materiales refractarios y aislantes. Esta información fue organizada, sintetizada y consultada durante el desarrollo del proyecto.

Fase 3: Descripción del sistema actual. Esta fase consistió en evaluar las condiciones operacionales en la que se encuentra trabajando actualmente el sistema; para ello se procedió a realizar una lista con las especificaciones de los componentes y equipos que conforman el sistema actual; así mismo fue necesario tomar medidas de los principales parámetros que rigen el sistema (tiempos, temperatura, capacidad, intensidad de llama entre otras) y que fueron necesarios para obtener el estado del sistema actual. Ver Anexo A.

Para evaluar el sistema de precalentamiento actual, fue necesario calcular el tiempo teórico que tardan en secarse las pailas de aluminio primario, para ello se procedió de la siguiente manera:

A través del N° de BIOT se determinó como es la conducción de calor sobre las pailas de aluminio primario con respecto a la convección en la superficie de estas, y así se obtuvo el tipo de análisis a realizar.

$$N^{\circ}BIOT = \frac{L_c \cdot h_{promedio}}{k} \quad (3.1)$$

El número de Biot queda definido a través de la ecuación (3.1), siendo la longitud corregida igual a,



$$Lc = \frac{\text{Volumen}}{\text{Area}_{\text{superficial}}} \quad (3.2)$$

Posteriormente se calculó el número de Rayleigh debido a que el sistema actual presenta una transferencia de calor por convección natural, el cual está definido por la siguiente ecuación,

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Lc^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (3.3)$$

Con este valor, se realizó el cálculo del Número de Nusselt correspondiente a la configuración del flujo en estudio.

Flujo alrededor de superficies planas verticales

$$Nu = 0,68 + 0,670 \cdot (Ra \cdot \varphi)^{1/4} \cdot (1 + 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot Ra \cdot \varphi)^{1/12} \quad (3.4)$$

$$\varphi = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (3.5)$$

Flujo alrededor de superficies horizontal calentada por la cara superior

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3} \quad (3.6)$$

Luego se obtuvo el coeficiente convectivo haciendo uso de la ecuación (3.7).



$$h_c = \frac{Nu \cdot K_{aire}}{Lc} \quad (3.7)$$

Finalmente como el N° de Biot resultó menor que 0,1 se puede decir que el cuerpo se encuentra a una temperatura uniforme y se determinó haciendo uso de la ecuación (3.8) el tiempo teórico de precalentamiento de las pailas de aluminio primario para el sistema actual.

$$t = \frac{Ln \left(\frac{T_{(x)} - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} \right)}{\psi} \quad (3.8)$$

Toda esta información será utilizado para mejorar el Sistema de Precalentamiento de las Pailas de Aluminio Primario en la Empresa CVG ALUCASA.

3.3.2 SEGUNDA ETAPA: Planteamiento de posibles soluciones.

Una vez realizada la evaluación del sistema actual se procedió al planteamiento de las posibles soluciones a las limitaciones operacionales encontradas en el sistema a través de diferentes técnicas como la *tormentas de ideas*, entre otras; para ello, se tomó en cuenta las normas por las que se rige la empresa y se buscó la optimización del proceso para lograr un aumento en la eficiencia del proceso de precalentamiento de pailas de aluminio primario.

3.3.3 TERCERA ETAPA: Selección de la mejor propuesta.

Esta etapa consistió en evaluar todas las opciones generadas en la búsqueda de soluciones según la situación problemática, y así obtener las posibles soluciones que



solventen las necesidades de la empresa. Luego se procedió a seleccionar la mejor según los criterios establecidos previamente, aplicando el “método de ponderación de criterios y soluciones”.

3.3.4 CUARTA ETAPA: Desarrollo de las soluciones seleccionada.

En esta sección se presenta, la metodología empleada para los cálculos a realizados en el diseño térmico y mecánico del sistema de precalentamiento para las pailas de aluminio primario, así como también para la selección de todos los materiales, equipos y componentes que lo conformarán.

DISEÑO TÉRMICO.

Para el diseño térmico del sistema de precalentamiento se dividió en los siguientes cálculos: calor necesario a suministrar a la cámara para que las pailas alcancen una temperatura de 110°C, cálculo de las pérdidas en la cámara, calor disponible por los gases residuales, tiempo de secado de las pailas en la cámara y el diseño de la red de conductos para el suministro de los gases provenientes de las chimeneas de los hornos de fusión a la cámara de precalentamiento.

1. Calor necesario a suministrar a la cámara de precalentamiento para que las pailas de aluminio primario alcancen una temperatura de 110°C

El calor requerido en la cámara, o carga térmica, es el resultado de la suma del calor que absorben los componentes internos cuando cambian su temperatura; en este



caso, dentro de la cámara se encuentran además de las pailas, los carros móviles; por lo que:

$$Q_D = Q_{Al} + Q_C + Q_p + Q_{gs} \quad (3.9)$$

Donde

Q_D = Calor Disponible

Q_{Al} = Carga térmica absorbida por el aluminio primario.

Q_C = Carga térmica absorbida por elemento móvil.

Q_p = Calor perdido por las paredes y el techo de la cámara de precalentamiento.

Q_{gs} = Carga térmica perdida a través de la chimenea.

Entonces haciendo uso de la siguiente ecuación que proporciona la cantidad de calor sensible que cede o absorbe un cuerpo sin cambiar de fase, se determinó la carga absorbida por el aluminio y el carro así como también el calor disponible en la cámara de precalentamiento.

$$Q = C_p \cdot m \cdot \Delta T \quad (3.10)$$

Donde:

$\Delta T = (T_f - T_i)$ = Diferencia de temperatura final e inicial (°C)

M = Masa del aluminio o del carro (Kg)

C_p = Calor específico del aluminio o del carro (KJ/Kg.K)

2. Cálculo de las pérdidas de calor.

Las pérdidas de calor consideradas en el diseño de la cámara de precalentamiento son las pérdidas a través del techo, la puerta y las paredes del horno.



Para determinar las pérdidas a través de las paredes se tomaron en cuenta los materiales que conformaran la cámara de precalentamiento; haciendo uso de la ecuación (2.11)

$$q_x \equiv UA\Delta T \quad (3.11)$$

Donde:

$\Delta T = T_h - T_a =$ Diferencia de temperaturas entre el interior del horno y el ambiente (°C)

U = Coeficiente global de transferencia de calor

$$U = \frac{1}{\sum RtA} = \frac{1}{\frac{\epsilon_1}{k_1} + \frac{\epsilon_2}{k_2} + \frac{\epsilon_3}{k_3} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad (3.12)$$

Donde:

A = Área de la sección transversal (m^2).

ϵ_1 = Espesor de la segunda capa (ladrillos) (cm).

ϵ_2 = Espesor de la segunda capa (aislante) (cm).

ϵ_3 = Espesor de la tercera capa (acero) (cm).

k_1 = Conductividad térmica del ladrillo. $\left(\frac{W}{m \cdot k}\right)$.

k_2 = Conductividad térmica del aislante. $\left(\frac{W}{m \cdot k}\right)$.

k_3 = Conductividad térmica del acero. $\left(\frac{W}{m \cdot k}\right)$.

h_{ext} = Coeficiente convectivo del ambiente. $\left(\frac{W}{m^2 \cdot k}\right)$.



3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección (h).

Este coeficiente varía según las condiciones de temperatura y velocidad de los gases que se encuentran en la cámara de precalentamiento; para su cálculo se utilizaron los *números adimensionales*. Estos números adimensionales se utilizan según el tipo de flujo que se tenga, ya sea natural o forzado; para nuestro caso, por estar los gases introducidos por medio de ventiladores existe un proceso de convección forzada; entonces las expresiones a usar son, el número de Reynolds (2.31):

$$Re_{D_h} = \frac{\left(\frac{\dot{m}}{A_c}\right) \cdot D_h}{\mu} \quad (3.13)$$

Siendo

Re_{D_h} = Número de Reynolds

\dot{m} = Flujo másico de aire $\left(\frac{Kg}{s}\right)$

A_c = Área de la sección transversal de flujo (m^2)

D_h = Diámetro hidráulico (m)

La escala de longitud de los números de Reynolds y de Nusselt para conductos no circulares es el *diámetro hidráulico*, representada por la siguiente ecuación

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{P} \quad (3.14)$$

Donde

D_h = Diámetro hidráulico (m)

A_c = Área de la sección transversal de flujo (m^2)



P = Perímetro mojado (m)

Al obtenerse el número de Reynolds se conoce el tipo de flujo por lo que se procedió a determinar el número de Nusselt a través de la ecuación correspondiente al caso.

Según la ecuación (2.33) se tiene que el número de Nusselt es

$$Nu_{Dhc} = Nu_{Dh} \cdot \Gamma \quad (3.15)$$

$$Nu_{Dh} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re_{Dh} - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (3.16)$$

Donde

Nu_{Dhc} = Número de Nusselt corregido

Nu_{Dh} = Número de Nusselt

f = factor de fricción.

Pr = Número de Prandtl

Γ = Factor de corrección por variación de las propiedades.

Y el factor de fricción es:

$$f = \left(0,790 \cdot \ln(Re_{Dh}) - 1,64\right)^{-2} \quad (3.17)$$

El coeficiente de convección h local es:

$$h_c = \left(\frac{k}{D_h}\right) \cdot Nu_{Dhc} \quad (3.18)$$



4. Obtención de la velocidad.

La velocidad de los humos que salen de la chimenea se calculará con el flujo másico teórico (obtenido de las fichas técnicas del hornos de fusión Anexo C) de la mezcla de los gases que entran al horno; el cual, por el principio de conservación de la masa es el mismo flujo que sale por la chimenea, y con el diámetro de la chimenea se obtiene la velocidad de los humos. Esta velocidad se obtendrá de esta forma ya que es poco accesible y riesgoso para el operador la colocación de un instrumento adecuado para medir ya sea el caudal real o la velocidad de los gases. Para ellos se utilizó la siguiente expresión

$$V = \dot{m} / A \quad (3.19)$$

Donde

V = Velocidad (m/s)

\dot{m} = Flujo másico (m^3/s)

A = Área de la sección transversal de la chimenea de los hornos de fusión (m^2)

5. Diseño de la red de distribución de gases para la cámara de precalentamiento ⁽⁸⁾

El diseño de la red de distribución se realizó con el método de igual fricción que consiste en:

a) Hacer un trazado en un plano a escala de la edificación de la red de conductos considerando sus variaciones de nivel respecto del piso, considerando todos los



aspectos arquitectónicos que pueden afectar el diseño, tales como vigas columnas etc. En este paso se determina la longitud de la red de conductos así como el número de codos, T y otros accesorios necesarios.

b) Seleccionar la velocidad recomendada de flujo de aire a través del conducto (Anexo D).

c) Cálculo del área de la sección transversal, que conduce el aire inmediatamente después del equipo aplicando la ecuación de continuidad y el valor de velocidad de la parte (b).

d) Determinar los porcentajes de capacidad para cada tramo de la red de conductos en base a la capacidad del conducto principal.

$$\%Capacidad\ del\ tramo = \frac{Capacidad\ tramo}{Capacidad\ ducto\ principal} * 100 \quad (3.20)$$

e) Determinar los porcentajes de área para cada tramo de la red de conductos, referidos al área de la sección transversal del conducto principal, en base al porcentaje de capacidad de cada tramo aplicando la tabla del Anexo E.

f) Determinación de las dimensiones de cada tramo de la red de conductos; para ello se calcula el área de la sección transversal de cada tramo en base a los valores de porcentajes de área y el área de la sección transversal del conducto principal.

$$A_{tramo} = (\%Área) \times A_{Ducto\ principal} \quad (3.21)$$



Después de encontrados los valores del área de cada tramo se obtienen las dimensiones del conducto normalmente rectangular o el valor del diámetro de la sección circular equivalente.

g) Determinación de la caída de presión por 100 pies de longitud del conducto (ΔP_{100}). Este valor en pulgadas. de agua por 100 pies de longitud se obtiene del Anexo F; en función del diámetro equivalente en pulgadas del conducto y la cantidad de aire en CFM que trasmite: para el conducto principal y este valor se mantiene para toda la red.

DISEÑO MECÁNICO.

A continuación se muestra la metodología que fue empleada para el cálculo y selección de los elementos, materiales y equipos que componen la configuración fija y móvil del sistema de precalentamiento; tales como, estructura de la cámara, sistemas de soportes, sistema de traslado, sistema de apertura de puertas, entre otros.

1. Estructura de la cámara.

Para el diseño de la estructura de la cámara se tomó en cuenta algunas consideraciones que existen para el diseño de hornos, estas son:

- Generalmente, la pared exterior de un horno se fabrica de placas de acero de un espesor de 3mm. Estas placas son reforzadas con el fin de evitar deformaciones.



- El revestido del horno usualmente es sellado mediante soldadura de las placas, con lo cual se logra evitar las filtraciones de agua, aire u otras sustancias dentro del horno.
- El armazón estructural de acero que posee el horno debe permitir la expansión lateral y vertical de todas las partes del horno.
- Los materiales usados para la fabricación de las columnas principales de las estructuras deben ser a prueba de fuego.
- Los accesorios de los hornos, tales como escaleras, plataformas, representan un peso adicional que requiere ser tomado en cuenta en la fabricación del armazón.

Esta armazón o carcasa del horno requiere de un revestimiento interno con un material aislante térmico, este material se usa con la finalidad de minimizar las pérdidas de calor a través de las paredes del horno. En los hornos, el material usado como aislante térmico, normalmente se le denomina material refractario.

La selección de los materiales refractarios debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- Temperatura máxima permitida.

Si el refractario es expuesto a temperaturas superiores a la temperatura máxima permitida, puede producir quiebres y derretimiento del refractario.

- Choque térmico.

Si el refractario es expuesto a cambios apreciables de temperaturas se puede producir, su quiebre, astillamiento o desintegración.



➤ Tensión mecánica.

Si el refractario soporta expansiones o contracciones apreciables puede dar origen a la pérdida integral del revestimiento.

➤ Costos.

La selección de un material refractario es compleja. Esto se debe a que generalmente existen materiales que poseen propiedades óptimas como aislamiento térmico, pero son deficientes desde el punto de vista de resistencia mecánica. Por esta razón. Lo deseable es seleccionar el material refractario que al menor costo cumpla con los requerimientos tanto como aislante térmico como de tipo mecánico.

2. Diseño del sistema de traslado de las pailas de aluminio primario.

Este sistema está conformado por el sistema de transmisión por cadenas y por los carros de transporte. Para el diseño de los carros se tomo de referencia otros dispositivos similares, así como factores tales como: el espacio disponible para el trayecto de los mismos; la cantidad de pailas a precalentar; la disponibilidad, propiedades y precios de los materiales.

3. Diseño de aperturas de puertas.

Este sistema está compuesto por un sistema de polea y contrapeso accionado por una transmisión por cadena. Para la realización de este diseño se estudiaron diferentes modelos de sistemas para aperturas de puertas en hornos o similares. Se necesitó conocer las especificaciones de la puerta como material, dimensiones, peso, velocidad a la que abre, y con esto calcular la potencia necesaria y escoger el sistema de transmisión más adecuado para dicho diseño.



3.3.5 QUINTA ETAPA: Estudio técnico – económico.

Aquí se analizará la factibilidad de ejecutar el proyecto, contemplando así: tiempo de recuperación de la inversión, el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).



CAPÍTULO IV DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO.

La investigación de campo proporciona una gran ventaja al describir el fenómeno estudiado tal como ocurre en la realidad. De acuerdo a los datos recolectados durante dicha investigación, utilizando los instrumentos y equipos proporcionados por la empresa, se pudo determinar que las condiciones del sistema utilizado actualmente se pueden resumir en la información mostrada en la siguiente tabla:

Tabla 4. 1 Condiciones del Sistema de Pre calentamiento Actual

Ancho de las pailas	1085 mm
Largo de las pailas	1260mm
Peso máximo de las pailas	600 kg
Espesor de las pailas	280mm
Cantidad de pailas a precalentar en el área	80
Temperatura ambiente	38°C
Temperatura inicial de las pailas	38°C
Temperatura final de las pailas	110°C
Tiempo de secado o precalentamiento	8 horas

En lo que respecta a la temperatura inicial de las pailas a la entrada de la zona de precalentamiento, se ve reflejada la temperatura de 38°C provenientes del área de almacenamiento de las mismas, ubicada en la nave A (donde están ubicados los hornos de fusión).



Para la realización del diseño del nuevo sistema de precalentamiento, los parámetros referidos a las dimensiones de las pailas y los conjuntos de lingotes, la temperatura de entrada a la zona de precalentamiento no serán variables, pues el parámetro que se desea disminuir es el tiempo de secado. Otros de los parámetros con los cuales debe cumplir el nuevo sistema de precalentamiento es retirar toda la humedad presente, pues este podría generar una explosión al entrar en los hornos de fusión, lo cual podría generar pérdidas humanas y materiales.

4.2 RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES DISPONIBLES.

Dentro del área de estudio se disponen de recursos humanos y materiales que bien pueden ser utilizados para el rediseño del sistema de precalentamiento, lo que implicaría un ahorro en la inversión inicial, al momento de desarrollar el proyecto. En la tabla 4.2 se listan los recursos humanos y materiales disponibles para el rediseño del sistema de precalentamiento de aluminio primario.

Tabla 4. 2 Recursos Disponibles para el Rediseño del Sistema de Precalentamiento

Recurso Humano	Operario encargado de colocar las pailas en el área de precalentamiento y posteriormente encargado de sacarlas y llevarlas a los hornos de fusión.
Recurso Material	Montacargas de (capacidad), utilizado para trasladar todo el material de la nave A que es el área de fusión y colada.

4.3 PLANTEAMIENTO DE LAS POSIBLES SOLUCIONES.

A través del estudio de los sistemas de precalentamiento utilizados industrialmente y enfocándonos en la situación problemática, se plantearon varias



propuestas para la solución de la misma, luego estas se evaluaron para verificar si cumplían con todas las restricciones exigidas por la empresa. Finalmente se seleccionaron 5 probables soluciones, las cuales se muestran a continuación con sus respectivos diagramas que facilitan su explicación.

4.3.1 PROPUESTA DE SOLUCIÓN 1.

El sistema mostrado en la Figura 4.1, consiste en secar el aluminio primario el cual llega a la zona de precalentamiento con una temperatura de 38 °C, haciendo uso de los gases residuales provenientes de los hornos de fusión los cuales salen con una temperatura de 1000 °C aproximadamente. Estos llegan a la cámara de precalentamiento por un sistema de conductos.

Además, el sistema cuenta con dos elementos móviles que se desplazan independientemente por medio de rieles, impulsados por un dispositivo unido a su vez a un sistema de transmisión por cadena, la cual es accionada por un motor-reductor.

Estos elementos móviles reciben el aluminio primario del montacargas y lo introduce hasta la cámara de precalentamiento, donde permanecerá por el tiempo necesario para eliminar totalmente la humedad de las pailas.

Una vez terminado el proceso el elemento móvil es extraído con el aluminio primario de la cámara de precalentamiento, y es transportado a los hornos de fusión nuevamente por medio del montacargas, donde continuará el proceso.

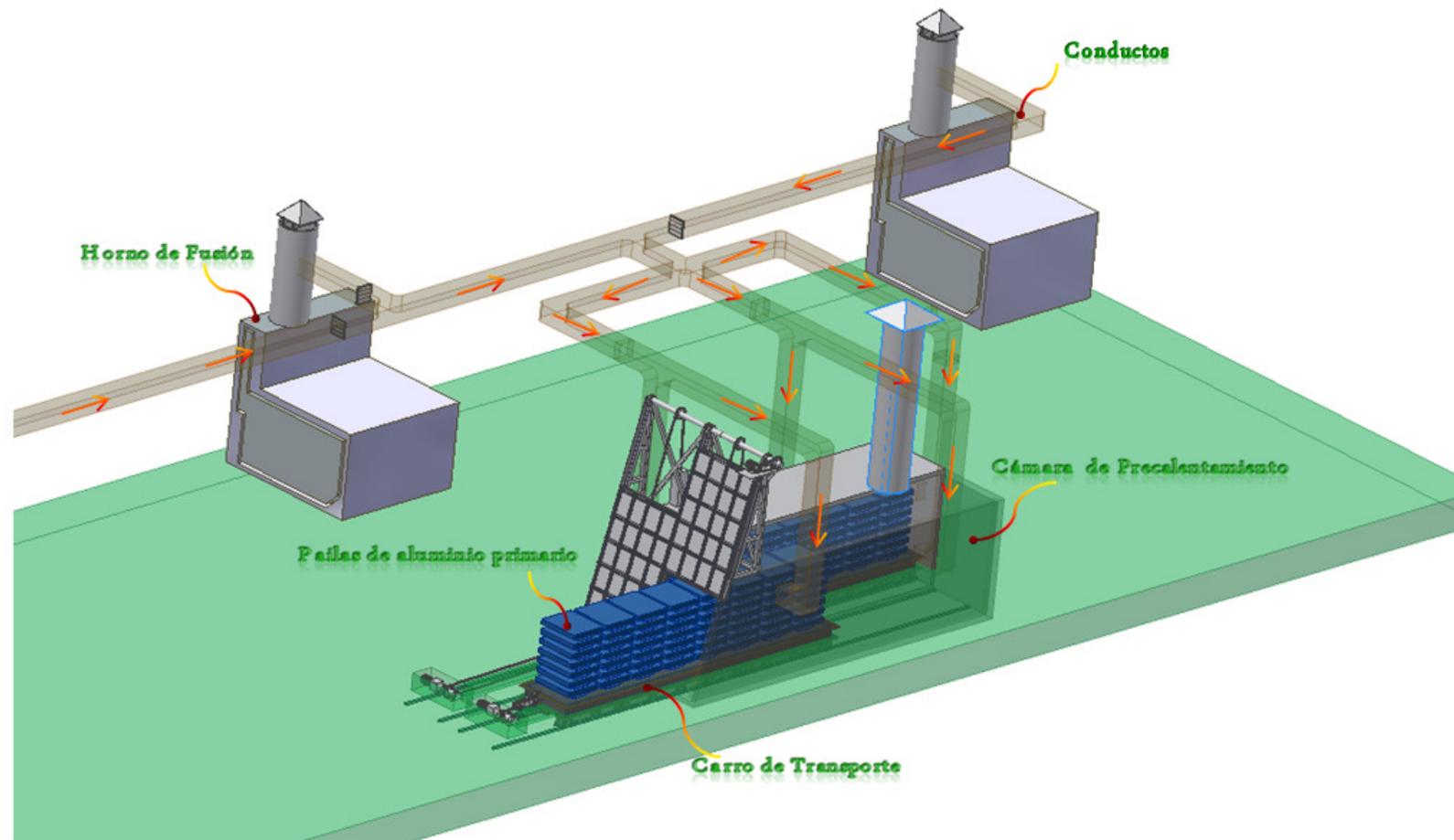


Figura 4. 1 Propuesta de Solución 1



4.3.2 PROPUESTA DE SOLUCIÓN 2.

La propuesta mostrada en la figura 4.2 trata de un sistema de precalentamiento que está compuesto por: una cámara, un sistema de ductos provenientes de las chimeneas de los hornos de fusión, que proporcionan gases calientes, los cuales son introducidos dentro de la cámara, por medio de un ventilador; y unos distribuidores laterales. Este volumen de gas se desplaza en sentido horizontal hacia la entrada de la cámara situada en el extremo opuesto. Una vez que las pailas o lingotes se encuentran en el interior, son transportados por un conjunto de cadenas, desde la entrada hacia la parte posterior.

La cámara de precalentamiento, presenta varios ventiladores alineados sobre su eje longitudinal, y conectados con el interior del túnel a través de distribuidores de manera que aspiran los gases calientes del interior, en sentido ascendente pasando a través de las cadenas transportadoras, y por consiguiente, también a través del aluminio, siendo encauzados por medio de distribuidores laterales de nuevo al interior, por su parte inferior, obligando al aire a circular en sentido circular o rotativo.

A medida que avanza las pailas hacia la parte posterior de la cámara, se aproxima a la entrada de los gases calientes, con lo cual accede a una zona donde la temperatura y presión del aire es muy elevada. Cuando el aluminio alcanza el final de la cadena, accionada por un motovariador reductor, este cambia el sentido a esta última, transportándolo de vuelta a la entrada, la cual se convierte en entrada y salida a la misma vez. En la parte superior de la entrada de la cámara se encuentra una chimenea por donde salen los gases al exterior.

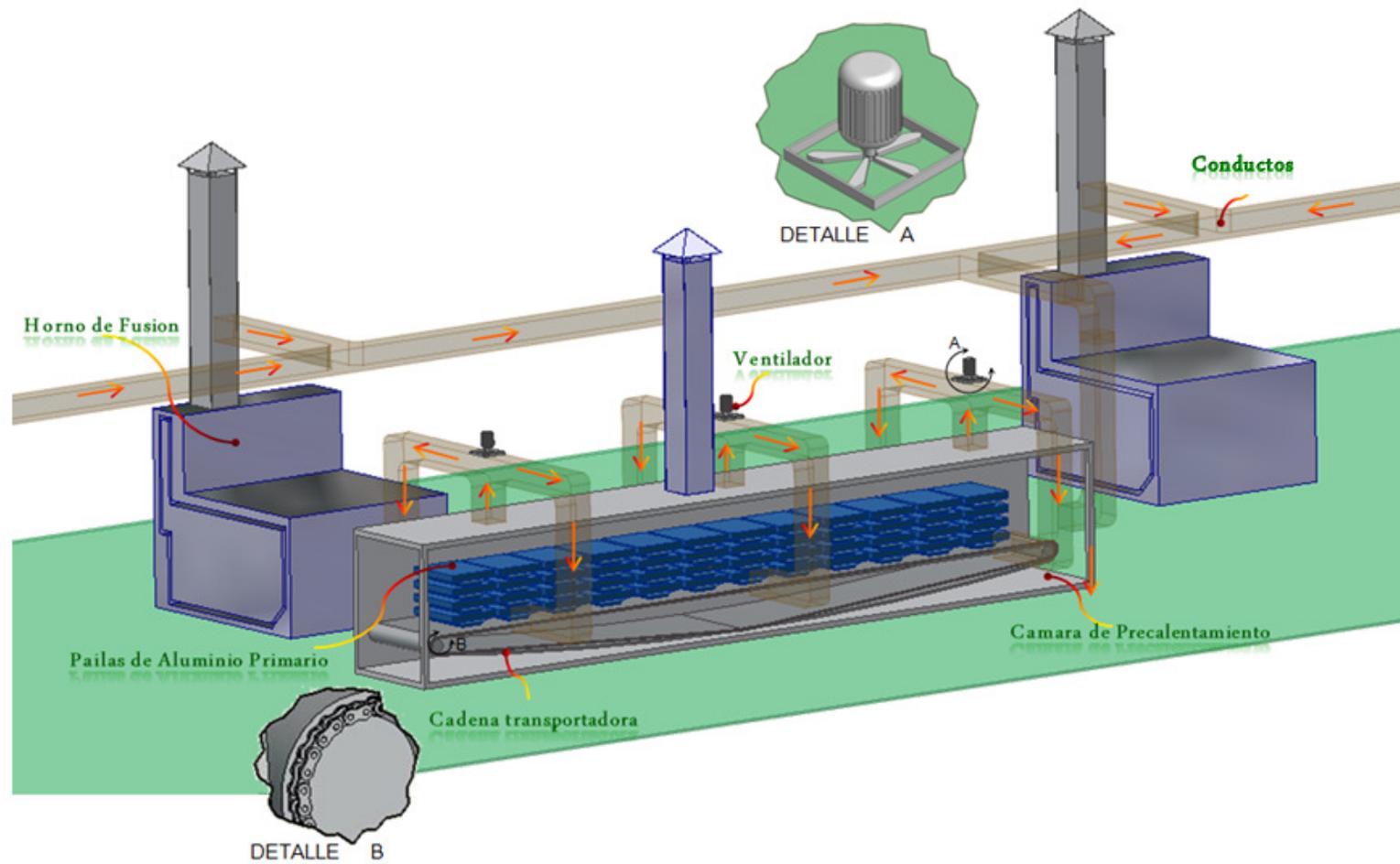


Figura 4. 2 Propuesta de Solución 2



4.3.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN 3.

En la figura 4.3 se observa un sistema que presenta dos cámaras, una de calentamiento la cual posee en su interior un sistema de transmisión compuesto por una banda transportadora accionados por un motor eléctrico y una caja reductora, los cuales tienen como función trasladar las pailas de aluminio primario a través de la cámara de precalentamiento a medida que se van calentando y perdiendo toda la humedad que estas puedan presentar. Para mantener la temperatura que alcanzan las pailas de aluminio primario en la cámara de precalentamiento se dispone a su lado una cámara de conservación de temperatura, y se utilizará entre ellas una cortina térmica la cual servirá para facilitar el paso de las pailas de una cámara a otra; esta última tiene en su interior varios cilindros dispuestos a lo largo de la zona, facilitando el movimiento de las pailas que vienen de la zona anterior y acomodarse de manera que permanezcan en ella durante el tiempo necesario para pasar a los hornos de fusión; además se encuentra dispuesto a ella un conducto que en su interior posee un ventilador cuya función es extraer los gases residuales de los hornos de fusión para luego enviarlo hacia la zona de conservación de temperatura de las pailas de aluminio primario. El sistema tiene un quemador adicional que permite aumentar la temperatura del gas, el cual, una vez caliente, intercambia calor con el aluminio primario que viene de la cámara de precalentamiento a una temperatura determinada, para permitirle mantener una temperatura constante y que pueda entrar a los hornos de fusión sin humedad y con una temperatura más alta para disminuir el tiempo de fusión del aluminio en el mismo.

Las pailas se deben encontrar dispuestas en la cámara de precalentamiento, como se muestra en la figura 4.3, para que los gases fluyan a través de ellas y abarquen la mayor área de contacto posible, además de que tenga los menores obstáculos posibles manteniendo así el caudal constante.

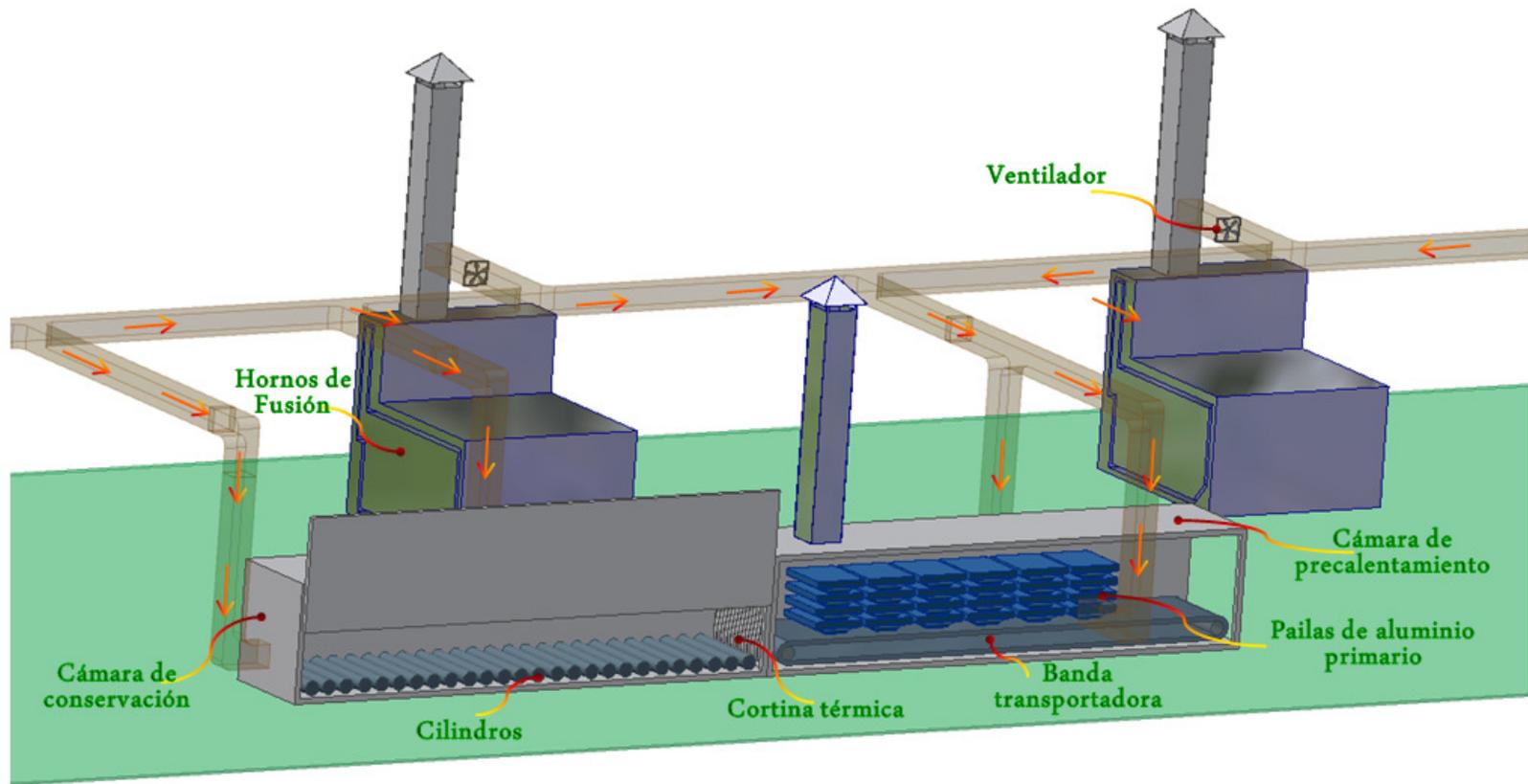


Figura 4. 3 Propuesta de Solución 3



4.3.4 PROPUESTA DE SOLUCIÓN 4.

El sistema consiste en un túnel o cámara de secado continuo el cual se alimenta de la recirculación forzada de los gases de la combustión de los hornos de fusión. Estos gases se transportan por medio de sistemas de conductos desde cada horno de fusión hasta una línea principal o manifold donde se mezclan para luego ser llevados a 4 líneas ubicadas alrededor de la cámara. El túnel o cámara está dividido en dos zonas: una de baja temperatura y otra de alta temperatura, con el fin de minimizar los efectos del choque térmico entre las pailas o lingotes y los gases residuales, los cuales se inyectarán a una velocidad elevada a través de ventiladores centrífugos y por medio de difusores ubicados a la salida de cada línea de tubería.

A fin de transportar las pailas o lingotes y tener un fácil acceso a la carga y descarga, fueron colocadas sobre una estructura con ruedas que se desliza (como se puede apreciar en el detalle A) a lo largo del túnel por medio de dos rieles impulsado por medio de un sistema motor-guayas mientras que los gases calientes fluyen en contracorriente al movimiento del aluminio hasta escapar por la chimenea ubicada en la parte superior a la entrada del túnel.

A medida que la carga se traslada a lo largo del túnel va aumentando su temperatura para eliminar toda humedad que puedan presentar; una vez finalizado su recorrido, un montacargas empuja al carro hasta la entrada de los hornos de fusión. Una vez allí, mediante a un sistema hidráulico ubicado en los carros, el aluminio primario se desliza hasta el interior del horno.

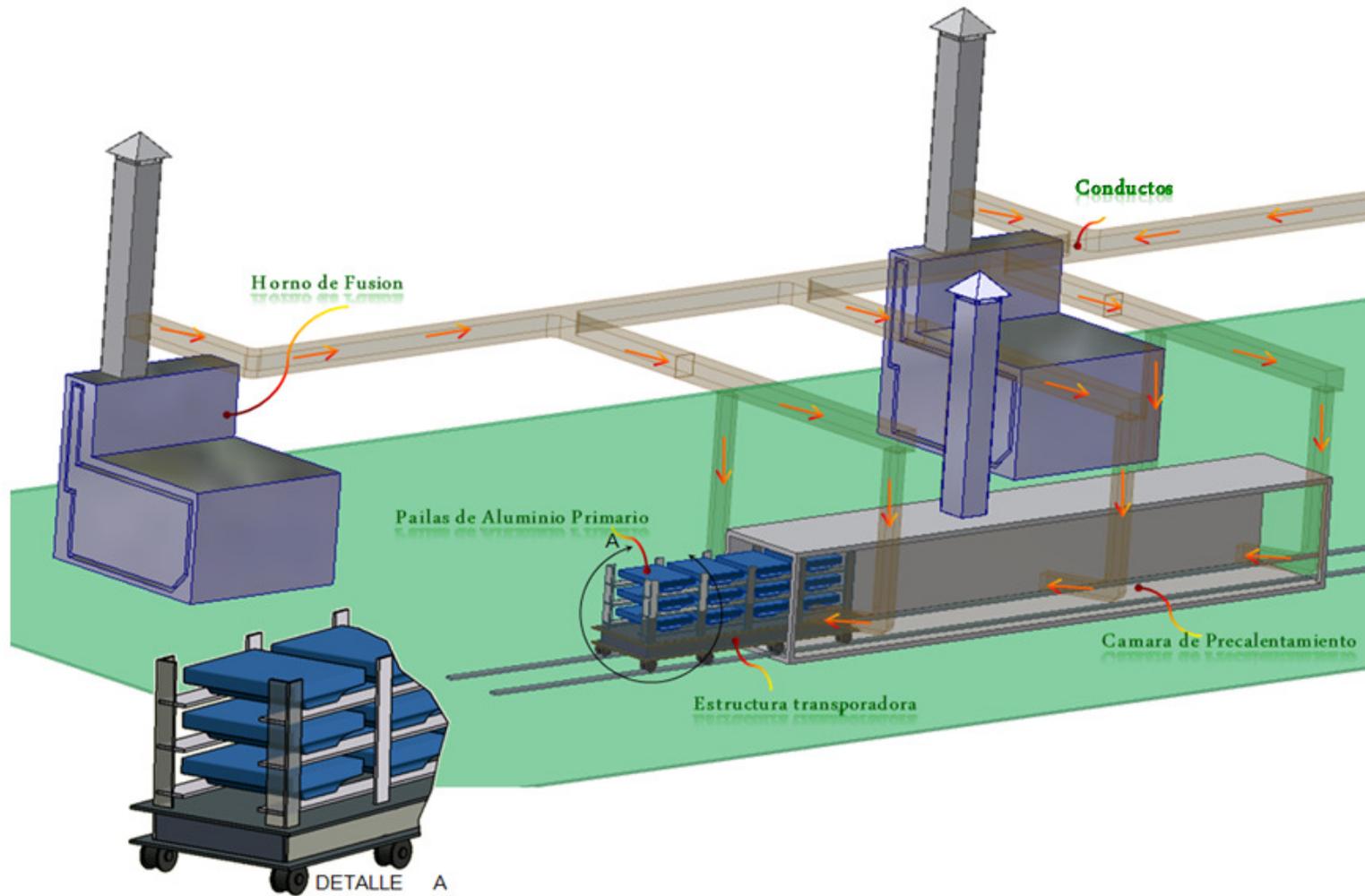


Figura 4. 4 Propuesta de Solución 4

4.3.5 PROPUESTA DE SOLUCIÓN 5.

En la figura que se observa a continuación se presenta una cámara de precalentamiento compuesta por un sistema de quemadores que se alimentan con gas natural para elevar la temperatura en el interior de la misma, en ella son introducidos mediante el uso de un montacargas el aluminio primario el cual es transportado en lotes apilados de cuatro pailas de aluminio primario. Posteriormente la puerta de la cámara se cierra para lograr el aumento de la temperatura en el interior, donde las pailas o lingotes permanecen hasta ser retirada toda la humedad que pueda encontrarse en su interior. Una vez alcanzado este punto las pailas son retiradas nuevamente con el uso del montacargas y transportadas hasta la entrada del horno de fusión para su posterior ingreso a dichos hornos.

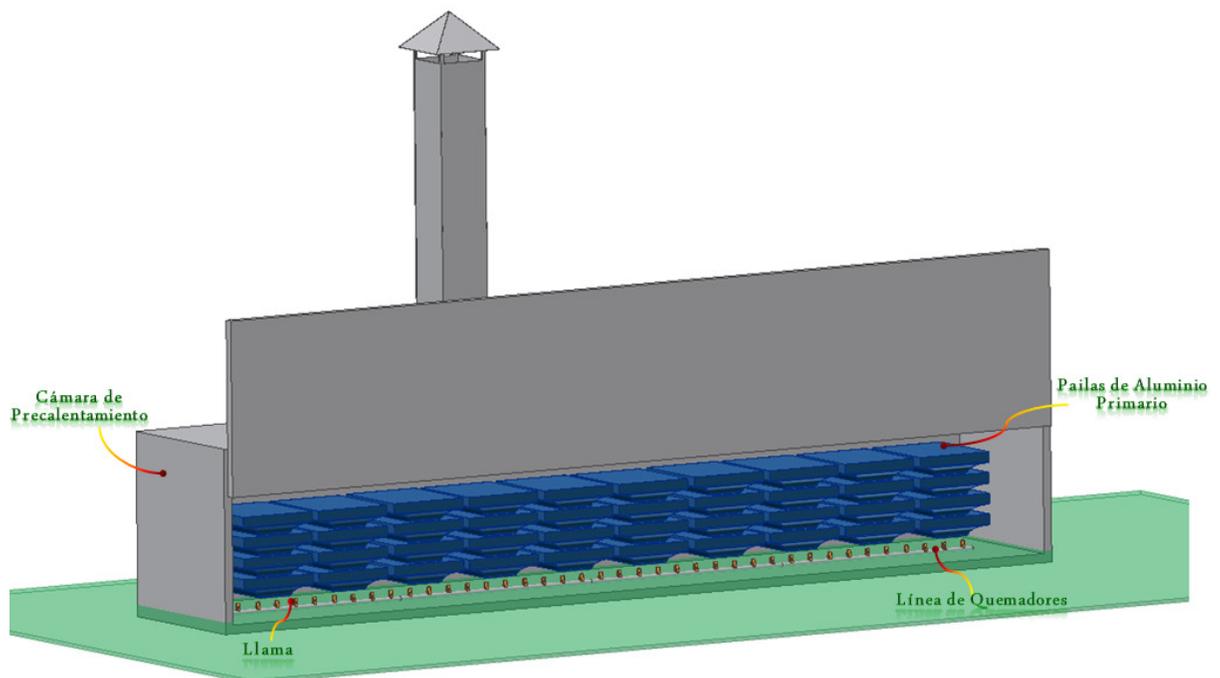


Figura 4. 5 Propuesta de Solución 5



4.4 SELECCIÓN DE LA MEJOR SOLUCIÓN.

Esta etapa desarrollada en el Apéndice A, consiste en evaluar las propuestas de solución después de verificar que cumplan con todas las restricciones exigidas por la empresa, según el método de “ponderación de criterios y soluciones”, con el fin de seleccionar aquella que mejor se adapte a la resolución de la situación problemática planteada.

A continuación se muestran los criterios que definen las principales necesidades del proyecto a realizar.

1. Mayor seguridad al operador.
2. Menor incidencia sobre el ambiente.
3. Menor costo de construcción.
4. Mayor simplicidad en el mantenimiento (complejidad de sistema, accesibilidad y fácil ejecución)
5. Menor complejidad en el funcionamiento del sistema de precalentamiento.
6. Menor tiempo en el secado del aluminio primario.
7. Menor tiempo en la construcción.
8. Mayor eficiencia de energía térmica.
9. Mayor aprovechamiento físico del sistema a diseñar.

Los resultados de la evaluación llevada a cabo se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 4. 3 Ponderación de los criterios

Criterio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Puntuación	9	7	2	3	5	7	1	8	4



Luego de obtener la puntuación de cada criterio, se realiza una comparación entre las alternativas de solución con respecto a cada uno de estos, para ponderarlas dándole el mayor valor a la que mejor se ajuste a cada uno de los criterios.

A continuación se presenta un resumen de la puntuación obtenida de cada una de las soluciones:

Tabla 4. 4 Ponderación de las soluciones planteadas

Solución	S1	S2	S3	S4	S5
Ponderación	159	146	107	134	144

Finalmente como resultado de la aplicación del método de la ponderación de criterios y soluciones, se obtuvo que la mejor solución a la situación problemática es la Alternativa de solución 1.

4.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO.

En esta sección se muestra el desarrollo del sistema a diseñar, como lo son: la descripción y cálculos necesarios para el diseño de cada uno de los componentes y elementos que lo conforman, así como los procedimientos que se llevaron a cabo para su selección final. Los cálculos necesarios para el diseño de la cámara de precalentamiento se divide en dos: los *térmicos*, que abarca todos los referentes a los intercambios de energía térmica del sistema con el ambiente, como lo son: la potencia mínima que debe suministrar la fuente de calor a la carga, la estimación de pérdidas de calor, la determinación de espesores de pared, selección del material refractario y aislante, el diseño de los ductos y la determinación del tiro de la chimenea; y los



cálculos *mecánicos*, los cual a su vez están dividido en los cálculo de la estructura de la cámara, el sistema de traslado de las pailas y el sistema de apertura de puertas.

4.5.1 SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO ACTUAL.

Durante el proceso de recolección de datos se consultó el Departamento de Producción y el Departamento de Planificación y Control de la Producción (PCP) de la empresa, con el fin de obtener datos detallados de la producción. Con la utilización de esta información se obtendrá el tiempo promedio que requieren las pailas de aluminio primario en precalentarse desde los 38°C hasta los 110°C.

Para obtener el tiempo promedio de permanencia de las pailas en el área de precalentamiento se realizo una toma de datos de los principales parámetros que rigen el sistema, como son número de pailas, hora de entrada y hora de salida del área.

4.5.1.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO ACTUAL

A fin de realizar el diseño del sistema de precalentamiento que ha sido seleccionado, se presenta la necesidad de hacer un estudio a las condiciones del sistema actual, por esto se realiza un análisis de transferencia de calor de las pailas de aluminio primario con respecto al ambiente con la finalidad de generar un modelo matemático que permita determinar el comportamiento de la misma durante este proceso.

El sistema consiste en colocar las pailas de aluminio primario en hileras de 5 pailas directamente sobre la superficie de la Nave A destinada para el



precalentamiento, la cual tiene una tubería de 76,2 mm (3pulg) dispuesta a lo largo de 20 m y la misma tiene agujeros de 25 mm de diámetro distanciados entre sí a 400 mm.

Ahí se mantienen durante un largo periodo y la transferencia de calor que ocurre durante el precalentamiento se realiza mediante convección natural.

El estudio parte del establecimiento de que los medios de transferencia de calor presentes en el proceso son la convección y la radiación, sin embargo, la radiación será omitida durante el desarrollo del análisis ya que representa menos del 10% de la transferencia de calor total emitido por el aluminio primario. Por lo tanto es necesario determinar los factores que influyen durante este proceso, los mismos se mencionan a continuación.

4.5.1.2 CONDICIONES AMBIENTALES A LOS QUE SE SOMETERÁ EL MATERIAL UNA VEZ COLOCADAS EN EL ÁREA.

Para obtener los valores correspondientes a las condiciones ambientales registradas en el área de precalentamiento actual, se hizo uso de un higrómetro digital cuyas especificaciones se muestran en el Anexo K. Tomando la temperatura de ambiente en la Nave A (lugar donde se encuentra ubicada el área de precalentamiento) durante un lapso de dos semanas consecutivas, en el segundo turno, se estableció una temperatura promedio del área correspondiente a 38° C (Apéndice G).



4.5.1.3 VARIACIÓN DE TEMPERATURA DE LAS PAILAS DURANTE EL PROCESO DE PRECALENTAMIENTO.

La temperatura del aluminio primario durante el proceso de precalentamiento se obtuvo a partir de la medición directa, la cual contempló dos etapas, la primera fue a la salida del área de almacenamiento de la materia prima y la segunda fue aquella donde el material estaba en condiciones para continuar con el proceso, es decir, a la salida del área de precalentamiento, para ello se utilizó un termopar de contacto directo, disponible en laboratorio de metrología de la empresa, cuyas especificaciones se muestran en el Anexo L.

Las pailas de aluminio primario estudiadas presentan como temperatura inicial $T_i = 38^\circ\text{C}$ y la temperatura a la salida del sistema de precalentamiento es de $T_f = 110^\circ\text{C}$ que es la necesaria para iniciar el proceso productivo.

4.5.1.4 VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL AIRE DURANTE EL PROCESO DE PRECALENTAMIENTO

Para determinar la temperatura del aire en el área de precalentamiento fue necesario hacer mediciones durante el proceso y promediarlas con la temperatura ambiente para luego establecer las propiedades térmicas del aire. La temperatura promedio de la misma fue de 400°C .

4.5.1.5 COEFICIENTE CONVECTIVO PROMEDIO QUE INFLUYEN DURANTE EL PRECALENTAMIENTO DEL ALUMINIO PRIMARIO.

Para realizar el estudio convectivo de las pailas de aluminio primario, se tomo como una sola pieza el conjunto de 5 pailas, se dividió la misma en cuatro áreas cuyas geometrías se adaptaban a modelos matemáticos establecidos en la bibliografía consultada. Dichos modelos permiten el cálculo de un coeficiente convectivo local para luego obtener un valor promedio de este coeficiente alrededor del aluminio primario. En la figura 4.6 se muestra la dirección del flujo de aire del sistema de precalentamiento actual.

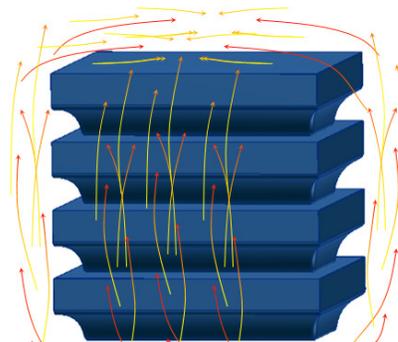


Figura 4. 6 Flujo de aire alrededor del aluminio primario para el sistema actual

La tabla a continuación muestra las configuraciones del flujo de aire que se determinaron durante el estudio del sistema de precalentamiento actual.

Tabla 4. 5 Análisis del flujo de aire alrededor del aluminio para el sistema actual

Zona del Aluminio	Configuración del flujo
Laterales 1 y 4	Flujo Alrededor de superficie plana vertical
Laterales 2 y 6	Flujo Alrededor de superficie plana vertical
Cara superior	Flujo alrededor de superficie plana horizontal calentada por la cara superior



Una vez establecidos los factores que influyen durante el precalentamiento de las pailas, se determina el coeficiente convectivo promedio, con este y la geometría del aluminio primario a precalentar se procede a definir el régimen de transferencia de calor del cuerpo a través del número de Biot.

$$N^{\circ}BIOT = \frac{L_c \cdot h_{promedio}}{k} \quad (4.1)$$

Siendo L_c la longitud corregida del aluminio definiéndose como:

$$L_c = \frac{Volumen}{Area_{superficial}} \quad (4.2)$$

$$L_c = \frac{1,91394}{7,9331} = 0,24126m$$

Para establecer el coeficiente convectivo promedio es necesario establecer primeramente los coeficientes convectivo locales, desarrollados en el apéndice G y se presenta para la temperatura de película igual a 255°C las siguientes propiedades térmicas del aire:

Tabla 4. 6 Propiedades térmicas del aire a 528°K

k (W/m.K)	0,0425
ρ (Kg/m ³)	0,6593
Cp (J/Kg.°C)	1035,7
μ (Kg/m.s)	2,80X10 ⁻⁵
ν (m ² /s)	4,25X10 ⁻⁵
Pr	0,6834



Posteriormente a fin de establecer el estado del aire que se encuentra en contacto con la las pailas, se procede al cálculo del Número de Rayleigh mediante la siguiente ecuación:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Lc^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (4.3)$$

Con el número de Rayleigh, se determina el número de Nusselt correspondiente a la configuración de flujo en estudio.

$$Nu = 0,68 + 0,670 \cdot (Ra \cdot \varphi)^{1/4} \cdot (1 + 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot Ra \cdot \varphi)^{1/12} \quad (4.4)$$

$$\varphi = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$$

Finalmente se obtiene el coeficiente convectivo local mediante la siguiente ecuación:

$$h_c = \frac{Nu \cdot K_{aire}}{Lc} \quad (4.5)$$

Por último, ya determinados cada uno de los coeficientes convectivos locales, se procede a promediarlos, para posteriormente calcular el número de Biot.

En la tabla 4.7, se muestra el resumen de los resultados obtenidos para cada área en estudio. Los cálculos se presentan en el Apéndice G.

Tabla 4. 7 Resultados obtenidos del análisis térmico del sistema de precalentamiento actual



Configuración del flujo	Número de Rayleigh	Número de Nusselt	Coefficiente convectivo local ($W/m^2 \cdot K$)
Flujo Alrededor de superficie plana vertical	$5,587 \cdot 10^9$	$3,267 \cdot 10^2$	15,5689
Flujo alrededor de superficie plana horizontal calentada por la cara superior	$2,572 \cdot 10^9$	$2,055 \cdot 10^2$	12,6809

Por último, ya determinados cada uno de los coeficientes convectivos locales, se procede a promediarlos, para posteriormente calcular el número de Biot.

$$h_c = \frac{h_{c1} + h_{c2} + h_{c3} + h_{c4} + h_{c5}}{5} \tag{4.6}$$

$$h_c = 14,99136324 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Finalmente sustituyendo cada uno de los parámetros en la ecuación de Biot tenemos

$$N^{\circ}BIOT = \frac{0,241260037 \cdot 14,99136324}{237}$$

$$N^{\circ}BIOT = 0,015260831$$

Dado que Biot resulto menor que 0,1 se puede asumir que el cuerpo se encuentra en estado uniforme. Como método para evaluar la veracidad de los cálculos realizados, se determina el tiempo de precalentamiento teórico de las pailas de aluminio primario para este sistema.

Partiendo de la definición de calor que matemáticamente se expresa como



$$q_c = \frac{du}{dt} \quad (4.7)$$

Desarrollando esta ecuación dejando como variable la variación de temperatura en el tiempo, se obtiene que:

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = A \cdot h \cdot (\Delta T) \quad (4.8)$$

Desarrollando la fórmula anterior del Apéndice G, se obtiene que:

$$\text{Ln} \left(\frac{T_{(x)} - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right) = \psi \cdot t \quad (4.9)$$

Siendo

$$\psi = \frac{A \cdot h}{m \cdot C_p} \quad (4.10)$$

Sustituyendo:

$$\psi = \frac{2.13 \cdot 14,9913}{4200 \cdot 903}$$
$$\psi = 8,41945 \cdot 10^{-6}$$

Finalmente sustituyendo para determinar el tiempo de precalentamiento del material se obtiene

$$t = \frac{\text{Ln} \left(\frac{110 - 400}{28 - 400} \right)}{8,41945 \cdot 10^{-6}}$$
$$t = 29575,91645s$$
$$t = 8,215532347horas$$

Comparando este resultado con el tiempo registrado durante el proceso de recolección de información, el cual denominaremos tiempo de precalentamiento real, y que fue de 8 horas, se verifica que el modelo teórico presenta un valor muy cercano al valor real.

4.5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO

A continuación se realizará una descripción detallada del sistema de precalentamiento y de cada uno de los elementos que lo conforman.

La cámara del nuevo sistema de precalentamiento debe ser capaz de elevar la temperatura de las pailas de aluminio primario requeridas por la producción de la empresa a 110 °C; para ello, las paredes de esta, estarán construidas con una manta de fibra cerámica compacta y termina con una carcasa de acero; tal como lo muestra la figura 4.7

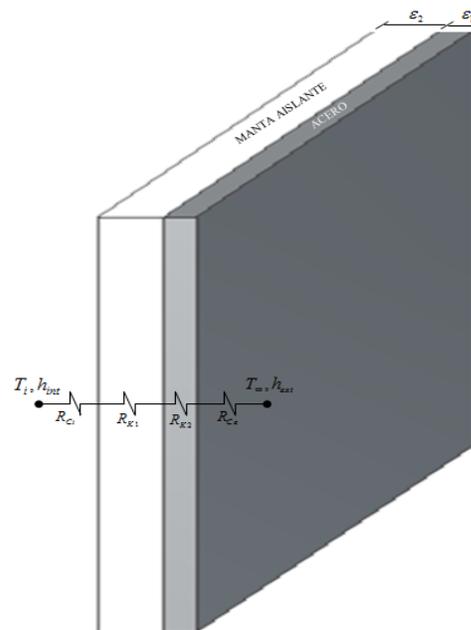


Figura 4.7 Composición de las paredes de la cámara

PUERTAS DE LA CÁMARA DE PRECALENTAMIENTO.

La cámara de precalentamiento dispondrá de dos puertas de iguales características para la introducción del aluminio, las cuales serán accionadas mecánicamente; dichas puertas estarán colocadas con una inclinación con respecto a la vertical de 15° de modo que el peso propio de la puerta sea suficiente para que cierren herméticamente y no exista posibilidad de fuga o apertura accidental de la misma. Las puertas se construirán con dos chapas de acero 1020, reforzadas con 18 ángulos de 40×4 soldadas a lo largo y ancho, de la puerta y separadas por 4 perfiles U para colocar en su interior la fibra aislante; como se aprecia en la siguiente figura 4.8:

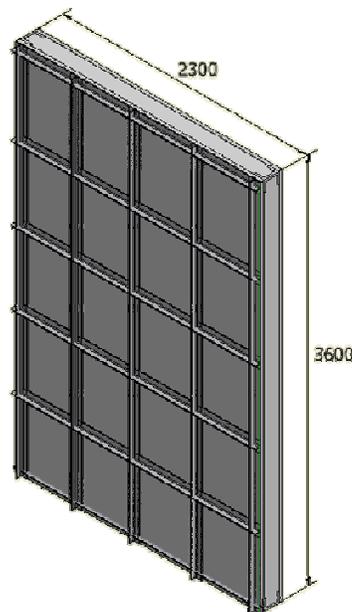


Figura 4. 8 Puerta de la cámara de precalentamiento.

SISTEMA DE TRASLADO DEL ALUMINIO PRIMARIO.

Este sistema tendrá la función de transportar las pailas de aluminio hasta el interior de la cámara de precalentamiento y extraerlas una vez alcanzado la

temperatura deseada; este consiste en dos elementos móviles (carros), un dispositivo que se encargará de empujar y extraer el carro dentro del horno, y una transmisión por cadenas como se puede apreciar en la siguiente figura 4.9:

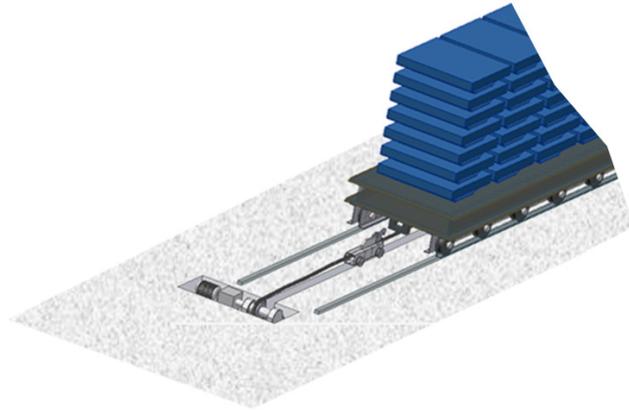


Figura 4. 9 Sistema de transmisión.

Al ponerse en marcha el motor se acciona la cadena, la cual mueve al dispositivo extractor que esta unido a ella; éste a su vez empuja o extrae el carro dentro del horno, dependiendo del sentido de giro del piñon.

Cada elemento móvil deberá ser capaz de trasladar las pailas de aluminio primario dispuestas en 8 columnas de 7 pailas cada una y se movilizará a través de rieles formados por unos perfiles U, como se muestran en la siguiente figura:

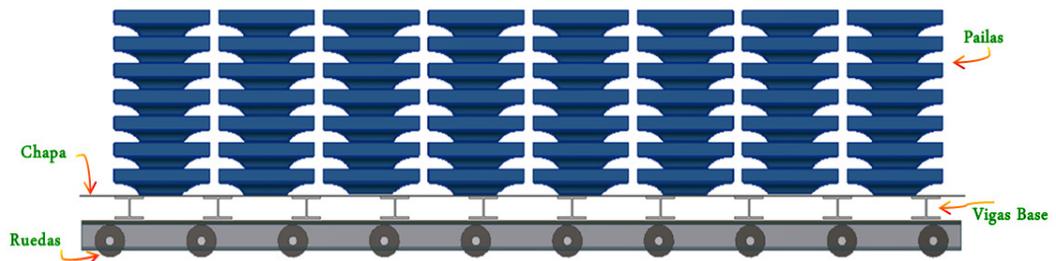


Figura 4. 10 Distribución de la carga sobre el elemento móvil

SISTEMAS DE APERTURAS DE COMPUERTAS

Para el diseño del sistema de apertura-cierre de la compuerta se tomaron en cuenta tres alternativas de diseño: una impulsada por engranajes y corredera, otra por dos poleas impulsadas por una cadena y la otra que consiste en un sistema de polea y contrapeso. Seleccionándose esta última por su simplicidad y menor costo. A continuación se observa la figura de la solución escogida (figura 4.11), así como la explicación de su funcionamiento:

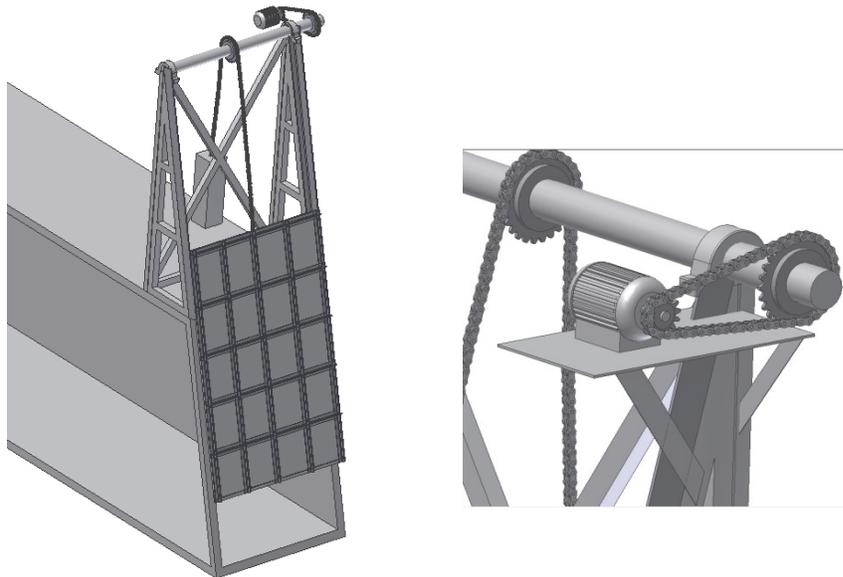


Figura 4. 11 Sistema de apertura de la puerta

El sistema de cadena y piñones, accionado por el motor, hace girar al eje permitiendo que la puerta se eleve o descienda por medio de la cadena a la cual está unida. El contrapeso situado en el otro extremo de la cadena ayudará a equilibrar el peso de la puerta; de manera que cuando el motor pare, la puerta no baje por gravedad. Para sostener el eje se diseñó una estructura metálica compuesta por una serie de perfiles tipo I y un ángulo que servirán de guías para la compuerta.



4.5.3 DISEÑO MECÁNICO DE LA CÁMARA DE PRECALENTAMIENTO.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del diseño y selección de los elementos mecánicos que conforman el sistema de precalentamiento de aluminio primario

4.5.3.1 SISTEMA DE TRASLADO DEL ALUMINIO PRIMARIO.

Para este sistema se realizó primeramente el diseño del elemento móvil (Apéndice B); para lo cual se tomó en cuenta el peso máximo a cargar, la temperatura a la cual será sometido y los materiales disponibles en el mercado; una vez obtenidas las características del carro se procedió a realizar los cálculos para el diseño de la transmisión por cadenas y del elemento extrator del carro. Los parámetros utilizados para este diseño fueron:

DISTANCIA A RECORRER POR EL CARRO:

Esta será igual a la longitud del carro la cual es de $10m$ más una distancia de $1.5m$ para que el montacargas pueda operar sin que la cámara impida su desplazamiento, entonces, la distancia total a desplazar el carro va ser de $11.5 m$.

PESO DE LA CARGA:

Este va a estar conformado por el peso del carro y de las pailas de aluminio. El peso total del carro incluyendo ruedas y la estructura es de 36000 Kg . El peso de la carga máxima a ser transportada es de 33600 Kg correspondiente a 56 pailas.



VELOCIDAD DEL CARRO:

Se adoptó una velocidad igual 6 mpm para el traslado del material para así evitar una posible caída del mismo; esta se obtuvo a través de ensayos con un modelo a escala del carro y las pailas; tomando en cuenta factores como el peso y centro de masa.

Los elementos y componentes seleccionados para este sistema se detallan a continuación:

Tabla 4. 8 Características de la transmisión por cadenas

<u>Cadena:</u>	
Longitud (pasos)	412
Paso (plg)	2 1/4
N° :	180
<u>Piñón:</u>	
Diámetro (mm)	637,5
N de dientes	35

Tabla 4. 9 Características del moto-reductor

RPM	9,2
Potencia (Hp)	12,1
Peso (Kg)	18,5
Modelo	KXCM 303/63G6-4/34
Marca	Pujol



4.5.3.2 DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA MOVIL

Cada elemento móvil estará compuesto por dos planchas de acero y vigas tipo IPN-100 (Anexo P), distribuidas a lo largo de las planchas de acero a una distancia de 1 metro entre ellas y ruedas de acero al carbono dispuestas de igual forma, sobre las cuales se dispondrán el resto de los componentes del sistema móvil.

Se debe verificar si las vigas fallan según las condiciones de carga establecidas, por lo que inicialmente se determinan las fuerzas que deben soportar para posteriormente hacer un análisis de pandeo.

FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LAS VIGAS BASE.

Para el cálculo de las fuerzas que actúan sobre la viga base se calcularon las masas de los componentes que conforman el sistema móvil así como la masa de las pailas que debe transportar.

A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos

Tabla B. 1 Resumen de las masas de los componentes del elemento móvil y de la carga a transportar.

m_{Chapas}	2.833,2 Kg
m_{Vigas}	3.942 Kg
m_{Pailas}	33.600 Kg
m_{Ruedas}	1.394,94 Kg



m_{Total}	41.770,14Kg
-------------	-------------

Después de conocer las masas calculan la fuerza que ejercen las pailas de aluminio primario y las fuerzas ejercidas por cada componente del elemento móvil que actúan sobre las vigas base, para realizar un estudio y determinar si estas fallan por pandeo.

Los resultados se presentan a continuación

Tabla 4. 10 Fuerzas que actúan sobre la viga base

F_{Pp}	329.616N
F_{Chapa}	13.897N
F_{Vb}	34.351,2846N

Estudio de las vigas.

Se debe verificar si las vigas fallan para las condiciones de carga establecidas, por lo que inicialmente se determinan las fuerzas que deben soportar para posteriormente hacer un análisis de pandeo.

Conocidas las fuerzas actuantes, se realizó en el Apéndice B un análisis y se obtuvieron los siguientes resultados

S_{rD}	119,859
L_e	50,16cm
K	0,5287cm
S_r	189,72



P_{cr}	503.385 N
P	125846,4354 N

Finalmente se tiene que la carga aplicada 34.351,2846 N es mucho menos que 125.846,43 N por lo que se dice que la viga no fallara por pandeo.

4.5.3.3 SISTEMAS DE APERTURAS DE PUERTAS.

Para el diseño de este sistema se calculó la potencia necesaria que debe suministrar el motor eléctrico encargado de elevar y bajar la compuerta y luego se hizo su selección; así mismo se diseñaron y seleccionaron los demás componentes como son: las cadenas, eje, piñones, polea, contrapeso, cojinetes; además del diseño de la estructura fija que lo soportará. Para ello se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

CARACTERÍSTICAS DE LA COMPUERTA:

El peso de la puerta, el cual se obtuvo con el volumen y el material seleccionado para su construcción.

PRESIÓN DENTRO DE LA CÁMARA:

Este valor se utiliza para determinar la fuerza necesaria para que la puerta cierre herméticamente y sin riesgo de fugas.

APERTURA DE LA COMPUERTA:



Esta será la distancia necesaria que deberá elevarse la compuerta de la cámara para poder introducir el máximo de pailas para el cual fue diseñada, esta distancia es de 3 metros.

VELOCIDAD DE APERTURA:

La velocidad a la que se moverá la puerta es de 0,07 m/s la cual se tomó con referencia a otros sistemas de aperturas de puertas.

DIMENSIONES DEL GALPÓN:

Las dimensiones del sitio donde estará ubicada la cámara de precalentamiento se tomaron en cuenta para determinar la manera de desplazamiento de las puertas ya sea horizontal o verticalmente.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del diseño del sistema de apertura de puerta desarrollado en el Apéndice C:

Tabla 4. 11 Características de la rueda dentada

Espesor (mm)	80
Diámetro (mm)	253
Peso (Kg)	28
Nº de dientes	11

Tabla 4. 12 Características del eje

Longitud (m)	3
Diámetro (plg)	4,6



Material Acero AISI 1040

Tabla 4. 13 Características de la transmisión por cadenas

Cadena:	
Longitud (pasos)	61
Paso (plg)	2
N° :	160
Piñón:	
Diámetro (mm)	373,07
N de dientes	23
RPM	6.68

Tabla 4. 14 Características del motor y caja reductora

RPM	5,4
Potencia (Hp)	0,22
Peso (Kg)	18,5
Modelo	KXCM 303/63G6-4/34
Marca	Pujol

4.5.4 DISEÑO TÉRMICO DE LA CÁMARA DE PRECALENTAMIENTO

Para realizar los cálculos térmicos se deben definir los parámetros que se tomaran en cuenta, como son:

TEMPERATURA FINAL DE LAS PAILAS DE ALUMINIO (T_f)



Para comenzar el proceso productivo del papel aluminio es necesario retirar toda la humedad existente en el aluminio primario antes de entrar a los hornos de fusión, por lo que la temperatura a alcanzar es de 110 °C (383 °K).

TEMPERATURA AMBIENTE (T_a)

El área destinada para la realización de la cámara de precalentamiento se encuentra en el área de fusión y colada, en el cual la temperatura es de 38 °C.

MASA DEL ALUMINIO A PRECALENTAR (m_{Al})

La cantidad de aluminio que se necesita precalentar varía dependiendo de cuantos hornos estén en funcionamiento y de la cantidad de material reciclable (chatarra) de aluminio, regularmente se utiliza el 64% de aluminio primario y un 36% de chatarra (que son las normas establecidas), sin embargo para efectos de diseño se asumirá que el 100% de la materia prima a utilizar será aluminio primario.

Los hornos de fusión cuyas especificaciones se presentan en el Anexo C, tienen una capacidad máxima de 35.000 Kg, y su capacidad de trabajo es del 80 %, es decir, de 28.000 Kg. Estos mantienen un remanente del 28 % de la capacidad de trabajo (8.000 Kg), por lo que la cantidad total a cargar de aluminio primario si esta fuera a ser su única materia prima sería de 20.000 Kg.

$$m_{Al} = 20.000Kg$$

Asimismo se puede determinar la cantidad de pailas de aluminio primario que se necesitan precalentar en la cámara, por lo que si las pailas pesan 600Kg cada una y se



necesitan 20.000 Kg de aluminio primario para cargar cada horno. La cantidad máxima de pailas a calentar para cada horno de fusión será de 32 unidades.

CÁLCULO DEL CALOR QUE SE PIERDE POR LAS PAREDES DE LA CAMARA DE PRECALENTAMIENTO Y LA TEMPERATURA A LA QUE SALEN LOS GASES DE LA CHIMENEA.

El calor disponible en la cámara de precalentamiento, o la carga térmica, es el resultado de la suma del calor que absorben los componentes internos cuando cambian su temperatura, en este caso, dentro de la cámara se encuentran además de las pailas, los carros móviles; y el calor que se pierde por los gases que salen de la chimenea y el calor perdido por las paredes del horno.

Entonces haciendo uso de las siguientes ecuaciones

$$Q = C_p \cdot m \cdot (T_f - T_i) \quad (4.11)$$

$$Q_D = Q_{Al} + Q_C + Q_p + Q_{gs} \quad (4.12)$$

Donde

Q_D = Calor Disponible

Q_{Al} = Carga térmica absorbida por el aluminio primario.

Q_C = Carga térmica absorbida por elemento móvil.

Q_p = Calor perdido por las paredes y el techo de la cámara de precalentamiento.

Q_{gs} = Carga térmica perdida a través de la chimenea.



Y siguiendo el procedimiento del Apéndice E, se obtienen los resultados que se presentan a continuación, así como también la temperatura a la que salen los gases por la chimenea,

Q_{Al}	303,408KW
Q_C	247,5245KW
Q_p	6,710KW
$T_{Schimenea}$	480,7°C

Después de obtenidos los calores que actúan, se procede a calcular la temperatura de salida de los gases por la chimenea, haciendo uso de las siguientes ecuaciones (3.60) y (6.61)

$$Q_D = Q_{Al} + Q_C + Q_p + Q_{gs}$$
$$m \cdot C_p (T_g - T_{Schimenea}) = Q_{Al} + Q_C + Q_p + (m \cdot C_p \cdot (T_{Schimenea} - T_\infty))$$

Despejando la ecuación se tiene,

$$T_{Schimenea} = \frac{\left(\frac{(Q_{Al} + Q_C + Q_p)}{m \cdot C_p} - (T_g + T_\infty) \right)}{-2} \tag{4.13}$$
$$T_{Schimenea} = 480,7^\circ\text{C}$$

4.5.4.1 CÁLCULO DE LOS ESPESORES DE LAS PAREDES, TECHO Y PUERTAS DEL HORNO



Las pérdidas de calor consideradas en el diseño de la cámara de precalentamiento son las perdidas a través del techo, la puerta y las paredes del horno.

Por tal razón a continuación se definen los materiales que conformaran la cámara de precalentamiento y sus respectivos espesores:

En cuanto al material aislante se utilizará un sistema de módulos Anchor-Loc mostrada en el Anexo U, debido a las altas temperaturas de trabajo, a la baja conductividad, la durabilidad, la capacidad de disminuir la temperatura a las recomendadas para el exterior del horno y principalmente a la disponibilidad en el mercado.

Por último la carcasa de acero de la cámara de precalentamiento tendrá un espesor de 3 mm que es lo que usualmente usan los hornos industriales.

Para determinar el espesor de la capa de manta aislante se debe tomar en cuenta el espesor de la capa de acero que conforma las paredes, además del coeficiente convectivo en el interior del horno (Apendice F), y después de conocidos estos valores se procede a calcular el espesor de la manta aislante optimo para cumplir con los requerimientos del sistema haciendo uso de la siguiente ecuación (F.8):

$$\varepsilon_2 = \left(\left(\frac{T_g - T_{Sext}}{T_{Sext} - T_\infty} \right) \cdot \frac{1}{h_{ext}} - \left(\frac{1}{h_{cint}} + \frac{\varepsilon_1}{k_1} \right) \right) \cdot k_2 \quad (4.14)$$

Donde:

T_g =Temperatura interna de horno ($^{\circ}K$).

T_{Sext} =Temperatura de la superficie externa de horno ($^{\circ}K$).

T_∞ =Temperatura ambiente ($^{\circ}K$).



ϵ_1 = Espesor de la primera capa (acero) (m).

ϵ_2 = Espesor de la segunda capa (manta) (m).

ϵ_3 = Espesor de la tercera capa (manta) (m).

k_1 = Conductividad térmica de la manta. $\left(\frac{W}{m \cdot k} \right)$.

k_2 = Conductividad térmica del acero. $\left(\frac{W}{m \cdot k} \right)$.

Tabla 4. 15 Resumen de los valores necesarios para el cálculo del aislante de la cámara

T_g	1274,6°K
$T_{pared_{ext}}$	328°K
ϵ_1	0,003m
K_1	52W/m·K
K_2	0,015W/m·K
h_{int}	3,965W/m ² ·K
$h_{C_{ext}}$	3,303W/m ² ·K

Y después de realizar los cálculos necesarios en el Apéndice F y Sustituyendo los valores de la tabla 4.15 se tiene que los espesores para las paredes, la puerta y el techo de la cámara de precalentamiento de la manta aislante serán:

$$\epsilon_2 = 0,23m$$



4.5.4.2 DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE GASES PARA LA CÁMARA DE PRECALENTAMIENTO ⁽⁸⁾

El sistema a diseñar va a estar provisto de unos conductos por los cuales se suministrarán los gases provenientes de las chimeneas de los hornos de fusión a la cámara; estos estarán formados por chapas de acero y recubiertos en su interior por placas aislantes como las que se muestran en el Anexo U debido a las altas temperaturas de los gases. Para obtener el espesor de este aislante se partió de que no hubiera una pérdida de temperatura en los gases mayor a 2°C; este cálculo se encuentra en el apéndice F. La configuración de estos conductos se muestra a continuación:

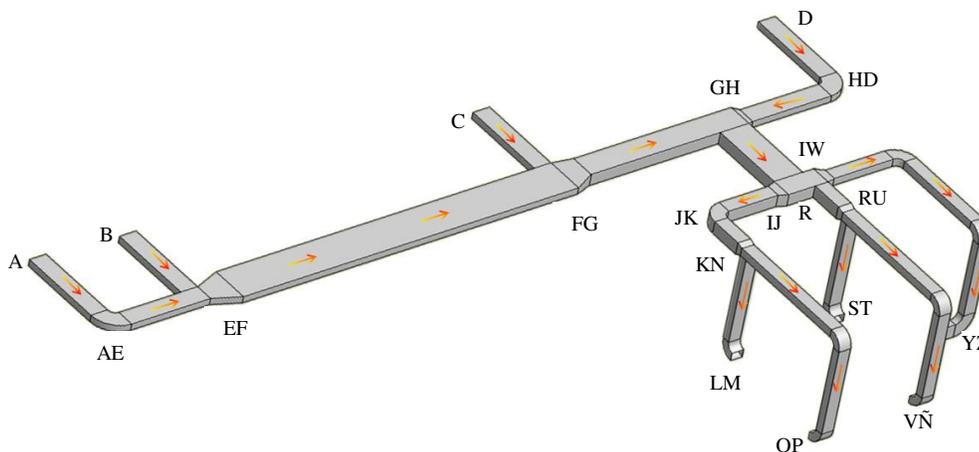


Figura 4. 12 Distribución de los conductos.

Para establecer las dimensiones de los conductos y accesorios de suministro del gas, se seguirá el procedimiento mostrado en capítulo III y desarrollado en el Apéndice I, también conocido como método de igual fricción.

En el Plano N° 08 se muestra la disposición que tendrá la red de conductos del sistema de precalentamiento y la designación de cada tramo.



En la tabla 4.14, se muestra el resumen de las características principales que poseen los conductos, codos y difusores del sistema, respectivamente. Los cálculos se presentan en el apéndice H.

Tabla 4. 16 Características principales de los conductos.

Tramo	Q_{MAX} (m ³ /s)	V (m/s)	$A_{teórica}$ (m ²)	Dimensiones (mm)	L_{Tramo} (m)	ΔP (mm.ca)	Accesorios			ΔP_{total} (mm.ca)
							Tipo	L (m)	ΔP (mm.ca)	
A-EF	2,736	11,54	.237	850x300	19	4,75	Codo 90°	2,74	0,69	5,44
B-EF	2,736	11,54	.237	850x300	4	1	-----	-----	-----	1
EF-FG	5,472	23.09	.237	850x300	17	3,4	Reducción	-----	0,35	3,75
		12.94	.423	1800x300						
C-FG	2,736	11,54	.237	850x300	4	1	-----	-----	-----	1
FG-GH	8,208	19,4	.423	1800x300	8	1,5	Reducción	-----	0,56	2,06
		13,98	.587	1150x550						
D-GH	2,736	11,54	.237	850x300	19	4,75	Codo 90°	2,74	0,69	5,88
		4,66	.587	1150x550			Reducción	-----	0,44	
GH-IJ	10,94	15	.73	1450x550	3,5	0,67	-----	-----	-----	0,67
IJ-JK	4,376	12,5	.35	650x550	2,5	0,55	Codo 90°	3,9	0,86	1,64
		8,93	0.49	550x950			Reducción	-----	0,23	
JK-KN	4,376	22,2	0,197	600x350	1,5	0,33	Reducción	-----	0,32	0,65
		12,5	.35	650x550						
KN-OP	2,184	11,09	0,197	600x350	9,2	2,3	Codo 90° (2)	2,6	1,3	3,6
KN-LM	2,184	11,09	0,197	600x350	4	1	Codo 90°	2,6	0,65	1,65
R-RU	4,376	22,2	0,197	600x350	1,6	0,35	Reducción	-----	0,32	0,67



		12,5	.35	650x550						
RU-VÑ	2,184	11,09	0,197	600x350	9,3	2,33	Codo 90° (2)	2,6	1,3	3,63
RU-ST	2,184	11,09	0,197	600x350	4	1	Codo 90°	2,6	0,65	1,65
IW-YZ	2,184	11,09	0,197	600x350	11,5	2,84	Codo 90° (3)	2,6	1,95	4,97
		4,46	0,49	550x950			Reducción	-----	0,18	

Determinación de camino crítico del sistema de suministro.

El camino crítico es aquella ruta que genera más pérdidas y es en base a éste que se selecciona el ventilador de suministro. Dado que los tramos están diseñados por el método de igual fricción, el camino crítico será la ruta de mayor longitud y mayor pérdida por accesorios. Para realizar el estudio del camino crítico y posteriormente seleccionar el ventilador se estudiará a partir del conducto A hasta cada uno de los conductos que distribuyen el gas a la cámara de precalentamiento, ya que las pérdidas generadas en este serán mayores y el mismo ventilador podrá satisfacer el caudal de gas requerido para todos los caminos.

Tabla 4.17.- Camino y tramos que lo conforman, para ambas secciones

Camino	Tramos
A-LM	(A-EF) – (EF-FG) – (FG-GH) – (GH-IJ) – (IJ-JK) – (JK-KN) – (KN-LM)
A-OP	(A-EF) – (EF-FG) – (FG-GH) – (GH-IJ) – (IJ-JK) – (JK-KN) – (KN-OP)
A-ST	(A-EF) – (EF-FG) – (FG-GH) – (GH-IJ) – (R-RU) – (RU-ST)
A-VÑ	(A-EF) – (EF-FG) – (FG-GH) – (GH-IJ) – (R-RU) – (RU-VÑ)
A-YZ	(A-EF) – (EF-FG) – (FG-GH) – (GH-IJ) – (IW-YZ)



Los valores de las pérdidas en cada tramo se muestran en la tabla 4.16. Sumando cada una de ellas siguiendo los distintos caminos se obtiene:

- Camino A-LM = 15,86 mm.c.a.
- Camino A-OP = 17,81 mm.c.a.
- Camino A-ST = 14,24 mm.c.a.
- Camino A-VÑ = 16,22 mm.c.a.
- Camino A-YZ= 16,89 mm.c.a

Entonces el camino crítico, es el camino A-OP, con pérdidas de **17,81 mm.c.a.**

Selección del ventilador.

Para la selección del ventilador, es necesario conocer el caudal de aire y la disponibilidad requerida por el sistema, las pérdidas totales del sistema vienen dadas por las pérdidas en la red de conductos, tomando como criterio el camino crítico y las de las válvulas de compuerta. El caudal de gas requerido en la sección I va a ser igual a $10,94 \text{ m}^3/\text{s}$ (23180,5 PCM).

- **Corrección por altitud y temperatura:** la corrección por altitud y temperatura se realiza mediante el Anexo R; mediante éste, se determina el factor de corrección de acuerdo a la temperatura y la altura sobre el nivel del mar a la cual se encuentra el lugar de trabajo. La empresa está ubicada en Guacara, Edo. Carabobo, por lo que se tomará una altura aproximada 440,44 metros sobre el nivel del mar y una temperatura promedio de 800°C . Con estos valores se tiene que el factor de corrección (fr) es de 1,09.

Al multiplicar el factor de corrección por ($h_{T_{cor}}$) para seleccionar el ventilador:



Sección I: $h_{Tcor} = 24 \text{ mmca}$

Las especificaciones del ventilador se encuentran a continuación:

Potencia: 10 Hp

Caudal: $11,09 \text{ m}^3/\text{s}$ (23491 PCM)

Disponibilidad: 25,4 mm.c.a. (1 plg.c.a.)

rpm: 670

4.5.4.3 CÁLCULO DE LA CHIMENEA DE LA CAMARA DE PRECALENTAMIENTO⁽¹⁵⁾.

Para determinar las características de una chimenea es imprescindible conocer el tipo de fluido que se espera que circule por ella. Normalmente se trata de humos producto de la combustión de combustibles fósiles (carbón, derivados líquidos o gaseosos del petróleo), madera, etc., en aire ambiente. Sin embargo, aun en estos casos, hay que tener en cuenta la posible “contaminación” de estos humos con sustancias desprendidas de los procesos en los que intervienen, como por ejemplo, en los hornos de reverbero.

En el caso frecuente de combustibles líquidos (fuel-oil, gasoil, etc.) o gaseosos (hidrocarburos gaseosos o “gas natural”), estos humos se componen de:

N₂: procedente del aire comburente.

CO₂ y H₂O (vapor): procedentes de la combustión de los hidrocarburos, junto con pequeñas cantidades provenientes de la propia composición de aire comburente.



O₂: procedente del aire comburente en exceso respecto al necesario para una combustión estequiometría.

NO_x: si la temperatura alcanzada por la llama supera los 1.300°C en alguna zona, la combinación del nitrógeno del aire (o de los compuestos nitrogenados presentes en el combustible) con el oxígeno se realiza a velocidades apreciables, contaminando los humos con óxidos de nitrógeno en proporciones suficientes como para sobrepasar las normativas de ciertos países.

SO_x: algunos combustibles, especialmente los líquidos, contienen azufre en proporciones que pueden variar entre menos de un 1% (combustibles B.T.S.) hasta algo más de un 5% (fueles pesados) que combinado con el oxígeno del aire, da lugar a diferentes compuestos de azufre, todos ellos considerados como contaminantes por las administraciones de diferentes países

CO: resultado de una combustión incompleta.

Radicales libres, partículas sólidas (fundamentalmente de carbono) y otras producto, procedentes de impurezas en el combustible (metales pesados), aunque todos ellos en muy pequeñas proporciones.

A título de ejemplo, en la tabla adjunta puede verse composiciones típicas de humos producidos por la combustión estequiométrica de un combustible líquido y un “gas natural”, comparadas con el aire ambiente.

Tabla 4. 17 composiciones típicas de los humos.



Componente	% en peso		
	Aire	Con Fuel Oil	Con "Gas Natural"
CO ₂	0,05	20,8	15,4
H ₂ O	0,56	7,6	12,4
SO ₂	0,00	0,4	0,0
N ₂	75,05	70,0	70,9
O ₂	23,07	0,0	0,0
Ar	1,27	1,1	1,2
Otros	—	0,1	0,1
Calor específico Kcal/Kg°C	0,23	0,25	0,26
Densidad normal Kg/Nm ³	1,288	1,311	1,254
Kg aire/Kg combustible	—	14,0	17,0

Las propiedades de los humos se asemejan a las del aire ambiente (con un 50% de humedad relativa). Normalmente, la combustión se realiza en ambientes con exceso de aire comburente respecto de la proporción estequiométrica, llegándose a duplicar o triplicar esta proporción. En estos casos con más motivo, las propiedades de los humos se acercan a las del aire. Por estas razones, y a efectos de cálculos técnicos y en una primera aproximación se pueden tomar como propiedades de los humos de la combustión de derivados del petróleo, las del aire.

A continuación se encuentra el desarrollo de los cálculos de los parámetros necesarios para la fabricación de la chimenea de la cámara de precalentamiento.

DIÁMETRO DE LA CHIMENEA O SECCIÓN DE PASO DE LOS HUMOS POR LA CHIMENEA

Para el cálculo de la chimenea debe conocerse la velocidad de los humos que circulan por ella, es decir, la velocidad mínima de evacuación de los humos por la coronación de la chimenea, la cual pudiese decirse que deberían oscilar entre un mínimo de 3 m/s y los 10 m/s. Una velocidad media de 5 m/s suele considerarse como adecuada.



El cálculo del diámetro de la chimenea se realizó haciendo uso de la siguiente ecuación y conociendo el caudal que pasa por la chimenea, la temperatura de salida y la velocidad a la que salen los gases, presentado en la Tabla 4.17,

$$D \geq \sqrt{\frac{4 \cdot Q \cdot (273 + T_H)}{\pi \cdot 273 \cdot V \cdot \rho_o}} \cdot m \quad (4.15)$$

Tabla 4. 18 Características necesarias para el cálculo del diámetro de la chimenea

Q	13 Kg/s
T_H	$480,7^\circ\text{C}$
ρ_o	$1,29 \text{ Kg/N}\cdot\text{m}^3$
V	5 m/s

Se puede decir que el diámetro de la chimenea será

$$D \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 3,25 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right) \cdot (273 + 480,7(^\circ\text{C}))}{\pi \cdot 273 \cdot 5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \cdot 1,29 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{N}\cdot\text{m}^3}\right)}} (m)$$

$$D \geq 2,66173187(m)$$

ALTURA DE LA CHIMENEA



La altura mínima de una chimenea emitiendo gases considerados por la legislación U.E. como contaminantes, viene determinada por la normativa correspondiente del lugar en el que se ubique.

Tomando como referencia las chimeneas de los hornos que se encuentran en la empresa donde se fabricará la cámara de precalentamiento y hornos similares, se determino que la altura de la chimenea será de 19 metros.

DEPRESIÓN MÍNIMA DETERMINADA EN SU BASE

Además de dispersar los humos en la atmósfera, corrientemente las chimeneas tienen por objeto la creación, en su base, de una depresión o aspiración, que permite la circulación de estos humos desde su origen hasta su salida a la atmósfera libre, a unas velocidades determinadas. Esto exige la creación, dentro del circuito completo, de un diferencial de presiones que compense tanto las *pérdidas de carga* de los humos dentro de los aparatos en los que se generan (ΔP_1), como en la propia chimenea (ΔP_2) y proporcionarles la energía cinética para su salida por la coronación de la chimenea a la velocidad V .

A efectos prácticos, puede decirse que para chimeneas la expresión será:

$$\Delta P = \frac{18}{273 + T_H} \cdot V^2 \cdot \left(1 + 0,035 \cdot \frac{H}{D} \right) + \Delta P_1 \quad (4.16)$$

ΔP = Presión, mm c.a.

V = Velocidad media de los humos, m/s



H = Altura de la chimenea, m

D = Diámetro interior, m

Tabla 4. 19 Características de la Chimenea.

V	$5m/s$
H	$19m$
D	$2,7m$

Sustituyendo los valores de la tabla 4.18 en la ecuación
¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

$$\Delta P = 0,75mm.c.a$$

TIRO NATURAL

Para ello se aprovecha el efecto de *empuje de Arquímedes* que sufren los gases calientes rodeados por otros fríos. La chimenea contiene una columna de humos calientes, rodeada de aire a una temperatura ambiente, inferior. El empuje o **tiro**, se calcula por la diferencia del peso de ambas columnas, de altura igual a la de la chimenea. La forma más sencilla de estimar esta diferencia consiste en considerar las dos columnas como de aire a temperaturas uniformes.

$$\Delta P = \rho_0 \cdot H \cdot 273 \cdot \left(\frac{1}{273 + T_a} - \frac{1}{273 + T_H} \right) \cdot \frac{P}{P_0} (mm.c.a.) \quad (4.17)$$

Donde

ρ_0 = Densidad de los humos a 0°C y 1 atm, Kg/m³



H = Altura de la chimenea, m

T_a = Temperatura ambiente, °C

T_H = Temperatura de los humos en la base.

P_0 = Presión atmosférica en la base de la chimenea

P = Presión atmosférica a la altura del mar (~10.331 mm c.a.)

Tabla 4. 20 Resumen de los datos para el cálculo del tiro de la chimenea.

ρ_0	$1,29 \frac{Kg}{N \cdot m^3}$
T_H	$480,7^\circ C$
H	$19m$
T_a	$38^\circ C$
P	$9,49 \cdot 10^3 mm.c.a.$
P_0	$10,33 mm.c.a.$

Sustituyendo los valores en la ecuación (4.17), el tiro de la chimenea es igual a

$$\Delta P = 11,61 mm.c.a$$

4.5.5 TIEMPO DE SECADO DEL ALUMINIO PRIMARIO EN FUNCION DE LOS HORNOS DE FUSION EN SERVICIO.



En el Apéndice J se presentan cuatro gráficas para obtener el tiempo de secado del aluminio primario en función de la cantidad de materia prima en Kg, dependiendo de la cantidad de hornos de fusión que se tengan en servicio; así pues, se tiene una gráfica para un horno en servicio, otra para 2, 3 y 4 hornos respectivamente. Entonces el operador según la cantidad de materia prima necesaria para cumplir con la realización del proceso productivo y los hornos en servicio lee la cantidad de horas mínimas que debe dejar las pailas en la cámara de precalentamiento.

4.5.6 ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico consiste en determinar los beneficios económicos que lleva consigo la instalación del nuevo sistema de precalentamiento del aluminio primario, para este, se tomó el tiempo de estudio del proyecto igual a 10 años. A continuación se presenta el método utilizado para el estudio,

4.5.6.1 RENTABILIDAD DE LA INSTALACIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO

El estudio de la factibilidad económica se llevó a cabo bajo el modelo del valor actual (VA), además estará complementado con el modelo de tiempo de pago para la estimación del tiempo en años en recuperar la inversión.

4.5.6.2 FLUJOS MONETARIOS ASOCIADOS

La estimación de los flujos monetarios netos necesarios para el estudio de la rentabilidad de este proyecto, se dividen en dos: Ingresos y Costos. El primero, son



las ganancias percibidas por todo aquello que genere ahorro y reducción en los costos, mientras que el segundo, son todas aquellas pérdidas o egresos que se puedan generar; ambos debido a la ejecución del proyecto. En las siguientes secciones se darán a conocer los procedimientos y las consideraciones tomadas para su obtención.

4.5.6.3 INVERSIÓN INICIAL (II)

Se obtendrá una inversión inicial, producto de la construcción e instalación del sistema traslado y de la construcción e instalación del sistema de precalentamiento. Los costos asociados al sistema se presentan en la tabla 4.23 a continuación:

Tabla 4. 21 Costos relativos al sistema de precalentamiento

MATERIAL	CANTIDAD	COSTO UNIT	COSTO TOTAL
Perfiles para soporte (horizontales)	Vigas marca CABIPERCA modelo W 21x 147. Dimensiones: longitud total 18. Cantidad: las vigas se venden en unidades de 12 m por lo cual se requieren 2 vigas. Por 2 carros	10952,7	43810,8
Perfiles para columnas (verticales)	Vigas marca Properca modelo IPN 260. Dimensiones: longitud total.21,5m Cantidad: las vigas se venden en unidades de 12 m por lo cual se requieren 2 vigas. Por 2 sistemas	3582,15	14328,6
Chapa para el	Láminas de acero 0,01x1x2,4m		



elemento móvil	Dimensiones: 1,8x10x0,01 m	536	8576
	Cantidad: Se requieren 8 láminas para las dos chapas del elemento móvil. Por dos carros		
Chapa para la puerta de la cámara	Láminas de acero 0,003x1x2,4m Dimensiones: 1,8x10x0,003 m	160	1280
	Cantidad: Serán 4 laminas para cada puerta de la cámara de precalentamiento y por ser dos puertas se necesita un total de 8 laminas		
Chapa para la cámara de precalentamiento	Láminas de acero 0,003x1x2,4m Cantidad: Se requieren 55 laminas para el recubrimiento exterior de la cámara de precalentamiento	160	8800
Chapa para el cuerpo del dispositivo extractor	Láminas de acero 0,015x1x2,4m Dimensiones: 0,23m ²	900	900
	Cantidad: 1 lamina para fabricar el gancho del extractor, por ser 2 dispositivos será 0,46 m ²		
Vigas para los rieles	Vigas marca H Welle S.A UPL 80 Dimensiones: longitud total 100 m	319,64	2876,76
	Cantidad: las vigas se venden en unidades de 12 m por lo cual se requieren 9 vigas.		
Redondos para ruedas del elemento móvil	Barras de acero 1020 de 0,350x1mm Dimensiones: longitud de 2,28 m	80	273760
	Cantidad: se requieren 1711kg barras para la fabricación de las ruedas. por ser 2 elementos móviles será 3422Kg. Precio por Kg		
Redondos para el dispositivo	Barras de acero 1020 de 0,055x1m. Dimensiones: longitud total 0,570m	205	205



extractor	Cantidad: se requiere 1 barra para la fabricación de las ruedas. siendo 2 extractores		
Cadena para el sistema de traslado del elemento móvil (cadena de transmisión)	N-180 Paso 2 ¼ Cantidad: 412 pasos, 23, 5 m Por ser 2 sistemas 47m. Precio por metro	470	22090
Cadena para la elevación de la puerta (cadena de tracción)	N-50 Paso 5/8 Cantidad: 69 pasos, 1 m Por ser 2 puertas a elevar 2m Precio por metro	175	350
Motor para el sistema de transmisión	Moto reductor marca PUJOL de 12 HP 9RPM trifásico Cantidad: se requiere 1 para el sistema de traslado del elemento móvil. 2 sistemas de transmisión 1 motores	10000	20000
Motor para la elevación de la puerta	Moto reductor marca PUJOL de 0,24 HP 5,4RPM trifásico Cantidad: se requiere 1 para el sistema de traslado del elemento móvil Se requieres para 2 sistemas	1500	3000
Piñones para el sistema de transmisión	Piñón marca MG Industrial Dimensiones: 30 dientes, D= 638 mm Cantidad: 2. Tomando 2 sistemas se necesitan 4 Precio por metro	418	1672
Piñones para el	Piñón marca MG Industrial	90	360



sistema de elevación de la puerta	Dimensiones: 25 dientes, D= 150 mm Cantidad: 2. Por 2 sistemas se necesitan 4 piñones Precio por metro		
Redondos para eje de sistema de transmisión	Barras de acero 1020 de 0,20 m Dimensiones: longitud total 0,6 m Cantidad: 4 2 para cada sistema de transmisión Precio por metro	2000	4800
Redondos para sistema de elevación de la puerta	Barras de acero 1020 de 5pulg Dimensiones: longitud total 3m c/u Cantidad: se requieren 2 barras para la fabricación del eje de las puertas Precio por metro	100	600
Redondos para eje de las ruedas del elemento móvil	Barras de acero 1020 de 0,1x1m. Dimensiones: longitud total de 4 m. Cantidad: se requieren 4 barras para la fabricación de los ejes. Para 2 carros son 8 barras Precio por metro	1030	8240
Redondos para el eje las ruedas del extractor	Barras de acero 1020 de 0,04x1m. Dimensiones: longitud total de 0,570m Cantidad: se requieren 2 barras para la fabricación de los ejes de los 2 extractores	150	300
Ladrillos refractarios para la cámara de precalentamiento	Ladrillo refractario marca Dimensiones: 114x230x76mm Cantidad: se requieren 2464 ladrillos para la fabricación de la cámara de precalentamiento	30	73920



to				
Manta aislante para la cámara de precalentamiento y la puerta	Manta aislante marca UNIFRAX B12 0,05x1x1 Dimensiones: total 149 m ² Cantidad: se requieren 1490 m ² de manta aislante para cubrir toda la cámara	80	119200	
Manta aislante para los conductos	Manta aislante marca UNIFRAX B12 0,05x1x1 Dimensiones: total 282,7 m ² Cantidad: se requieren 2827 m ² de manta aislante para cubrir toda la cámara	80	226160	
Chapas para los conductos	Láminas de acero 0,008x1x2,4m Cantidad: Se requieren 118 laminas para el recubrimiento exterior de la cámara de precalentamiento	422	49796	
Manta aislante para la chimenea	Manta aislante marca UNIFRAX 51x1220x21960mm Dimensiones: total 41,8m ² Cantidad: se requieren 418m ² de manta aislante para cubrir la red de conductos	80	33440	
Chapa para la chimenea	Láminas de acero 0,008x1x2,4m Cantidad: Se requieren 18 laminas para el recubrimiento exterior de la cámara de precalentamiento	422	7596	
Chapa para el contrapeso	Láminas de acero 0,003x1x2,4m Cantidad: Se requieren 22,5 m ² Se requieren 45 m ² para los 2 contrapesos	160	7200	
Rodamientos de bolas para	Rodamiento rígido de bola marca SKF Cantidad: 4	15	60	



el sistema de elevación de puertas	Considerando los 2 sistemas de elevación		
Perfiles para el refuerzo de puerta	Angulo marca Properca 40x4. Dimensiones: longitud total 134m Cantidad: las vigas se venden en unidades de 6 m por lo cual se requieren 23 perfiles. Considerando las 2 puertas	68,52	1575,96
Perfiles para la guía de la puerta	Angulo marca Properca 75x7. Dimensiones: longitud total 14,4m Cantidad: las vigas se venden en unidades de 6 m por lo cual se requieren 5 perfiles tomando en cuenta 2 puertas entonces son 28,8 m	500,68	14419,58
Costo por consumo de energía eléctrica	Cantidad: el costo de la energía eléctrica es de 0,2 Bs/KWh, las horas hombre a invertir para la realización de la soldadura son 480 y el consumo de un equipo para soldar común es de 1150W.	0,2	110
	TOTAL Bs.		949426,7
	IVA 14% Bs.		132919,7
			4
	TOTAL Bs.		1082346,44

Nota: Se considera que el costo de la mano de obra e instalación será un 20% del costo total del material de construcción, sin incluir el impuesto.

Los costos asociados a la construcción e instalación del sistema de precalentamiento fueron cotizados por una empresa contratista, dando como total un



valor de 216.469,3 BsF., precio que incluye horas hombre, transporte, instalación y el impuesto correspondiente.

Entonces, el valor de la inversión inicial esta dado por:

$$II = \text{costo de materiales y equipos} + \text{costo de mano de obra} \quad (4.18)$$

$$II = 1082346,44 \text{ BsF} + 216.469,3 \text{ BsF}$$

$$II = 1.298.815 \text{ BsF}$$

4.5.6.4 ESTIMACIÓN DE INGRESOS.

El análisis económico de la solución seleccionada se realizará a partir de los costos que genera el consumo actual de gas natural en el precalentamiento de las pailas. Para obtener dicha información se consultó a un analista del departamento de ingeniería de la empresa. Debido a que la información financiera de la misma se maneja de manera confidencial, solo se pudo obtener la cantidad de gas natural que se consume en la empresa, el cual es de 8.863.680 m³, a un costo de 0.03222 BsF/m³.

CONSUMO ANUAL DE GAS NATURAL DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO ACTUAL.

El sistema de precalentamiento actual consume el 20 % del gas natural total de la empresa, por lo que con el sistema a implementar se producirá una reducción total de este consumo, debido a que se utilizarán los gases provenientes de las chimeneas de los hornos de fusión, entonces se determinan los ingresos anuales por concepto de instalación del nuevo sistema de la siguiente manera:

$$C_{g_{sp}} = \text{Consumo anual de gas natural del Sistema de Precalentamiento actual.}$$



$$C_{g_{SP}} = 8863680m^3 \cdot 0,2 \cdot 0,03222 \text{ BsF}/m^3$$

$$C_{g_{SP}} = 57118 \text{ BsF}/\text{año}$$

INGRESOS PRODUCIDOS DEBIDO A LA DISMINUCIÓN DEL TIEMPO DE PRECALENTAMIENTO DE LAS PAILAS DE ALUMINIO.

Actualmente el sistema de precalentamiento tiene una capacidad de precalentar 80 pailas en 8 horas, mientras que el nuevo sistema de precalentamiento tendrá la capacidad de precalentar 224 pailas de aluminio primario en el mismo periodo de tiempo; considerando que la carga de los 4 hornos de fusión será en su totalidad de pailas de aluminio primario, es necesario precalentar 32 pailas por horno, dando un total a precalentar de 128 pailas, quedando 48 pailas sin fundir con el sistema de precalentamiento actual.

Costo de cada paila que se mantiene en almacén por cada turno de trabajo:

$$C_P = 300 \text{ BsF}/\text{horno} \cdot \text{turno} \cdot \frac{1 \text{ horno}}{32 \text{ pailas}} = 9,375 \text{ BsF}/\text{Paila}$$

$$C_{PT} = 9,375 \text{ BsF}/\text{Paila} \cdot 48 \text{ pailas}/\text{turno} = 450 \text{ BsF}/\text{turno}$$

$$C_{PA} = 450 \text{ BsF}/\text{turno} \cdot 3 \text{ turnos}/\text{día} \cdot 365 \text{ días}/\text{año} = 492750 \text{ BsF}/\text{año}$$

Por otra parte según la producción promedio actual de la empresa, el ingreso por cada kilogramo de aluminio procesado es de 0,08 BsF .

Entonces el ingreso debido a la disminución del tiempo de precalentamiento y la instalación del nuevo sistema por día será:

Tabla 4. 22 Total de Ingresos en Bs.F/año



$C_{g_{SP}}$	57118
C_{PA}	3942000
TOTAL	492750

4.5.6.5 ESTIMACIÓN DE COSTOS.

Se considera que el sistema de precalentamiento trabajará 24 horas todos los días de la semana. Como se mencionó anteriormente el costo por servicio de electricidad está estimado en 0,2 Bs/kWh. En el Anexo I (características de los motores) se especifica la potencia consumida por estos, igual a 1.65 KW y 18.5 KW, tomando en cuenta que son dos motores de 0.24 HP y el otro es de 12 HP; entonces, con el nuevo sistema la potencia eléctrica consumida será de:

$$Consumo_{\text{eléctrico}} = 18,5 \cdot 2 + 1,65 \cdot 2$$

$$Consumo_{\text{eléctrico}} = 40,3 \text{ kWh}$$

$$Consumo_{\text{eléctrico}} = 40,3 \text{ kWh} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}$$

$$Consumo_{\text{eléctrico}} = 353.028 \text{ KW/año}$$

Costo del consumo eléctrico anual:

$$353028 \text{ KW/año} \cdot 0,2 \text{ BsF/KW} = 70605,6 \text{ BsF/año}$$

Los costos operacionales anuales generados por repuestos del sistema, se van a estimar en un 10 % del costo total de los equipos y elementos del sistema (cadenas, motores, piñones, rodamientos, etc), entonces:

$$C_R = 35300 \text{ BsF} \cdot 0,10\% = 3530 \text{ BsF / año}$$



Los costos operacionales correspondientes al mantenimiento preventivo y correctivo se calculan por el sueldo promedio que reciben 2 empleados necesarios para este trabajo, entonces estos son igual a:

$$C_M = (1142BsF / mensuales) \cdot 2 = 2284BsF / mensuales$$

Costo por mantenimiento anual:

$$C_M = (2284BsF / mensuales) \cdot 12meses / 1año = 27400BsF / año$$

Los sueldos y salarios no se consideran ya que el operador del sistema es el mismo operador de los hornos de recocido por lo que la instalación del nuevo sistema no genera costos adicionales a los que ya existen por este concepto.

Tabla 4. 23 Costos generados por el sistema

Consumo eléctrico	70605,6
Mantenimiento	27400
Repuestos	3530
TOTAL	101540

4.5.6 VALOR RESIDUAL (VR)

Para la recuperación de la inversión se tomó un periodo de 10 años, tiempo en el que los principales componentes se encuentran a un 50 % del tiempo de su vida útil por lo cual su valor será el 50 % del costo que representa actualmente; mientras que los motores han cumplido su vida útil por lo que su valor residual es igual a cero. De esta manera el valor residual del sistema será:



$$VR = (1.298.815 - 23000)BsF \cdot 50 \% \tag{4.19}$$

$$VR = 637908BsF$$

4.5.6.7 DETERMINACIÓN DEL VALOR ACTUAL (VA)

La determinación de la rentabilidad del proyecto se basará en el modelo del Valor Actual, para ello se representará en la escala de tiempo los flujos monetarios asociados al estudio, tal como se muestra a continuación en la Tabla 4.21

Para el obtener los flujos monetarios netos, se realizará el cálculo utilizando la ecuación:

$$F_t = I_t - COP_t + VR_t \tag{4.20}$$

Por lo que la convención usual de signos determina que:

- ◆ Se le asigna positivo (+) a todo flujo que represente un ingreso para el proyecto
- ◆ Se le asigna negativo (-) a todo flujo que represente un egreso para el proyecto

Los flujos monetarios para los años 1, 2, 3... hasta 9 serán:

$$F_n = (492750 - 101540)BsF / año = 391210BsF / año$$

Mientras que para el año 10 será:

$$F_{10} = (492750 - 101540 + 637908)BsF = 1029118BsF$$

Tabla 4. 24 Escala de tiempo con los flujos monetarios netos

-1298815	391210	391210	391210	391210	391210	391210	391210	391210	391210	391210	391210	1029118
----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------



Para este trabajo se tomará como tasa mínima de rendimiento, la tasa de interés anual pasiva promedio de los seis principales bancos comerciales de cobertura nacional, es decir, TMR = 14 %. Esto se obtiene de la página web del Banco Central de Venezuela (B.C.V) en Junio de 2009. Con este porcentaje y consultando la tabla del Anexo S se obtiene el factor de actualización, denominado $P/R_{14\%; 10 \text{ años}} = 5,2161$ El valor actual del proyecto es:

$$VA = -1.298.815 + 1029118x (P/R_{13\%; 5 \text{ años}}) + 637908 x (P/R_{13\%; 5 \text{ años}})$$

$$VA = -1.298.815 + 1029118 x (5,2161) +637908 x (5,2161)$$

$$VA=9994189,32 \text{ BsF}$$

Ya que el $VA > 0$, quiere decir que los ingresos superan los costos, incluyendo la tasa mínima de rendimiento, en una cantidad de dinero equivalente al valor actual. Por lo cual es proyecto es rentable.

4.5.6.8 TIEMPO DE PAGO (TP)

Ahora bien, si se divide el total de la inversión requerida, entre las ganancias generadas por la instalación del sistema, se obtiene el tiempo aproximado de pago de la inversión, esto puede sujetarse al uso de la siguiente ecuación.

$$Tp = \frac{I}{Ingresos} \tag{4.21}$$

$$Tp = \frac{1.298.815}{391210}$$



$T_p = 3,3 \text{ años}$ Como resultado el tiempo de pago de la inversión del nuevo sistema de precalentamiento es de 3,3 años, lo cual representa 1212 días de trabajo continuo.



INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
EL PROBLEMA	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
1.2 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.	3
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	5
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.6 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.7 LIMITACIONES.....	7
1.8 DELIMITACIONES.....	8
CAPÍTULO II	9
MARCO TEÒRICO.....	9
2.1 ANTECEDENTES.....	9
2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	10
2.2.1 HORNOS.....	11
2.2.2 TIPOS DE HORNOS INDUSTRIALES PARA CALENTAMIENTO. ⁽¹⁾	11
2.2.3 MÉTODOS PARA ECONOMIZAR CALOR.	13
2.2.4 BALANCE ENERGÉTICO EN HORNOS DE LLAMA PARA RECALENTAMIENTO.....	13
2.2.5 EL ALUMINIO.....	15
2.2.5.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ALUMINIO.....	15
2.2.5.2 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ALUMINIO.	15
2.2.5.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO.....	16
2.2.6 REFRACTARIOS.....	16
2.2.7 NÚMEROS ADIMENSIONALES.....	18



2.2.7.1	NÚMERO DE REYNOLDS.....	18
2.2.7.2	NÚMERO DE NUSSELT.	18
2.2.7.3	NÚMERO DE PRANDTL.....	19
2.2.7.4	NÚMERO DE RAYLEIGH.....	20
2.2.8	MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	20
2.2.8.1	TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN	21
2.2.8.1.2	CONDUCCIÓN DE CALOR EN REGIMEN TRANSITORIO.....	22
2.2.8.2	TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN	26
2.2.8.2.1	CONVECCIÓN FORZADA	27
2.2.8.2.2	CONVECCIÓN NATURAL.....	29
2.2.8.3	TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN.....	31
2.2.9	RESISTENCIAS TERMICAS.....	33
2.2.10	ESFUERZOS EN VIGAS.	37
2.2.10.1	TENSIÓN AXIAL.....	37
2.2.10.2	ESFUERZOS DE FLEXIÓN.....	37
2.2.10.3	ESFUERZO POR CORTE DIRECTO.....	38
2.2.10.4	COMPRESIÓN AXIAL (COLUMNAS).....	38
2.2.11	DISEÑO DE CONDUCTOS.....	41
2.2.12	SISTEMAS DE TRANSMISIÓN MECÁNICAS.	42
2.2.12.1	DISEÑO DE CADENAS.....	42
2.2.12.2	SELECCIÓN DE CADENAS DE RODILLOS.....	43
2.2.13	DISEÑO DE EJES.....	44
CAPITULO III.....		47
MARCO METODOLÓGICO.....		47
3.1	NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN	47
3.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN	48
3.3	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	48
3.3.1	PRIMERA ETAPA: Evaluación del sistema actual.....	48
3.3.2	SEGUNDA ETAPA: Planteamiento de posibles soluciones.....	51



3.3.3	TERCERA ETAPA: Selección de la mejor propuesta.....	51
3.3.4	CUARTA ETAPA: Desarrollo de las soluciones seleccionada.....	52
3.3.5	QUINTA ETAPA: Estudio técnico – económico.....	62
	CAPÍTULO IV.....	63
	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	63
4.1	PARÁMETROS DE DISEÑO.....	63
4.2	RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES DISPONIBLES.....	64
4.3	PLANTEAMIENTO DE LAS POSIBLES SOLUCIONES.....	64
4.3.1	PROPUESTA DE SOLUCIÓN 1.....	65
4.3.2	PROPUESTA DE SOLUCIÓN 2.....	67
4.3.3	PROPUESTA DE SOLUCIÓN 3.....	69
4.3.4	PROPUESTA DE SOLUCIÓN 4.....	71
4.3.5	PROPUESTA DE SOLUCIÓN 5.....	73
4.4	SELECCIÓN DE LA MEJOR SOLUCIÓN.....	74
4.5	DISEÑO DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO.....	75
4.5.1	SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO ACTUAL.....	76
	4.5.1.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO ACTUAL	76
	4.5.1.2 CONDICIONES AMBIENTALES A LOS QUE SE SOMETERÁ EL MATERIAL UNA VEZ COLOCADAS EN EL ÁREA.....	77
	4.5.1.3 VARIACIÓN DE TEMPERATURA DE LAS PAILAS DURANTE EL PROCESO DE PRECALENTAMIENTO.....	78
	4.5.1.4 VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL AIRE DURANTE EL PROCESO DE PRECALENTAMIENTO	78
	4.5.1.5 COEFICIENTE CONVECTIVO PROMEDIO QUE INFLUYEN DURANTE EL PRECALENTAMIENTO DEL ALUMINIO PRIMARIO.	79
4.5.2	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO.	84
4.5.3	DISEÑO MECÁNICO DE LA CÁMARA DE PRECALENTAMIENTO.....	88



4.5.3.1	SISTEMA DE TRASLADO DEL ALUMINIO PRIMARIO.	88
4.5.3.2	DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA MOVIL..	90
4.5.3.3	SISTEMAS DE APERTURAS DE PUERTAS.....	92
4.5.4	DISEÑO TÉRMICO DE LA CÁMARA DE PRECALENTAMIENTO.....	94
4.5.4.1	CÁLCULO DE LOS ESPESORES DE LAS PAREDES, TECHO Y PUERTAS DEL HORNO.....	97
4.5.4.2	DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE GASES PARA LA CÁMARA DE PRECALENTAMIENTO.....	100
4.5.4.3	CÁLCULO DE LA CHIMENEA DE LA CAMARA DE PRECALENTAMIENTO.....	104
4.5.5	TIEMPO DE SECADO DEL ALUMINIO PRIMARIO EN FUNCION DE LOS HORNOS DE FUSION EN SERVICIO.....	110
4.5.6	ESTUDIO ECONÓMICO	111
4.5.6.1	RENTABILIDAD DE LA INSTALACIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO.....	111
4.5.6.2	FLUJOS MONETARIOS ASOCIADOS.....	111
4.5.6.3	INVERSIÓN INICIAL (II).....	112
4.5.6.4	ESTIMACIÓN DE INGRESOS.....	118
4.5.6.5	ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	120
4.5.6.6	VALOR RESIDUAL (VR).....	121
4.5.6.7	DETERMINACIÓN DEL VALOR ACTUAL (VA)	122
4.5.6.8	TIEMPO DE PAGO (TP).....	123



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Sistema de Pre calentamiento Actual.....	1
Figura 1. 2 Proceso de Producción en el Área de Fusión y Colada.....	2
Figura 1. 3 Condiciones del sistema actual de pre calentamiento de pailas de aluminio.	5
Figura 2. 1 Transferencia unidimensional de calor por conducción. ⁽²⁾	21
Figura 2. 2 Efecto del número de Biot en la distribución de temperatura de estado estable en una pared plana con convección en la superficie. ⁽³⁾	24
Figura 2. 3 Intercambio de radiación: (a) en la superficie, y (b) entre una superficie y sus alrededores. ⁽³⁾	32
Figura 2. 4 Distribución de temperatura de la transferencia de calor por conducción a través de una pared plana. ⁽³⁾	34
Figura 2. 5 Circuito térmico equivalente para una pared plana compuesta en serie. ⁽³⁾	35
Figura 2. 6 Circuito térmico equivalente para una pared plana compuesta en paralelo. ⁽³⁾	36
Figura 2. 7 Líneas de fallas de columnas Euler, Johnson y cortas ⁽⁹⁾	40
Figura 4. 1 Propuesta de Solución 1.....	66
Figura 4. 2 Propuesta de Solución 2.....	68
Figura 4. 3 Propuesta de Solución 3.....	70
Figura 4. 4 Propuesta de Solución 4.....	72
Figura 4. 5 Propuesta de Solución 5.....	73
Figura 4. 6 Flujo de aire alrededor del aluminio primario para el sistema actual.....	79
Figura 4. 7 Composición de las paredes de la cámara.....	84
Figura 4. 8 Puerta de la cámara de pre calentamiento.....	85
Figura 4. 9 Sistema de transmisión.....	86



Figura 4. 10 Distribución de la carga sobre el elemento móvil.....	86
Figura 4. 11 Sistema de apertura de la puerta	87
Figura 4. 12 Distribución de los conductos.....	100



INDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1 Condiciones del Sistema de Pre calentamiento Actual	63
Tabla 4. 2 Recursos Disponibles para el Rediseño del Sistema de Pre calentamiento	64
Tabla 4. 3 Ponderación de los criterios	74
Tabla 4. 4 Ponderación de las soluciones planteadas	75
Tabla 4. 5 Análisis del flujo de aire alrededor del aluminio para el sistema actual ...	79
Tabla 4. 6 Propiedades térmicas del aire a 528°K.....	80
Tabla 4. 7 Resultados obtenidos del análisis térmico del sistema de pre calentamiento actual	81
Tabla 4. 8 Características de la transmisión por cadenas.....	89
Tabla 4. 9 Características del moto-reductor.....	89
Tabla 4. 10 Fuerzas que actúan sobre la viga base	91
Tabla 4. 11 Características de la rueda dentada	93
Tabla 4. 12 Características del eje	93
Tabla 4. 13 Características de la transmisión por cadenas.....	94
Tabla 4. 14 Características del motor y caja reductora.....	94
Tabla 4. 15 Resumen de los valores necesarios para el cálculo del aislante de la cámara	99
Tabla 4. 16 Características principales de los conductos.....	101
Tabla 4. 17 composiciones típicas de los humos.....	105
Tabla 4. 18 Características necesarias para el cálculo del diámetro de la chimenea	107
Tabla 4. 19 Características de la Chimenea.	109
Tabla 4. 20 Resumen de los datos para el cálculo del tiro de la chimenea.	110
Tabla 4. 21 Costos relativos al sistema de pre calentamiento.....	112
Tabla 4. 22 Total de Ingresos en Bs.F/año.....	119
Tabla 4. 23 Costos generados por el sistema.....	121
Tabla 4. 24 Escala de tiempo con los flujos monetarios netos.....	122



INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo de grado está basado en el rediseño del sistema que actualmente utiliza la empresa CVG Alucasa para el secado de la materia prima utilizado en la producción de laminados de aluminio.

El contenido de este trabajo se presenta por capítulos, desarrollados de la siguiente manera:

En el capítulo I se encuentra la explicación del problema que actualmente presenta el sistema de precalentamiento de aluminio primario en la empresa, las consecuencias relacionadas a éste, el objetivo a cumplir en este trabajo y la respectiva justificación del proyecto.

En el capítulo II se presenta la información teórica que se utilizó para la realización del rediseño del sistema de precalentamiento, así como también trabajos similares que sirvieron de referencia para considerar algunos aspectos del proyecto.

En el capítulo III se clasificó el proyecto según el nivel y el tipo de investigación; además se presenta en un conjunto de etapas el procedimiento que ayudó a cumplir con el propósito general de la investigación planteada.

En capítulo IV se plantearon cinco posibles soluciones para el problema presentado en el capítulo I; posteriormente se seleccionó la mejor solución según criterios basados en las necesidades de la empresa. En este capítulo también se encuentra el diseño de dicha solución, éste se dividió en el diseño mecánico y el diseño térmico, así como el estudio económico del nuevo sistema de precalentamiento.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron después de realizado el desarrollo de la solución seleccionada.



CONCLUSIONES

Evaluando el proceso para el precalentamiento de las pailas de aluminio primario utilizado actualmente en la empresa CVG Alucasa, se determinó que el mismo es capaz de precalentar 80 pailas de aluminio primario en 8 horas, por convección natural; se verificó durante el análisis del sistema actual que el tiempo de precalentamiento es de 8,21 horas; siendo válido este resultado ya que el estudio de la transferencia de calor del aluminio primario se realizó a partir de un modelo matemático.

El tiempo de secado del aluminio primario se estableció en 4 horas para 112 pailas para dos hornos de fusión en servicio y en función de su capacidad máxima; lo que podría asegurar un proceso continuo en la elaboración de los laminados de aluminio y una disminución de más de 15% del total de combustible utilizado en la empresa.

Se establece como método de precalentamiento para el sistema a diseñar, la transferencia de calor por convección de los gases extraídos de las chimeneas de los hornos de fusión a través de una red de conductos.

Los factores principales que afectaron la selección del método de secado fueron: la fuente de energía, la temperatura que interviene y el modo en que se da el intercambio de calor con el aluminio primario. Tomándose en cuenta principalmente el primer factor, se estimaría que el tiempo de secado disminuye en un 50% así como también el ahorro energético en un 100%, debido a que la energía utilizada será el aprovechamiento de los gases residuales de los hornos de fusión; lo que trae como consecuencia un favorable impacto ambiental, social y económico para el país.



Después de estudiar diversos sistemas de transporte y elevadores de materiales se determinó que uno de polea y contrapeso era la mejor opción para la elevación de cada una de las dos puertas de la cámara de precalentamiento, por ser eficiente, económico y seguro. Así mismo, se seleccionó y diseñó un par de elementos móviles, para la introducción y extracción del aluminio a la cámara, guiados por rieles y accionados por un dispositivo que estará unido a un sistema de transmisión por cadenas.

El sistema propuesto en este trabajo de grado permitiría incrementar el rendimiento del precalentamiento del material, la cual puede pasar de 80 a 224 pailas por turno, representando un incremento del 180%, lo que podrá generar una mayor fluidez en el proceso productivo, disminuyendo en gran medida los tiempos muertos ocasionados por la espera del material a que alcance la temperatura ideal antes de ser introducidos a los hornos de fusión, pudiendo cumplir con los requerimientos futuros de la empresa que será el de aumentar la producción.

La instalación del nuevo sistema de precalentamiento de pailas de aluminio podría generar un importante ahorro energético debido a la energía térmica cedida por los gases residuales de los hornos de fusión.

El valor actual del estudio de la rentabilidad del proyecto es mayor a cero ($VA > 0$), lo que indica que la instalación del nuevo sistema de precalentamiento es un proyecto factible, con un tiempo de pago igual a 3 años.



RECOMENDACIONES

Optimizar el proceso de precalentamiento mediante la instalación de un sistema de control automatizado capaz de obtener el tiempo de secado de las pailas a través de la medición del caudal y de la temperatura de gases provenientes de las chimeneas de los hornos de fusión para así tener mayor exactitud en el tiempo de secado de pailas de aluminio primario; ya que en este proyecto se asume el caudal de cada horno como constante, pero este depende de las condiciones a la que están fundiendo dichos hornos.

Realizar el mantenimiento preventivo a todos los elementos mecánicos que componen el sistema de transmisión del aluminio primario a los hornos, así como también el sistema de elevación de las puertas de la cámara de precalentamiento según indicaciones de sus fabricantes como lo son rodamientos, cojinetes, motores, cadenas, etc; para alargar su vida útil.



BIBLIOGRAFIA

1. Frank Kreith, Principios de transferencia de calor, editorial Herrero hnos. primera edición en español noviembre de 1970.
2. Incropera Frank P, De Witt David P. Fundamentos de transferencia de calor. Cuarta edición prentice hall. 1999
3. J.P Holman. Transferencia de calor primera edición en español. Mc Graw Hill 1998
4. Eugene A. Avallone; Theodore Baumeister III. Manual del ingeniero Mecánico. Novena edición. Mc Graw Hill. 1995.
5. Grimm Nils R.; Rosaler Robert C. Manual de diseño calefacción, ventilación y aire acondicionado. Mc Graw Hill. 1996
6. Pérez N. Angel. Maquinas hidráulicas y manejo de fluidos. Instituto Universitario de Tecnología Puerto Cabello (I.U.T.P.C). 2004
7. García, A. F. (1997) *Cálculo de conductos de Aire*. Perú. Ceac, C.A.
8. Catalogo de cadenas
9. Norton Robert. Diseño de maquinas, editorial Prentice Hall, primera edición 1999.



10. Shirley Joseph E. (2002) Diseño en Ingeniería Mecánica. (6ta Ed.) Editorial: Mc. Graw Hill.

11. Cadena A. Alberto. Acondicionamiento de ambiente. Universidad de Carabobo. 2002

12. A.S. Hall y A.R. Holowenco. Diseño de Máquinas. Serie Schaum. Mc Graw Hill

13. Mills, F. Anthony. (1999). *Transferencia de Calor*. España. Editorial: Mc. Graw Hill.

14. Carrier Air Conditioner Company. (1974) *Manual de Aire Acondicionado*. España. Editorial: Macombo de Boixaren Editores, S. A.

15. <http://www.areadecalculo.com/monograficos/chime/Chimeneas.pdf>