

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS AMÉRICAS

Vicerrectoría Académica



ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

DISEÑO DE HORNO DE QUEMADO PARA ESTADORES EN UNA
EMPRESA DEDICADA AL MANTENIMIENTO Y REBOBINADO DE
MOTORES ELÉCTRICOS

MODALIDAD DE PROYECTO PARA OPTAR POR EL GRADO DE BACHILLER EN
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

ELABORADO POR

JAIRO GÓMEZ VALVERDE

CÉDULA

207680989

GRECIA, ALAJUELA, 2019.

Contenido

Índice de Ilustraciones.....	6
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	12
Justificación.....	14
Planteamiento del problema.....	15
Limitaciones.....	15
Proyecciones	15
Objetivos	16
Objetivo general	16
Objetivos específicos	16
Antecedentes	17
Antecedente histórico.....	17
CAPÍTULO 11: MARCO TEÓRICO.....	31
Máquinas eléctricas rotativas	31
Máquinas eléctricas asíncronas	31
Máquina eléctrica sincrónica	32
Núcleo estatórico.....	32
Aislamiento interlaminar.....	32
Corrientes parásitas	33
Termodinámica	33
Equilibrio térmico	34
Entalpía	34
Transferencia de calor	34
Conducción	35

Radiación térmica.....	35
Convección.....	35
Conductividad térmica	36
Aislamientos térmicos.....	37
Tipos de aislamientos térmicos	37
Hornos industriales de quemado	38
Hornos de quemado.....	38
Funcionamiento de un quemador	40
Inicio	40
Prepurga normal de arranque	40
Pruebas de ignición	41
Operación (Run).....	41
Postpurga.....	42
Controladores de temperatura	42
Controlador ON/OFF	42
Controlador PID	44
Salidas de control: Relevador y SSR	45
Controlador de nivel modulante LC 2610.....	46
Controlador dos estaciones	47
Sensores de temperatura.....	48
Tipos de sensores de temperatura	48
Análisis de cargas en estructuras.....	51
Equilibrio de una partícula	51

Fuerza cortante y momento flexionante en una viga	52
Normativas vigentes y aplicables para el diseño del horno industrial	55
NFPA 54	56
Manual de disposición de bomberos	56
Valor actual neto (VAN).....	57
Tasa interna de retorno (TIR).....	57
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	60
Método de la investigación	60
Enfoque de la investigación	60
Tipo de investigación	60
Fuentes de información	61
Variables	62
Definición conceptual	62
Definición instrumental.....	63
Definición Operacional	64
Instrumentos.....	65
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
Diagnóstico de la situación actual.....	67
Descripción de la empresa	67
Proceso de reparación de máquinas eléctricas rotativas	67
Inspección inicial del motor o generador	67
Inspección mecánica	68
Proceso de rebobinado	68

Proceso de ensamble	71
Entrega del motor.....	71
Definición del proyecto por diseñar	74
Propuesta de solución.....	85
Parámetros de cálculo	85
Análisis de transferencia de calor	85
Análisis eléctrico.....	107
Análisis mecánico estructural	111
Cálculos en la carretilla.....	113
Costos económicos del proyecto.....	119
Comentarios	122
Conclusiones	123
Recomendaciones.....	124
Referencias Bibliográficas	125
Anexos	127
Anexo 1. Plano de generador utilizado como referencia para el diseño	127
Anexo 2. Modelo de carretilla para hornos Steelman.....	128
Anexo 3. Plantilla de Excel del cálculo de transferencia de calor	129
Anexo 4. Ubicación y posición del horno en vista de la exposición al viento..	130
Anexo 5. Ficha Técnica Quemador Wayne HSG 400	131
Anexo 6. Cotización HSG 400.....	133
Anexo 7. Cotización tubo estructural para carretilla y horno	134
Anexo 8. Ficha Técnica Ruedas de la carreta	135

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Automatización del horno eléctrico de arco	24
Ilustración 2. Diagrama de bloques del proceso de calentamiento del alambre	26
Ilustración 3. Horno Industrial Steelman	40
Ilustración 4. Flujo de calor en Hornos Steelman. Patente 5.351.632	40
Ilustración 5. Controlador ON-OFF	43
Ilustración 6. Respuesta de Controlador ON-OFF	43
Ilustración 7. Diagrama de Bloque de un controlador PID	44
Ilustración 8. Controlador Modulante 4 a 20 mA	47
Ilustración 9. Controlador dos estaciones	48
Ilustración 10. Reacciones en Viga AB	52
Ilustración 11. Corte en C de la viga AB	53
Ilustración 12. Momento flector.....	54
Ilustración 13. Esfuerzos Cortantes.....	54
Ilustración 14. Momento flexionante positivo	54
Ilustración 15. Ubicación de Electromotores vía satélite.....	72
Ilustración 16. Ejecución de prueba núcleo con termografía.....	76
Ilustración 17. Evidencia de alta temperatura en área del núcleo	76
Ilustración 18. Comparación de valores de temperatura y pérdidas, antes y después del proceso de quemado	76
Ilustración 19. Proceso de reparación laminado	78
Ilustración 20. Ensamble de laminación y ejecución de prueba	78

Ilustración 21. Verificación mecánica posición del Núcleo.....	79
Ilustración 22. Detalle de Horno	82
Ilustración 23. Interior de Horno.....	82
Ilustración 24. Detalle del combustible (gas) del horno	82
Ilustración 25. Base de soporte y salida del quemador.	82
Ilustración 26. Detalle de operación del horno	82
Ilustración 27. Llama directa en el núcleo del motor.....	82
Ilustración 28. Circuito Térmico de las paredes del horno	96
Ilustración 29. Circuito Térmico Pared Izquierda.....	99
Ilustración 30. Circuito Térmico suelo	101
Ilustración 31. Plano cuerpo de tubería estructural del horno.....	112
Ilustración 32. Planos de la Carretilla. Elaborado en Inventor	112
Ilustración 33. Ruedas de Carga.....	113
Ilustración 34. Diagrama de Cuerpo Libre Tubo estructural de anchura.....	114
Ilustración 35. Diagrama de fuerzas cortante y momento máximo	115

Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de Hornos de tipo indirecto.....	55
Tabla 2. Dimensiones de estructura externa de horno antiguo	79
Tabla 3. Escala de temperatura arranque-operación horno actual	80
Tabla 4. Datos de placa del generador	83
Tabla 5 Dimensiones del generador (Modelo referencia).....	84
Tabla 6. Propiedades de gas ideal del aire	87
Tabla 7. Propiedades del aire a 1 atm	92
Tabla 8. Dimensiones del horno.....	111
Tabla 9. Costos del Proyecto.....	119
Tabla 10. Costos de Operación antiguo horno	120
Tabla 11. Costos de operación del horno nuevo	120
Tabla 12. Flujos de Caja.....	121
Tabla 13. Resultados del Análisis Financiero	121

Dedicatoria

Este proyecto no fuera posible sin el apoyo de mi familia, mis padres y hermanos que representan todo en mi vida, son mi más grande motivación y el cual, les dedico este trabajo, donde siempre me alentaron para darlo todo y esforzarme a seguir por el buen camino para culminar mis estudios. Me demostraron los valores para conseguir una vida de éxitos, son mi mayor alegría y en esta nueva etapa como profesional, todas las metas y logros que me proponga se verán representados todo el esfuerzo dado por mis padres para forjar un camino de bien para que sus hijos siguieran adelante.

Agradecimientos

Al más grande y poderoso, Dios, quién me dio las fuerzas para luchar y seguir adelante, cuando el camino se hacía oscuro y pequeño y no podía seguir más, le doy infinitas gracias a Dios por los éxitos conseguidos en mi etapa universitaria, por siempre darme la sabiduría y voluntad para culminar mis estudios.

Les doy infinitas gracias a mis padres Orlando Gómez Paniagua y Clary Valverde Paniagua, a quienes les debo todo porque siempre han estado ahí motivándome para dar lo mejor de mí, donde siempre forjaron con amor el camino del éxito de sus hijos. Gracias a mis hermanos por sus buenos consejos y demostrarme que los sueños se pueden cumplir, siempre y cuando teniendo a Dios en su corazón y esforzándose para culminar de excelente manera.

Le doy gracias al profesor Ing. Gilberth Mora Jiménez, que, con su simpatía por la educación, me compartió parte de su conocimiento para elaborar mi proyecto.

Le doy gracias a los dueños y gerentes de Electromotores de Costa Rica y compañeros de trabajo, por contribuir en mi conocimiento y permitirme elaborar mi proyecto.

Capítulo I

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Para el presente proyecto se analiza la situación de la empresa de Electromotores, así como la necesidad de construir un horno para cremar barnices y aislamientos, para mayor facilidad de extracción del alambre en el proceso de rebobinado, por tanto, para dicha investigación se pretende realizar un diseño que cumpla con los requerimientos necesarios que demanda la producción de la compañía.

El estudio abarcará todas las variables y cálculos importantes de transferencia de calor suficientes para inducir una temperatura constante para el debilitamiento del barniz y cobre del motor, y que el sistema de aislamiento térmico sea el indicado para que soporte estas temperaturas y evitar pérdidas de calor, tomando en cuenta el estudio y elección de los materiales adecuados para la elaboración del horno, por otro lado se evaluará las variables que define la normativa ANSI EASA AR100 para estos procesos en específico, así también cómo afectaría los cambios de temperatura o que el horno sobrepase 370 °C en el aislamiento interlaminar del núcleo del motor.

Se pretende, además, mejorar el tiempo de entrega de los trabajos, por medio de la reducción de los tiempos que demanda este proceso, se implementará un diseño que opere de manera eficiente y que tenga equipos que faciliten el trabajo para los técnicos, como por ejemplo se desea añadir en el diseño un sistema mecánico (carretilla) que soporte los esfuerzos ejercidos por los motores, para el ingreso de las máquinas dentro y fuera del horno, para esto se realizará un cálculo mecánico con todas las fuerzas que demanden estos trabajos.

Uno de los mayores problemas que presenta la empresa es la falta de controles automáticos para los distintos hornos, por tanto, se estudiará la importancia de mantener un monitoreo constante en la máquina durante el proceso de quemado por medio de un sistema de control que determine la temperatura interna y el tiempo de operación del horno, como realizar la configuración y programación de este sistema. La propuesta que se plantea en este documento como proyecto de graduación, permitirá a la empresa Electromotores de Costa Rica contar con el diseño de un horno de quemado de mayor alcance que les beneficie y

agilice en la producción y de esta forma eliminar la problemática de capacidad que actualmente presenta el horno del taller.

Justificación

Hace 25 años al señor Aníbal Rodríguez se le presentó la idea de crear un taller para reparar motores y máquinas eléctricas de carácter industrial. A partir de su ideal, se dio nacimiento al taller Electromotores de Costa Rica en la ciudad de Grecia, Alajuela, el cual, desde su fundación, pretendía posicionarse en el campo industrial.

Con el crecimiento exponencial de demanda nacional, se tomó la decisión de trasladar la empresa a una zona más industrial, donde surgió la posibilidad de trasladarse al Coyol de Alajuela, donde se edificó, inicialmente, una nave de trabajo, ofreciéndole un panorama aún mejor, pues desde entonces se experimentó un notable crecimiento industrial, pero sin duda un evento de muchísima importancia en su historia ha sido la incorporación laboral del Ing. Rolando Rodríguez, hijo de Aníbal Rodríguez, quien ha sido el responsable de que la empresa alcance grandes avances industriales, gracias a su profesionalismo y capacidad de razonamiento, factores responsables de que Electromotores se perfilara como una empresa altamente competitiva, de gran solidez y con altas expectativas de progreso. Los años han permitido a la empresa crecer, con el profesionalismo del personal que labora se ha logrado que esta compañía amplíe sus alcances de trabajo. Los procedimientos de labores han sido coordinados, de manera tal que el taller está certificado como miembro de la organización EASA de Estados Unidos; asimismo, se ha certificado con otras entidades que ubican el taller muy en alto en el ámbito profesional.

Con la alta demanda de producción y la poca capacidad de los equipos se ha hecho ver la necesidad de adquirir nuevos equipos, sumado al conflicto que presenta la empresa en cuanto al proceso de extracción de alambre con el actual horno de quemado que se encuentra en el taller. Durante el proceso se ha evidenciado una serie debilidades en el laminado del núcleo de los motores después de ejecutarse este trabajo, la única manera de medir un proceso es cuantificarlo, por ende, se ejecuta un análisis de valores, con pruebas que evidencian un exceso de calentamiento en el núcleo estático. Dado este problema se propone un diseño de un horno con control de temperatura y, aparte, mayor capacidad para la producción, para la mejora en cuanto al proceso.

Planteamiento del problema

¿Cuál es el diseño electromecánico óptimo del horno de quemado para el proceso de extracción de alambre en motores por rebobinar, mediante el análisis de las buenas prácticas de ingeniería, para lograr la mejor relación costo-beneficio en la empresa Electromotores de Costa Rica, ubicada en Coyol de Alajuela?

Limitaciones

El proyecto contempla una serie de limitantes en cuanto a su ejecución, lo cual se describen a continuación: el espacio para el diseño del horno es muy reducido, la empresa se encuentra operando y la máquina que se pretende sustituir es un equipo crítico para el proceso de rebobinado de motores, por tanto, la disponibilidad para tomar medidas se complica bastante, no hay ninguna estandarización de cómo debe ser un diseño adecuado para este proceso ni la existencia de manuales, además durante este proyecto se va presentar la problemática del presupuesto que maneja la empresa para elaborar el diseño y además los materiales que se requiere contemplar.

Proyecciones

A la empresa Electromotores se le entregará una memoria, con toda la documentación del proyecto, que incluye planos del diseño del horno de quemado, diagrama unifilar del sistema de control, tipos de cables, ficha técnicas y cálculos de resistencia mecánica en las vigas. Este proyecto no contempla la construcción del horno, pero el diseño se va a efectuar pensando en que se va duplicar la cantidad de motores de acuerdo con la demanda a futuro, por tanto, en el diseño se va prever que tenga el doble de la capacidad del actual.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el diseño electromecánico óptimo del horno de quemado para el proceso de extracción de alambre en motores por rebobinar, mediante el análisis de las buenas prácticas de ingeniería y así, lograr la mejor relación costo-beneficio en la empresa Electromotores de Costa Rica, ubicada en Coyol de Alajuela.

Objetivos específicos

- A. Definir los requerimientos del proceso mediante el estudio de las necesidades actuales y futuras de la empresa respecto a la demanda de producción, los cálculos de calentamiento y pérdidas calor en el horno, para así establecer los parámetros de diseño del horno, seleccionamiento de equipos y estimación de consumos de combustible.
- B. Establecer el tipo de aislamiento térmico por utilizar, así como su dimensionamiento mediante los cálculos de resistencia térmica que ofrece cada uno los aislamientos disponibles en el mercado, de acuerdo con el estudio de sus fichas técnicas, para lograr un diseño óptimo del horno y optimizar el consumo de combustible.
- C. Determinar la lógica de control que llevará a cabo el quemador, mediante la implementación de un sistema de monitoreo de la temperatura que incluya sensores termopares o termocuplas, con el que se llevará a cabo el proceso de quemado, para asegurar con el cumplimiento de los requerimientos del proceso, tales como las variables térmicas de temperatura, cercanas a los 300 °C y los tiempos que tarda este proceso para las diferentes dimensiones de motores.
- D. Diseñar un sistema mecánico de carretilla mediante los cálculos mecánicos de esfuerzos para que soporte y permita el ingreso de máquinas dentro y fuera del horno.
- E. Estipular la inversión necesaria, mediante el análisis financiero de costos, para garantizar un retorno adecuado de la inversión del proyecto.

Antecedentes

Antecedente histórico

Los primeros hornos de la historia datan de hace más de 5000 años, en Egipto y Babilonia, consistían en una especie de tapa de adobe en forma de campana que, por primera vez, permitía que los alimentos se cocinasen tanto por arriba como por abajo. En otras culturas de la antigüedad se usaban hornos abiertos, para lo que se hacía un hueco o zanja que se forraba de piedras y luego se calentaban con fuego antes de colocar los alimentos, que se cubrían con vegetación.

Al pasar de los años los hornos fueron adquiriendo mejores métodos de construcción para la transferencia de calor, pasando de barro y leña, a gas natural, con los avances en la utilización de este combustible que mejoraba de gran manera el tiempo de cocción, luego con los avances de la tecnología y la electricidad fueron apareciendo los hornos eléctricos, de microondas, de inducción, solares, resistencias, etc.

Con la industrialización fueron adquiridos e inventados hornos más grandes, con la importancia de generar calor y mantener la energía en un compartimiento encerrado, fueron utilizados en diferentes procesos industriales.

En la industria eléctrica, específicamente en los talleres de reparación de motores eléctricos, se presentaba la inquietud de que en el proceso de limpieza y extracción de motores era un procedimiento lento y tedioso. Fueron utilizados hornos para cocción y cremación de los aislamientos y barnices que poseían los motores dañados, para mayor facilidad de limpieza en los estatores, pero en la construcción de estos hornos, los motores fueron presentando problemas por excesivo calor aplicado al núcleo, donde los gases de combustión del quemador y el barniz epóxico hacían arder el núcleo, produciendo pérdidas.

Con el avance de la tecnología, algunas empresas fabricaron hornos de quemado con avanzado control automático, que manipulara variables como temperaturas, combustible, etc., que mejoraban dichos procesos, eliminando la problemática presentada en las máquinas.

Título: Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición utilizando gas natural.

Autor: Sebastián Andrés Trujillo Roldán.

Institución: Universidad San Francisco de Quito.

Año: 2005.

La tesis de grado de “Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición utilizando gas natural” fue desarrollado por el ingeniero Sebastián Andrés Trujillo Roldán, quien elaboró un prototipo de horno para la fundición de metales no ferrosos, por medio de un hogar y crisol calentados mediante un sistema de combustión con gas, utilizando los conocimientos adquiridos en la formación de la carrera de Ingeniería Mecánica en campos de diseño y transferencia de calor. Los parámetros de construcción fueron orientados a obtener un prototipo que brindara las facilidades de fundición conjuntamente con las seguridades operativas.

El diseño del prototipo de horno de crisol fue basado en un horno casero creado por David J. Gingery, el cual basa su diseño en un horno económico para fundir metales no ferrosos, de manera artesanal, fácil y eficaz. Este diseño está conformado por un horno de crisol, alimentando su combustión por medio de un quemador a gas natural, de bajo costo y fácil abastecimiento de nuevo material.

Los cálculos térmicos de transferencia de calor utilizados en este proyecto por el ingeniero Sebastián Trujillo se basan sobre sistemas cilíndricos y esféricos que experimentan diferencias de temperatura solamente en las direcciones radiales, se realizó cambiando un sistema unidimensional para calcular el espesor de las paredes del horno y su temperatura teórica a lo largo del revestimiento. Simplificó el prototipo con base en su diseño original, y se consideró al horno como un cilindro hueco, compuesto por varios materiales en contacto (capas) y con condiciones de frontera convectivas.

La bóveda o cámara de combustión fue diseñada por medio de una mezcla casera de material refractario compuesto en su gran porcentaje de arena de sílice y recubierta por un armazón metálico de acero para dar la forma al horno.

Respecto a las pérdidas de calor, en el caso del ladrillo refractario se redujo las pérdidas un 35% y en el espesor de pared que se utilizó un aislante térmico manta Durablanket con reducción de pérdida de calor, un 30%.

Este proyecto, a diferencia del que se describe en este documento, contempla la construcción del horno, donde es importante analizar cada detalle en cuanto a las hipótesis y cálculos realizados en la investigación, donde se van a observar los parámetros que se cumplen o no en la operación del horno, dada la selección de los materiales y tipos de aislamientos utilizados en el horno, se analiza la transferencia de calor calculada y la selección del quemador que como factor importante es de bajo costo, además las pérdidas de calor y cuales materiales reducen a mayor porcentaje, este fenómeno, esto da una perspectiva amplia para la selección de los componentes más indicados en la industria térmica.

Este horno alcanza temperaturas más elevadas que el horno del presente proyecto y utiliza un venterol para generar una mejor combustión en la bóveda del horno, puesto que utilizando únicamente la combustión del gas natural no se tendrían las condiciones deseadas para generar el funcionamiento del prototipo a temperaturas mayores de 900 °C, por este motivo es justificada la contemplación de un sistema similar, aparte de que el horno funciona como una cámara cerrada y el venterol es el elemento que suministra el oxígeno para mantener la combustión.

Título: Simulación de la estructura de llama en un quemador de premezcla parcial metano/aire en flujo concéntrico.

Autor: Julio Rendón, Francisco Cadavid, Andrés Amell.

Institución: Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, Universidad de Antioquia.

Año: 2008.

En este trabajo se simuló el efecto del dosado relativo¹ sobre la estructura de una llama laminar de premezcla parcial metano/aire, en un quemador atmosférico de flujo concéntrico. Basados en el estudio de los 3 dosado relativos ($\Phi = 1,6$, $\Phi = 2,0$, $\Phi = 3,5$), donde mantuvieron constante la potencia térmica. Para la simulación utilizaron FLUENT V. 6.2. Compararon los perfiles radiales de temperatura y velocidad obtenidos con los reportados en la literatura y estudiaron la influencia de la estructura de la malla en la solución.

Las llamas de premezcla parcial son de uso extendido como fuente de calor en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales, pues permiten reducir los volúmenes de las cámaras de combustión, alcanzar temperaturas más altas que las obtenidas con llamas de difusión y evitar la formación de hollín sobre las paredes, además, los quemadores se caracterizan por ser de fácil construcción y por tener bajos costos de operación. En este tipo de quemadores la premezcla combustible-aire se forma por la inducción de aire debido al intercambio de momentum entre el combustible descargado y el aire atmosférico. Este tipo de quemadores permiten variar la cantidad de aire inducido para obtener diferentes dosados relativos.

En una llama laminar de premezcla parcial se distinguen tres zonas, un cono interior, un frente de llama o cono azul y un cono exterior. En el cono interior se precalienta la mezcla. En el frente de llama ocurre una oxidación parcial del combustible con el aire de la premezcla

¹ *Dosado relativo: definido como la relación existente entre la (masa de aire primario)/(masa de combustible) estequiométrica sobre la (masa de aire primario)/(masa de combustible) actual.*

(combustión de premezcla) y en el cono exterior se oxida el combustible restante por la difusión del oxígeno presente en la atmósfera (combustión de difusión).

El objetivo del trabajo fue establecer una metodología de cálculo para validar el proceso de simulación de llamas de premezcla parcial metano/aire, donde se empleó el *software* comercial FLUENT v. 6.2, a partir de la comparación de los resultados numéricos. En el trabajo se discuten aspectos como la geometría del dominio, la estructura del mallado y los modelos numéricos utilizados en la simulación. Se comparan los perfiles numéricos con los experimentales de temperatura y velocidad, en diferentes posiciones de la llama y se describe el efecto del dosado relativo sobre la estructura de la llama. A partir de la validación se busca iniciar una cultura de la simulación de la combustión en el medio, que permita hacer más frecuente el uso de esta herramienta en el diseño de sistemas de combustión.

De los perfiles experimentales se observa que a mayor dosado relativo, menor temperatura máxima en la llama, esto puede explicarse por la combustión incompleta que se favorece a medida que el dosado relativo aumenta. En el punto de comparación los resultados numéricos no revelan este efecto del dosado relativo sobre la temperatura máxima. Sin embargo, se observa que la forma de los perfiles numéricos cambia conforme aumenta el dosado relativo. Para $\Phi = 1,6$, se observan dos zonas con aumento de temperatura, mientras para $\Phi = 3,5$ solo se observa una zona de aumento con un ligero cambio en la pendiente cerca a la máxima temperatura. Una tendencia similar presentan los perfiles experimentales, lo cual se asocia a la transición en el proceso de combustión de premezcla a difusión, conforme aumenta el dosado relativo.

Esta investigación demuestra la importancia que se debe tener en la manipulación de la llama cuando se da la combustión, se hace mención de las partes de la llama laminar de premezcla parcial, aparte demuestra por medio de una simulación en *software* el análisis de variables de temperatura y velocidad. El proyecto amplía el análisis de la selección del quemador más adecuado para el horno, donde es importante considerar variables que benefician el diseño, como reducir los volúmenes de las cámaras de combustión, alcanzar temperaturas más altas, evitar la formación de hollín sobre las paredes, además, la importancia de que los quemadores tengan bajos costos de operación.

Título: Sistema de Automatización para el Proceso de Fundición de Acero en un Horno Industrial.

Autor: Carlos Alberto Bolaños Jiménez.

Institución: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Año: 2010.

En este proyecto el ingeniero Carlos Alberto Bolaños Jiménez realizó una investigación en el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), específicamente en la subdivisión de Maquinaria Equipo y Talleres (MET) ubicado en Cebadilla de Turrúcares en Alajuela. La empresa construyó un horno de fundición que permite el aprovechamiento de más de 10.000 kilogramos de acero que almacena en las bodegas de todo el país. Para el diseño de este proyecto el ingeniero Alberto Bolaños hizo un estudio del único horno en funcionamiento en el país.

Este cuenta con tres electrodos de grafito para fundir la chatarra, cada electrodo debe consumir 1500 amperios y oscilaciones desde 0 hasta 3000 amperios para que se establezcan los arcos, pero por características del arco eléctrico y la irregularidad de la superficie, los electrodos consumen algunas veces los 3000 amperios de forma continua durante períodos no aptos (mayores de 2 segundos). Esta función la llevan a cabo los operadores de forma manual mediante contrapesas. Si el fenómeno sobrepasa el tiempo mencionado produce movimientos anómalos en el bobinado del transformador, lo que causa la destrucción de este.

Ante la situación, el operador cuenta con una sola opción y es elevar manualmente el electrodo hasta visualizar que la corriente se estabilice dentro del funcionamiento normal, pero esto afronta un problema que, debido a fallos humanos por la inexactitud en los movimientos, se producen corrientes muy altas de forma continua, que a su vez conlleva a la destrucción de muchos de los componentes del sistema. Partiendo de esta problemática, se diseñó y probó un sistema hidráulico y uno de control automático que gobiernan el movimiento de los electrodos durante el proceso de fundición, con el fin de evitar la destrucción de los dispositivos. El sistema toma decisiones alrededor de la variable corriente.

El ingeniero Bolaños analizó detalladamente el proceso, determinó los requerimientos y mejoras en cuanto al porcentaje de error encontrado en la operación. La solución que

desarrolló fue diseñar y probar un sistema de control automático que manipulara el movimiento de los tres electrodos que conforman el horno de fundición. El sistema está constituido por una etapa de recolección de datos de la variable por controlar (corriente), por una interfaz de monitorización y configuración del sistema, por una unidad lógica programable que procesa la información recolectada para la toma de decisiones y un sistema hidráulico que es el encargado de interactuar con los electrodos. Además, implementó un control manual para el accionamiento de los electrodos como una opción de emergencia.

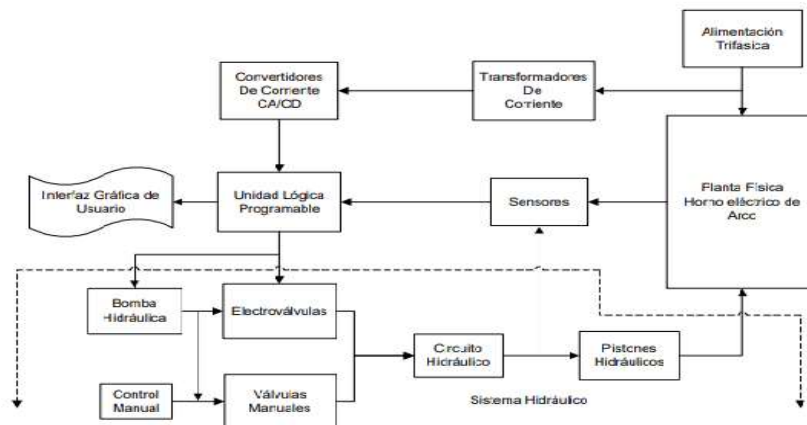


Ilustración 1 Automatización del horno eléctrico de arco

Fuente: Carlos Alberto Bolaños Jiménez, 2010.

Durante el análisis y la recolección de datos ejecutada por el ingeniero Bolaños, se observó importantes errores de producción al manipular máquinas con variables tan precisas y como solución a este problema implementó todo un sistema de control.

Se observa la problemática presente en este proyecto y analizando la perspectiva de Electromotores, ellos cuentan con el horno de quemado que es operado por personal técnico pero toda la ejecución del proceso es realizado de manera manual e inclusive el monitoreo de la temperatura, en estos casos las variables por medir son datos que deben ser muy precisos para que no influyan a un error en producción, este sirve como guía para realizar un estudio de todo un sistema de control con PLC (Controlador Lógico Programable) de hornos de gran tamaño como el mencionado anteriormente, que es programado en *software* Automation Studio, da idea de cómo realizar un mando de control de un horno de alta potencia, además

abre una investigación guía sobre lenguaje de programación Siemens, para debatir cuáles son los componentes más adecuados para el horno y que se ajusten a las necesidades del proceso.

Título: Sistema Regulador de Temperatura, sintonización de parámetros PID para disminución de consumo de combustible en un horno de recocido de alambre.

Autor: Daniel Hernán Bautista Mantilla.

Institución: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Año: 2007.

El proyecto desarrollado se basó en el estudio del control actual de temperatura de un horno de tratamiento térmico de alambre. Este horno se utiliza para configurar el temple del alambre. El principal problema que se le presentó al ingeniero Daniel Bautista es el alto consumo de combustible y la falta de una estandarización para el ajuste adecuado que permita obtener la mejor combustión con las condiciones actuales de control.

En la etapa de recocido es donde se centra el proyecto, que consiste en un horno con tres cámaras contiguas de calentamiento. El horno tiene dos ventanas, una para la entrada y salida de alambre, el cual entra a una velocidad, y que junto con la temperatura determinan el temple del alambre.

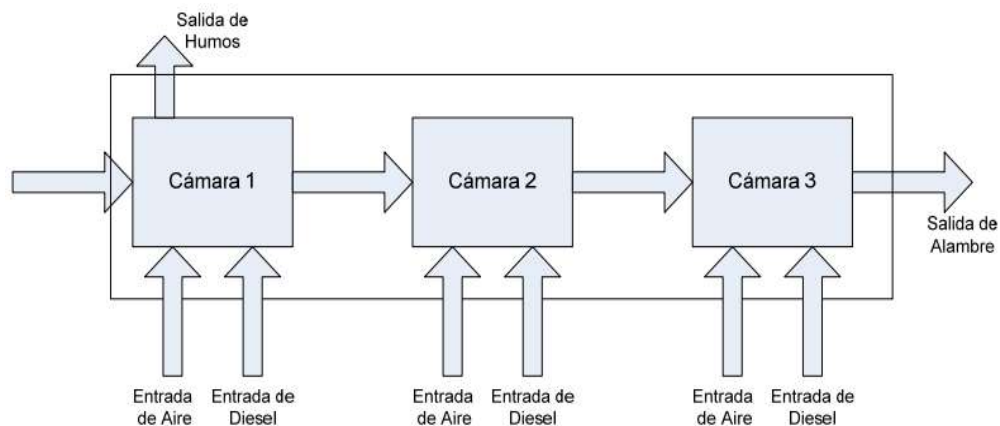


Ilustración 2. Diagrama de bloques del proceso de calentamiento del alambre

Fuente: Daniel Hernán Bautista Mantilla, 2007.

La solución consistió en proponer una mejora en el sistema que permitiera disminuir el alto consumo de combustible en este proceso (diésel), que era una de las principales consecuencias del control ineficiente. Por otro lado, los mecanismos de control ON-OFF

implementados eran demasiado ineficientes para este tipo de proceso. Para mejora de esta problemática el combustible y el aire debían ser adicionadas al horno en las proporciones óptimas para generar la mejor combustión.

El ingeniero Bautista comienza con el estudio y análisis de cuáles sistemas de control serían los indicados para este quemador, opta por utilizar el controlador digital E5CN con el que cuenta la empresa. La salida del controlador proporciona una señal PWM (Modulación por Ancho de Pulsos), que abre y cierra el Modutrol no necesariamente a su máxima apertura, proporcionado al horno una energía promedio que puede ser comparada con la señal de salida de un controlador con salida proporcional.

Conforme avanzaba el proyecto se le fueron presentando inquietudes, por el cual analizó otras opciones y cuestiones de procesos, debido a que la temperatura no se puede variar demasiado ya que esto implica deterioro en el temple del alambre. Además, la temperatura de operación del horno requiere que sea lo más constante posible.

Unos de los controladores que analizó que eran más viables y seguros para el proyecto fue el PID, cuyo modo de operación le permitió mantener una temperatura constante en la cámara, prácticamente libre de oscilaciones cuando las perturbaciones son mínimas, además permitió obtener resultados satisfactorios en cuanto a control de temperatura.

Este proyecto presenta una investigación a profundidad que también hace referencia a la importancia de optar por un sistema de control, dada la problemática que presentaban del excesivo combustible en dicho proceso. A situaciones similares a la investigación que se está realizando en la empresa de Electromotores, presentan panoramas equivalentes, como importancia del ahorro de combustible e implementación de los componentes más adecuados, el ingeniero investigó acerca de tres tipos de controladores y observó las variables del proceso y la limitación de algunos de estos, abriendo un panorama más extenso en cuanto a la investigación de equipos como gobernadores del horno industrial.

Título: Diseño de eficiencia energética, para el aprovechamiento de calor residual y disminución de huella carbono, en planta PEPSI.

Autor: José Eduardo Víquez Hernández.

Institución: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Año: 2015.

Este proyecto fue elaborado por el ingeniero José Eduardo Víquez Hernández en la empresa PEPSI, ubicada en Ulloa de Heredia. El cambio climático es un tema de vital importancia para las empresas y de esta forma buscan aportar mediante la reducción de su propia huella carbono. La planta Pepsi no se queda atrás y por esta razón cuenta con tres fases para lograr el objetivo, las cuales son: Medir, Reducir y Compensar.

El proyecto busca reducir la mayor cantidad de combustible búnker consumido por la empresa. Actualmente cuenta con una caldera pirotubular de 200 BHP, la cual utiliza búnker para la generación de vapor. Su uso está apegado estrictamente al movimiento de la producción, ya que en algunas ocasiones trabaja de forma continua y otras de forma muy discreta. Su uso intermitente provoca que el tanque de condensados se encuentre a una temperatura muy baja y esto se traduce en gastos innecesarios en consumo de búnker. Se realizó una inspección en la caldera para anotar el rango de temperaturas que maneja el condensado.

Se determinó que cuando la producción es baja su temperatura ronda los 30°C y cuando es alta ronda los 70°. Esto provoca el consumo innecesario de combustible y aumenta las emisiones de CO₂ producidas por la empresa. Por estas razones, el mayor problema encontrado en la empresa es de carácter energético, específicamente en el consumo excesivo de combustible búnker en la caldera.

Disminuir este consumo no solo ayuda económicamente a la empresa, sino que se reduce significativamente la huella carbono de la planta. Mediante el diseño de un sistema de recuperación de calor se aprovecha la mayor cantidad de energía de los sistemas de aire comprimido y del sistema de refrigeración por amoníaco. Además, se propuso la utilización de colectores solares para contar con un respaldo de energía limpia. En cuanto a los sistemas que se van a intervenir, está el saneamiento ALCIP, la lavadora de envases de vidrio San

Martin y el tanque de condensados de la caldera. El equipo con mayor consumo de energía es la lavadora, por lo que su precalentamiento genera un ahorro significativo. El diseño cuenta con una serie de intercambiadores de calor que extraen gran cantidad de energía de los sistemas y mediante un circuito cerrado de agua caliente se direcciona hacia la lavadora, y el tanque de condensados.

Es de suma importancia tomar en cuenta que como proyecto a diseñar de un horno industrial, producirá emisiones CO₂ al ambiente, por tanto considerar el ahorro de combustible y otros métodos que funcionen en la buena relación con el medio ambiente, para así disminuir los gases de efecto invernadero producidos por el horno. Este documento expone el estudio que se utilizará como referencia en la investigación del diseño para que contemple tener menor impacto ambiental respecto a la reducción de contaminantes a la atmósfera, y forje la motivación en la empresa de llegar a optar algún día por la huella de carbono neutral, dada la importancia del actual tema universal del cambio climático.

Capítulo II

CAPÍTULO 11: MARCO TEÓRICO

Máquinas eléctricas rotativas

En términos generales, una máquina rotativa se compone de dos partes, una fija que se denomina estator y que tiene forma cilíndrica y en la cavidad de esta se coloca el rotor, que como su nombre lo indica es la parte giratoria de la máquina. El espacio de aire que separa el estator del rotor, se conoce como entrehierro, siendo el campo magnético existente en este el que constituye el medio de acoplamiento entre los sistemas eléctricos y mecánicos (Mora, 2003, s.p.).

Normalmente, tanto en el estator como en el rotor existen devanados hechos con conductores de cobre, por lo que circulan corrientes suministradas o cedidas a un circuito exterior que constituye el sistema eléctrico, donde el devanado que tiene la misión de crear flujo en el entrehierro se denomina inductor y el bobinado recibe el flujo del primero y se inducen en él corrientes que se cierran por el circuito exterior, esto se le conoce como inducido (Mora, 2003, s.p.).

Máquinas eléctricas asíncronas

El funcionamiento del motor asíncrono de inducción se basa en la acción del flujo giratorio generado en el circuito estatórico sobre las corrientes inducidas por dicho flujo en el circuito del rotor. El flujo giratorio creado por el bobinado del estator corta los conductores del rotor, por lo que se generan fuerzas electromotrices inducidas. Suponiendo cerrado el bobinado rotórico, es de entender que sus conductores serán recorridos por corrientes eléctricas. La acción mutua del flujo giratorio y las corrientes existentes en los conductores del rotor originan fuerzas electrodinámicas sobre los propios conductores que arrastran al rotor haciéndolo girar (Mc Graw Hill Education, s.f. p. 290).

La velocidad de rotación del rotor en los motores asíncronos de inducción es siempre inferior a la velocidad de sincronismo (velocidad del flujo giratorio). Para que se genere una fuerza electromotriz en los conductores del rotor ha de existir un movimiento relativo entre los conductores y el flujo giratorio. A la diferencia entre la velocidad del flujo giratorio y del rotor se le llama deslizamiento (Mc Graw Hill Education, s.f., p. 290).

Máquina eléctrica sincrónica

Consiste en un inductor de corriente continua que se denomina devanado campo, que suele colocarse en el rotor, alimentado por medio de anillos.

El inductor normalmente es trifásico y suele colocarse en el estator. Cuando funciona como generador se introduce energía mecánica por el eje y al aplicar corriente directa al inductor, se obtiene el inducido una fuerza electromotriz de frecuencia que se aplica a la carga. La corriente necesaria para alimentar el inductor se obtiene de un pequeño conjunto de excitación, que está situado en el mismo eje de la máquina (Mc Graw Hill Education, s.f., p.146)

Núcleo estatórico

Los núcleos se construyen por medio de materiales de alta permeabilidad (habilidad de conducir flujo magnético), su valor es del orden de 2000-6000 veces la capacidad del aire, por lo que las líneas de campo definitivamente toman el camino de los núcleos. Se hacen láminas de hierro magnético, apiladas entre sí, pero separadas eléctricamente unas de otras por medio de un aislante interlaminar, de tipo inorgánico u orgánico, para minimizar un fenómeno indeseable, conocido como Corrientes Parásitas (Núñez, 2013)

Aislamiento interlaminar

El aislamiento interlaminar se consigue formando una capa de óxido natural sobre la superficie de la chapa magnética laminada plana o aplicando un revestimiento superficial.

Los revestimientos o acabados de aislamiento pueden clasificarse ampliamente en orgánicos e inorgánicos.

- **Aislamiento Orgánico:** consiste en generar esmaltes o barnices que se aplican a la superficie del acero para proporcionar una resistencia interlaminar. Estos revestimientos también pueden mejorar el punzonado² del acero utilizado para chapas

² *Punzonado: es una operación mecánica de alta precisión que consiste en perforaciones de una lámina metálica por medio de un corte o deformación sin desprendimiento de viruta.*

que no requieren un recocido liberador de tensiones. Este aislamiento no puede recibir un recocido de distensión sin perjudicar el valor aislante de la capa, sin embargo, resiste temperaturas de funcionamiento normales.

- **Aislamiento Inorgánico:** consta de una película parecida al vidrio que se forma durante el recocido en hidrógeno, a alta temperatura del acero al silicio de grano orientado, como resultado de la reacción entre un revestimiento de MgO que se aplica y los silicatos en la superficie del acero. Este aislamiento está proyectado para núcleos refrigerados por aire o sumergidos en aceite. Posee una resistencia entre chapas suficiente para los núcleos devanados de cinta estrecha como los utilizados en los núcleos de transformadores de distribución. (Donald G. Fink, 1981)

Corrientes parásitas

Conocidas también como corriente de Foucault, de torbellino, o Eddy currents en inglés. Fue un descubrimiento del físico francés León Foucault en 1851. Se producen en metales (conductores y núcleos magnéticos) cuando son atravesados por un campo magnético variable. En los núcleos generan tensiones inducidas que producen corrientes dentro de este, lo que genera pérdida de energía a través del efecto Joule (Calor), que ocurren en el borde de cada laminación y varían según el cuadrado de la frecuencia. Esa relación cuadrada y el hecho de que están controlados por el aislamiento interlaminar los hace críticos para la eficiencia de los motores.

Mientras el aislamiento interlaminar sea viable, estas pérdidas están controladas.

Los fabricantes siguieron tres estrategias para minimizarlas, ya que no es posible eliminarlas, estas son: La primera es fabricar el núcleo laminado, para aumentar la resistencia eléctrica; además, se contamina con silicio para aumentar aún más su resistencia; y, finalmente, se lleva a cabo un tratamiento térmico para controlar la presencia de carbono y bajar de nuevo la resistencia eléctrica. (Núñez, 2013)

Termodinámica

La termodinámica se puede definir como la ciencia de la energía. Aunque todo el mundo tiene la idea de lo que es energía es difícil definirla de forma precisa [...]

El cambio en el contenido energético de un cuerpo o de cualquier otro sistema es igual a la diferencia entre la entrada y la salida de energía, y el balance de esta se expresa como:

$$E \text{ entrada} - E \text{ salida} = \Delta E.$$

Ecuación 1

La primera ley de la termodinámica es simplemente una expresión del principio de conservación de la energía y sostienen que la energía es una propiedad de la termodinámica. La segunda ley de la termodinámica afirma que la energía tiene calidad, así como cantidad, y los procesos reales ocurren hacia donde disminuyen la calidad de la energía (Cegel, 2012, p. 02).

Equilibrio térmico

Toda sustancia por encima de los 0° Kelvin (-273.15 °C) emite calor. Si dos sustancias en contacto se encuentran a diferente temperatura, una de ellas emitirá más calor y calentará a la más fría. El equilibrio térmico se alcanza, cuando ambas emiten, y reciben la misma cantidad de calor, lo que iguala su temperatura.

Entalpía

La entalpía es una magnitud de termodinámica simbolizada con la letra H, la variación de entalpía expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico; o, lo que es lo mismo, la cantidad de energía que tal sistema puede intercambiar con su entorno. Usualmente, la entalpía se mide, dentro del Sistema Internacional de Unidades, en julios.

Transferencia de calor

En física, la transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, como resultado de la ley cero de la termodinámica. Cuando un cuerpo, por ejemplo, un objeto sólido o un fluido, está a una temperatura diferente de la de su entorno u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico. Cuando existe

una diferencia de temperatura entre dos objetos en proximidad uno del otro, la transferencia de calor no puede ser detenida, solo puede hacerse más lenta. La transferencia de calor clásica ocurre, solamente, a través de los procesos de conducción, convección, radiación o cualquier otra combinación de ellos.

Conducción

Según lo estipulado por Yunes A. Cengel respecto a este concepto, se tipifica que: “Transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases” (2007, p. 19).

Radiación térmica

Se denomina radiación térmica o radiación calorífica a la emitida por un cuerpo debido a su temperatura. Todos los cuerpos con temperatura superior a 0 K emiten radiación electromagnética, y su intensidad depende de la temperatura y de la longitud de onda considerada. En lo que respecta a la transferencia de calor, la radiación relevante es la comprendida en el rango de longitudes de onda de $0,1\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$, abarcando, por tanto, parte de la región ultravioleta, la visible y la infrarroja del espectro electromagnético.

Convección

La convección se lleva a cabo porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. Además, se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Estos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, disminuyen su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. Por ende, la convección es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Se incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico- convección mecánica o asistida. En la

transferencia de calor libre o natural, en el que un fluido es más caliente o más frío y en contacto con una superficie sólida, causa una circulación debido a las diferencias de densidades que resultan del gradiente de temperaturas en el fluido (Cengel, 2007, cfr. p. 26).

Conductividad térmica

La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un *aislante* (Cengel, 2009, p. 20).

Aislamientos térmicos

Según el autor Carlos Vargas en el documento que se ubica en el sitio web Academia.Edu, se demuestra con respecto a los aislamientos térmicos que:

La principal función de un aislamiento térmico es proteger cualquier medio o superficie de la temperatura expuesta, sea alta o baja, por ejemplo, en las superficies calientes, como la pared de un horno, o las frías, como la pared de un refrigerador, a través de materiales de baja conductividad térmica (k). El objetivo de un aislamiento térmico es minimizar los flujos de calor, debido a: problemas técnicos (seguridad, evitar condensación) y problemas económicos (ahorro de energía), donde busca un estado confortable mantener la temperatura dentro de un proceso.

Tipos de aislamientos térmicos

Fibrosos: (lana mineral, fibra de vidrio, fibra cerámica).

Materiales procesados a partir de la fusión de materiales a base de sílice, alúmina, escoria o roca basáltica, convertidos en fibras por proceso de soplado o centrifugado, para ser distribuidas de modo multidireccional.

Celulares: (vidrio espumado, poliestireno expandido, elastómeros, espuma fenólica, polisocianurato).

Compuestos por pequeñísimas celdas individuales separadas entre sí. El material celular puede ser vidrio o plástico espumado.

Granulados: (vermiculita expandida, silicato de calcio, perlita expandida, tierra diatomácea).

Compuestos pro-nódulos que contienen espacios vacíos. No son considerados como celulares debido a que el gas (aire) puede transitar entre los espacios individuales. Son combinados con fibras de refuerzo con lo que se consigue rigidez, estructura y forma.

Los materiales aislantes pueden tener diferentes formas de presentación como rígida, flexible, colchonetas, cementos monolíticos, espuma, etc. Contienen pequeñas células

que retardan el flujo debido a que poco calor es transferido por convección de un lado de la célula al otro. (Vargas, s/f., pp. 5- 7).

Hornos industriales de quemado

Hornos de quemado

También conocidos como hornos de limpieza térmica, estos hornos específicos para procesos de rebobinado de motores son fabricados por muchas marcas en Estados Unidos, una de estas son los hornos de Steelman, que poseen tecnologías patentadas como calentamiento de arriba hacia abajo, control de la tasa de cambio y control automático del proceso. Los hornos de quemado son seguros, confiables y rápidos en la limpieza con mínima asistencia del operador.

Todos estos hornos de quemado incluyen difusor de riesgo, utilizada para distribuir el calor en el horno y reducir drásticamente la temperatura del gas caliente que ingresa al horno, asegurando que las piezas valiosas no se sobrecalienten (Steelman Industries, Inc., 2019, s.p.).

Calefacción de arriba hacia abajo para hornos quemadores

Esta tecnología patentada (patente de Estados Unidos 5.351.632) literalmente ha invertido el diseño del horno de quemado al introducir el calor en la parte superior del horno y eliminar los gases más fríos y el vapor combustible del fondo. Las ventajas del calentamiento de arriba hacia abajo son temperaturas más uniformes, control del punto más caliente en el horno para evitar daños en las piezas y una mayor eficiencia. Hace que el proceso sea más fácil de controlar, reduce las emisiones de partículas, permite que las bandejas de cenizas en el fondo de los carros y las ruedas del carro duren mucho más tiempo (Steelman Industries, Inc., 2019, s.p.).

Control de tasa de cambio

Este sistema permite a los hornos de limpieza por calor Steelman procesar grandes cantidades de material rápidamente sin riesgo de incendio. En realidad, mide la producción de vapor dentro del horno y lo controla a un nivel seguro (Steelman Industries, Inc., 2019, s.p).

Quemadores del horno de alto fuego Afterburners

El postquemador Steelman alcanza la temperatura rápidamente y mantiene de 1,500 °F a 1,800 °F durante más de 1/2 segundo para cumplir con los estándares actuales y futuros de calidad del aire. Todos los hornos Steelman tienen un indicador de temperatura posterior al quemador (Steelman Industries, Inc., 2019, s.p.).

Control automático del proceso del horno quemado

Este paquete de control avanzado y patentado (patente de EE. UU. 5,189,963) está diseñado para hacer que el funcionamiento del horno sea totalmente automático sin intervención del operador. Esto elimina la posibilidad de error del operador. Este paquete incluye temporizador de ciclo automático, sistema de seguridad de tres niveles y un circuito de enfriamiento (Steelman Industries, Inc., 2019, s.p.).

Tiempo de ciclo automático: este sistema puede indicar cuándo finalizó el proceso, por lo que el horno no funciona más de lo necesario para hacer el trabajo y no se apaga prematuramente. Se ajusta automáticamente a la carga (Steelman Industries, Inc., 2019, s.p.).

Sistema de seguridad de tres niveles: los rociadores de agua primarios controlan el proceso. Si fallan, 20 segundos después se activa la boquilla de respaldo. Si falla, 20 segundos después, el quemador primario se apaga (Steelman Industries, Inc., 2019, s.p.).

Circuito de enfriamiento: si el postquemador falla por algún motivo, los chorros de agua se activan para enfriar la carga y evitar que el humo suba por la pila. Se apaga automáticamente cuando el horno se enfría (Steelman Industries, Inc., 2019, s.p.).

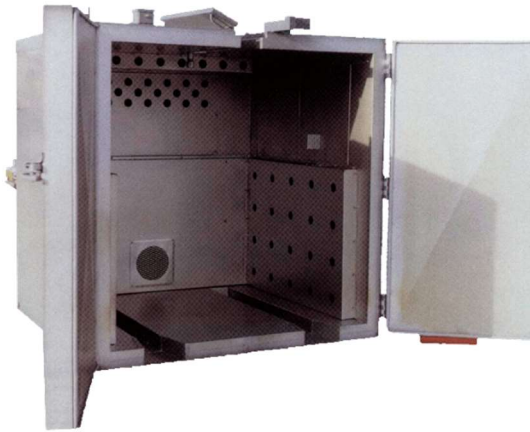


Ilustración 3. Horno Industrial Steelman

Fuente: Steelman.com

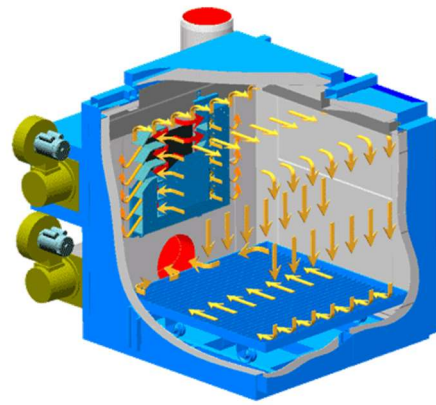


Ilustración 4. Flujo de calor en Hornos Steelman. Patente 5.351.632

Fuente: Steelman.com

Funcionamiento de un quemador

Inicio

En ausencia de llama, en la que se configuran los puntos de arranque, de mínima y de máxima potencia. Estos puntos permiten preestablecer los caudales de mezcla para cada uno de estos estados. Se inicia la secuencia, cuando se energiza el módulo de relé controlador donde registra variaciones en el voltaje de +10 / - 15% o fluctuaciones en la frecuencia de $\pm 10\%$ durante cualquier parte de la secuencia de operación. La secuencia de inicio tiene una duración de diez segundos a menos (Honeywell, 1999, p. 11).

Prepurga normal de arranque

El controlador o relé proporciona un tiempo de prepurga que se selecciona entre dos segundos y treinta minutos con la energía aplicada y el control indicando una llamada de calor. Todos los circuitos monitoreados deben estar en el estado correcto de operación, los entrecierres de operación, los entrecierres de pre-ignición, el interruptor del quemador, el interruptor run / test y el entrecierre de bloqueo (Honeywell, 1999, p. 11).

La salida del motor del ventilador es energizada para iniciar la secuencia de prepurga excepto cuando el motor de modulación es conducido a la posición de alto fuego. El tiempo de prepurga no inicia hasta que los entrecierres de bloqueo y el interruptor de alto fuego se encuentre cerrado. El motor del ventilador no se energiza hasta que el Interruptor de Alto Fuego se cierra (Honeywell, 1999, p. 11).

El entrecierre de preignición debe permanecer cerrado durante la prepurga (PREPURGE); de lo contrario el control regresa al estado de STANDBY (espera) y se mantiene (30 segundos) u ocurre un apagado de seguridad (Honeywell, 1999, p. 11).

Una vez que el tiempo de prepurga se concluye, el motor de modulación se va dirigir a la posición de bajo fuego, cuando el motor de modulación alcanza la posición de bajo fuego, la entrada del interruptor de bajo fuego se debe energizar antes de entrar en el estado de pruebas de ignición (Honeywell, 1999, p. 11).

Pruebas de ignición

Es el período de estabilización de llama. Con el motor de modulación en la posición de bajo fuego se energizan la válvula piloto y el transformador de ignición.

Durante el período de estabilización de llama del piloto, el interruptor de bajo fuego debe permanecer cerrado. Si se abre, ocurre un apagado de seguridad. La llama debe estar comprobada dentro de diez segundos para permitir que la secuencia continúe. Si no se ha comprobado la llama al final del periodo de estabilización ocurre un apagado de seguridad. Al final de 5 segundos, la ignición, se desenergiza para una terminación rápida de chispa (Honeywell, 1999, p. 11).

Operación (Run)

Ocurre un período de estabilización de 10 segundos al principio de la etapa de operación, el motor de modulación se libera, el motor de compuerta se energiza y el controlador se encuentra ahora en operación (RUN) y permanece así hasta que la entrada del control se abre, indicando que la demanda está satisfecha o que se ha abierto un límite (Honeywell, 1999, p. 12).

Postpurga

Proporciona un periodo de quince segundos una vez completado el período de operación (RUN). Se energiza la salida del motor del ventilador para conducir todos los productos de la combustión, así como cualquier cantidad de combustible no quemado fuera de la cámara de combustión. También proporciona aire de combustión para quemar el combustible sobrante que proviene de las líneas de combustible después de las válvulas de seguridad (Honeywell, 1999, p. 12).

Controladores de temperatura

Los controles de temperatura automatizan métodos de producción para mantener la temperatura a rangos deseables según las directrices de manufactura de cada proceso. Para tener un sistema controlador de temperatura se requiere, además, el uso de sensores de temperatura como los termopares, RTD, entre otros, estos elementos miden la variable y transportan la señal hasta las entradas de los controladores, estos últimos son los encargados de activar o desactivar elementos pasivos (resistencias eléctricas) o actuadores (alarmas, cierres de elementos, etc.). (Tei Ingeniería, 2010, s.p.).

Las siguientes son aplicaciones típicas en donde se utilizan controles de temperatura:

- Mantenimiento de temperatura en tanques
- Alarmas en sistemas de calentamiento
- Corte de energía en resistencias eléctricas
- Abertura y cierre de ventilas y motores

Controlador ON/OFF

Este tipo de controlador, también llamado todo o nada, usa un algoritmo simple para solamente revisar si la variable de proceso está por encima o por debajo de un punto de ajuste (*setpoint*) determinado. En términos prácticos, la variable manipulada o la señal de control del controlador cambian entre “totalmente ON” o “totalmente OFF”, sin estados intermedios.

En aplicaciones prácticas, se considera para el control ON/OFF punto de ajuste alto y bajo o una banda de control, dado que si solo consideramos un punto de ajuste, la válvula de control oscilaría con demasiada frecuencia, provocando desgaste prematuro, por ejemplo.

Solo en algunos pocos procesos industriales reales se podría usar este tipo de control, como, por ejemplo, el control de nivel de un tanque en el que simplemente el objetivo es evitar derrames o evitar que se vacíe completamente.

No solo es un problema de precisión, sino que este tipo de control usado para una banda de control muy pequeña o un solo *setpoint* en específico fatigaría al elemento final de control, por ejemplo, desgaste de componentes mecánicos. En el caso del intercambiador, el ciclo térmico (frío, caliente, frío, caliente, etc.) fatigaría los tubos internos y por tanto menor tiempo de vida. Otro factor es la pérdida de energía que se produce porque constantemente se estaría calentando el fluido a temperaturas mayores a la necesaria. Así mismo, este sobrecalentamiento o sobreenfriamiento indudablemente afectara la calidad del producto final, otro punto de tener en cuenta (Villajulca, 2019, s.p.)

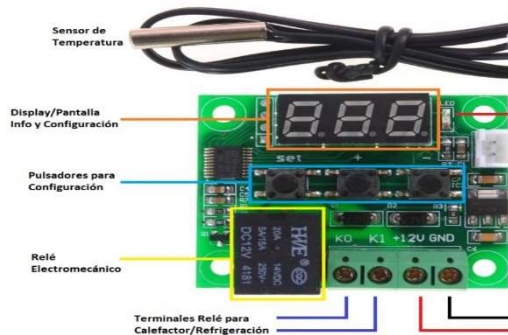


Ilustración 5. Controlador ON-OFF

Fuente: Google Imágenes.

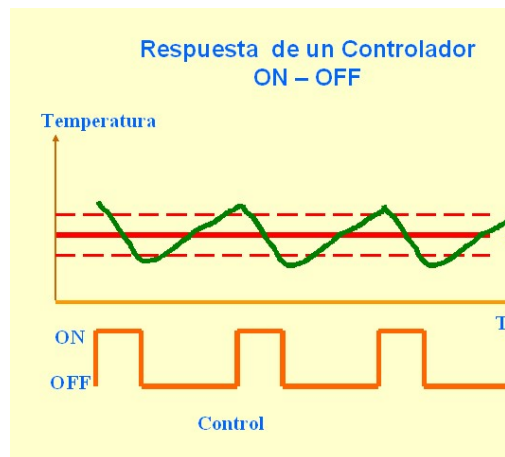


Ilustración 6. Respuesta de Controlador ON-OFF

Fuente: Google Imágenes.

Controlador PID

Un controlador o regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa. Estas tres acciones son las que dan nombre al controlador PID (Pardo, 2013, s.p.).

En un control PID intervienen algoritmos de programación que limitan el sobrepaso de la temperatura sobre la temperatura objetivo, un margen de error más reducido es el que se obtiene tras configurar un método de control PID. Existen algoritmos más sofisticados que el utilizado en el control PID, como lo es el control Fuzzy Logic o control difuso que utiliza técnicas y algoritmos de inteligencia artificial (TEI Ingeniería, 2010, cfr. p. p. 1).

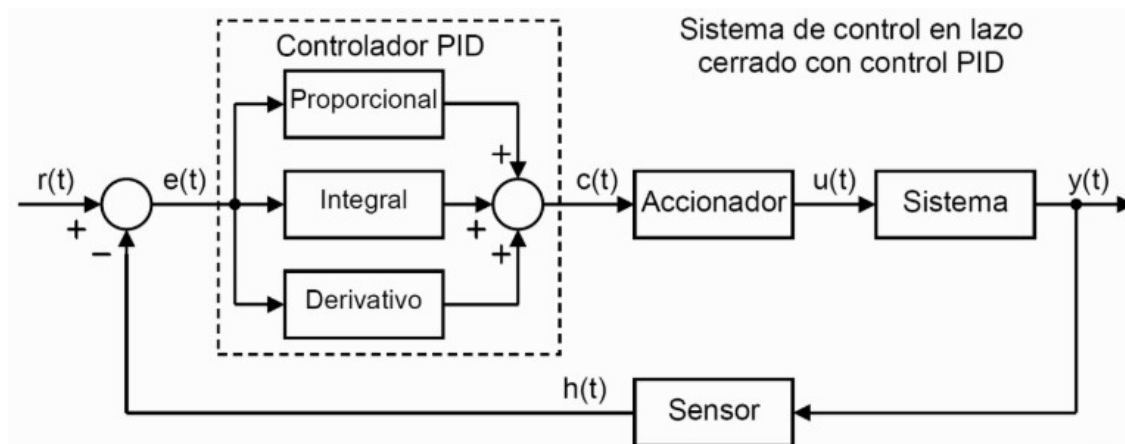


Ilustración 7. Diagrama de Bloque de un controlador PID

Fuente: Picuino.

Señal de referencia y señal de error

La señal $r(t)$ se denomina referencia e indica el estado que se desea conseguir en la salida del sistema $y(t)$. En un sistema de control de temperatura, la referencia $r(t)$ será la temperatura deseada y la salida $y(t)$ será la temperatura real del sistema controlado. Como puede verse en el esquema anterior, la entrada al controlador PID es la señal de error $e(t)$.

Esta señal indica al controlador la diferencia que existe entre el estado que se quiere conseguir o referencia $r(t)$ y el estado real del sistema medido por el sensor, señal $h(t)$ (Pardo, 2013, s.p.)

Si la señal de error es grande, significa que el estado del sistema se encuentra lejos del estado de referencia deseado. Si por el contrario el error es pequeño, significa que el sistema ha alcanzado el estado deseado. (Pardo, 2013, s.p.)

Acción de control proporcional

Como su nombre indica, esta acción de control es proporcional a la señal de error $e(t)$. Internamente la acción proporcional multiplica la señal de error por una constante K_p . Esta acción de control intenta minimizar el error del sistema. Cuando el error es grande, la acción de control es grande y tiende a minimizar este error. (Pardo, 2013, s.p.)

Aumentar la acción proporcional K_p tiene los siguientes efectos:

- Aumenta la velocidad de respuesta del sistema.
- Disminuye el error del sistema en régimen permanente.
- Aumenta la inestabilidad del sistema.

Los dos primeros efectos son positivos y deseables. El último efecto es negativo y hay que intentar minimizarle. Por lo tanto, al aumentar la acción proporcional existe un punto de equilibrio en el que se consigue suficiente rapidez de respuesta del sistema y reducción del error, sin que el sistema sea demasiado inestable. Aumentar la acción proporcional más allá de este punto producirá una inestabilidad indeseable. Reducir la acción proporcional, reducirá la velocidad de respuesta del sistema y aumentará su error permanente. (Pardo, 2013, s.p.)

Salidas de control: Relevador y SSR

Dependiendo de la aplicación por automatizar un controlador de temperatura puede tener salida de relevador o SSR. La salida de relevador -o muchas veces llamada simplemente relé- es una compuerta mecánica utilizada para activar bobinas de contactores o relevadores externos, cortan o cierran un contacto mecánico y permiten cerrar un circuito de corriente

alterna, es decir, permite el flujo de energía a través de las bobinas contactores para poner en activación al sistema. Dentro de estas salidas se identifican dos tipos diferentes la denominada SPST y la SPDT. La primera de ellas SPST se trata solamente de un contacto que se abre o se cierra por otro lado la salida SPDT son dos contactos que son cerrados alternamente por un común, cuando una de ellas está activa la otra está abierta y viceversa.

La salida de control a SSR se refiere a relevador de estado sólido, es decir, una salida a voltaje de corriente directa, cuando la salida está en forma activa un voltaje de CD está presente entre las terminales, cuando la salida está desactivada dicho voltaje desaparece. La salida de relevador es altamente recomendable al utilizar procesos de control basados en métodos PID y Fuzzy Logic (Tei Ingeniería, 2010, p. 1)

Controlador de nivel modulante LC 2610

Aplicación básicamente utilizada para un control de nivel de agua en calderas, de manera modulada u ON-OFF, utilizando un probador de tipo capacitivo. Entrega un control remoto y exacto para el proceso. En el control ON-OFF de bombas, a través de un contactor. Para indicación simple de nivel de agua en calderas o estanques. Características principales, panel con display alfanumérico y botones de control a presión. Provee control de nivel, salida para dos alarmas y señal de control de 4 a 20 mA. Permite la conexión con 1, 2 ó 3 elementos de control al mismo tiempo (ej. probador de nivel, sensor de presión, caudalímetro). Puede utilizarse con válvulas de control neumáticas o eléctricas. Rangos de operación:

Rango de temperatura ambiente: 0 °C a 55 °C.

Máxima longitud cable (terminales de control 1-9): 100 m.

(Agua Market, Santiago de Chile)

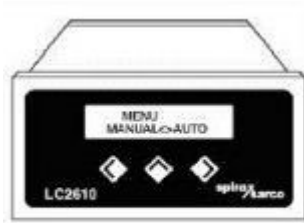


Ilustración 8. Controlador Modulante 4 a 20 mA

Fuente: AguaMarket.com

Controlador dos estaciones

El sistema de control electrónico para hornos profesionales e industriales se compone de dos módulos principales: la tarjeta básica, que comprende también un módulo para la gestión de los termopares, y la tarjeta interfaz de usuario, caracterizada por un teclado, LED, barras de LED, pantalla y *buzzer* para señales acústicos. El corazón del sistema es la tarjeta base, que contiene un microprocesador de última generación que controla los termopares de tipo J para controlar la temperatura en la cámara de cocción y la máquina de vapor, activar las salidas de relé para la gestión de las cargas, para aprovechar del *Real Time Clock* y definir una base tiempo de alta precisión. Destinado al uso en el sector de alimentos (hornos para pizzerías, panaderías, pastelerías), el sistema propuesto es extremadamente flexible y puede ser personalizado, tanto en *hardware* como en el *firmware*, en función de las especificaciones requeridas por el uso previsto. (Fasar Electronica S.R.L, Ancona, Italia)

Estos controladores utilizan el método de fuego alto y fuego bajo, donde controlan la llama del quemador por medio de las dos estaciones que serán ejecutadas durante el proceso.



Ilustración 9. Controlador dos estaciones

Fuente: Fasar Electronica.

Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura se utilizan para medir el calor para asegurar que el proceso se encuentre, o bien dentro de un cierto rango, lo que proporciona seguridad en el uso de la aplicación, o bien en cumplimiento de una condición obligatoria cuando se trata de calor extremo, riesgos o puntos de medición inaccesibles.

Hay dos variedades principales: sensores de temperatura con contacto y sin contacto. Los sensores de contacto incluyen termopares y termistores que hacen contacto con el objeto a medir, y los sensores sin contacto se encargan de medir la radiación térmica emitida por una fuente de calor para determinar su temperatura. Este último grupo mide la temperatura a distancia y a menudo se utilizan en entornos peligrosos.

Tipos de sensores de temperatura

Termistores

Los termistores, como los termopares, también son sensores de temperatura económicos y fácilmente disponibles, fáciles de usar y adaptables. Se utilizan, sin embargo, para realizar sencillas mediciones de temperatura en lugar de para aplicaciones a alta temperatura. Están realizados de material semiconductor con una resistividad que es especialmente sensible a la temperatura. La resistencia de un termistor disminuye con el incremento de la temperatura para que cuando ocurran cambios de temperatura, el cambio de

la resistencia sea predecible. Son muy utilizados como limitadores de corriente de irrupción, sensores de temperatura, protectores contra sobrecargas de reinicio automático, y elementos de calentamiento autorregulados (Mathas, 2011, p. 1).

Termostatos

Los termistores difieren de los detectores de temperatura resistiva (RTD) en que el material que se utiliza en los RTD es metal puro y la respuesta térmica de los dos es diferente. Los termistores se pueden clasificar en dos tipos, según el signo de k (esta función se refiere a la ecuación de Termistor Steinhart-Hart para convertir la resistencia del termistor en temperatura en grados Kelvin). Si el k es positivo, la resistencia aumenta con el incremento de la temperatura, y el dispositivo se denomina termistor con coeficiente de temperatura positivo (PTC). Si el k es negativo, la resistencia disminuye con el aumento de temperatura, y el dispositivo se denomina coeficiente de temperatura negativo (CTN) (Mathas, 2011, p. 1).

Sensores resistivos de temperatura (RTD)

Los detectores de temperatura resistiva (RTD) son sensores de temperatura con una resistencia que cambia el valor resistivo simultáneamente con los cambios de temperatura. Precisos y reconocidos por la repetibilidad y estabilidad, los RTD se pueden utilizar con una amplia gama de temperaturas, desde $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las variedades de película delgada y desde $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la variedad de hilo bobinado.

Los elementos de los RTD de película delgada cuentan con una delgada capa de platino sobre un sustrato. Se crea un diseño que ofrece un circuito eléctrico que es ajustado para darle una resistencia específica. Se conectan los cables principales, y se recubre el conjunto para proteger tanto la película como las conexiones. El tiempo de respuesta normal (en el caso de una constante única de tiempo) es de cuatro minutos en aire inmóvil y 15 segundos en agua inmóvil (Mathas, 2011, p. 1).

Sensores infrarrojos

Los sensores infrarrojos se utilizan para medir las temperaturas en superficie que van desde -70 a 1000 °C. Convierten la energía térmica enviada desde un objeto en un rango de longitud de onda de 0.7 a 20 μm en una señal eléctrica que convierte la señal para mostrar en unidades de temperatura tras compensar para cualquier temperatura ambiente.

Estos sensores se utilizan para medir la temperatura cuando:

1. No pueden utilizarse termopares o sondas.
2. Si el objeto de destino está en movimiento (sobre rodillos, maquinaria en movimiento, cintas transportadoras).
3. Si el objeto de destino está en el vacío.
4. Si existe riesgo de alto voltaje.
5. Si las distancias son muy extensas.
6. Si las temperaturas son demasiado altas para sensores de contacto.
7. Cuando se requiere una respuesta rápida.

Cuando se selecciona una opción de infrarrojos, las consideraciones críticas incluyen campo de visión (ángulo de visión), emisividad (relación de la energía irradiada por un objeto con la energía emitida por un radiador perfecto a la misma temperatura), respuesta espectral, rango de temperatura y montaje (Mathas, 2011, p. 1).

Análisis de cargas en estructuras

Equilibrio de una partícula

Según lo estipulado en el libro de Mecánica Vectorial para Ingenieros, se tiene la siguiente definición: “si la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre una partícula es cero, la partícula se encuentra en equilibrio”. De acuerdo con el caso particular donde la configuración de fuerzas actuantes en una partícula provoca un efecto nulo, es decir, no produce movimiento y, por lo tanto, no efectúa trabajo. En tal caso, se dice que la partícula se encuentra en equilibrio. Lo anterior es posible en el caso de que dos o más fuerzas o sus componentes actúen en sentido contrario entre sí y poseyendo igual magnitud, por lo que la equivalencia final de fuerzas es igual a cero.

$$\sum F = 0 \text{ (Ecuación 2)}$$

Al descomponer cada una de las fuerzas en sus componentes rectangulares, se tiene que:

$$\sum (F_x i + F_y j) = 0 \text{ (Ecuación 3)}$$

Se concluye que las condiciones necesarias y suficientes para el equilibrio de una partícula son:

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \text{ (Ecuaciones 4 y 5)}$$

Un gran número de problemas que tratan de estructuras pueden reducirse a problemas concernientes al equilibrio de una partícula. Esto se hace escogiendo una partícula significativa y dibujando un diagrama separado que muestra a esta y a todas las fuerzas que actúan sobre ella. (Beer *et al.*, 2010, cfr. p. 35-36).

El empleo de los diagramas de cuerpo libre para el análisis de fuerzas sirve para los siguientes propósitos importantes

- Establece direcciones de los ejes de referencia, proporciona un lugar para registrar las dimensiones del subsistema y magnitudes y direcciones de las fuerzas conocidas; además ayuda a suponer las direcciones de las fuerzas desconocidas.

- Simplifica el análisis, porque proporciona un lugar para almacenar una idea, mientras se procede con la siguiente.

- Proporciona un medio para comunicarle a otros las ideas de forma clara y sin ambigüedades.

La construcción cuidadosa y completa del diagrama clarifica las ideas confusas, al destacar puntos que no siempre son obvios en el enunciado o en la geometría del problema total. Así, el diagrama ayuda a entender todas las facetas del problema.

Fuerza cortante y momento flexionante en una viga

Considérese una viga AB que está sometida a la acción de varias cargas concentradas y distribuidas. Se desea determinar la fuerza cortante y momento flector en cualquier punto de la viga. Aunque en el ejemplo la viga está simplemente apoyada, el método puede aplicarse a cualquier tipo de viga estáticamente determinada (Beer *et al.*, 2010, p. 363).

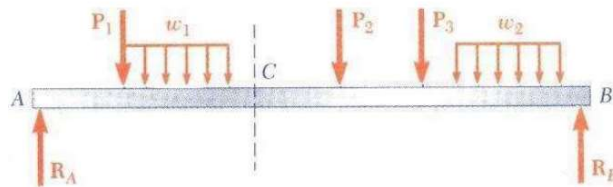


Ilustración 10. Reacciones en Viga AB

Fuente: Libro Mecánica Vectorial para Ingenieros.

Para determinar las fuerzas internas en C, se corta la viga en C y se dibujan los diagramas de cuerpo libre correspondientes a las porciones AC y CB de la viga (Beer *et al.*, 2010, p. 363).

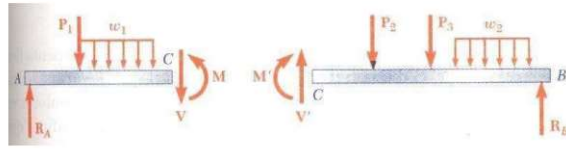


Ilustración 11. Corte en C de la viga AB

Fuente: Libro Mecánica Vectorial para Ingenieros.

Con el diagrama de cuerpo libre para la parte AC, se puede determinar la fuerza cortante V en C igualando a cero la suma de las componentes verticales de todas las fuerzas que actúan sobre AC [...] Sin embargo, otra alternativa posible sería la de utilizar el diagrama de cuerpo libre para la porción CB con el fin de determinar la fuerza cortante V' y el momento flexionante M' igualando a cero la suma de las componentes verticales y la suma de los momentos con respecto de C de todas las fuerzas y todos los pares que actúan sobre CB. A pesar de que la selección del cuerpo libre empleada puede facilitar el cálculo de los valores numéricos de la fuerza cortante y el momento flexionante, es necesario indicar sobre qué porción de la viga están actuando las fuerzas internas consideradas.

Por lo tanto, si se van a calcular y se van a registrar eficientemente los valores de la fuerza cortante y del momento flector en todos los puntos de la viga, se debe encontrar una forma que permita evitar el que se tenga que especificar cada vez cuál porción de la viga se utilizó como el cuerpo libre. Para lograr esto es conveniente adoptar las siguientes convenciones: Al determinar la fuerza cortante en una viga, se supondrá que las fuerzas V y V' están dirigidas tal y como se muestra en la figura anterior.

Cuando se obtenga un valor positivo como resultado, se mostrará que la suposición fue correcta y viceversa. Se supondrá que los pares internos M y M' están dirigidos como se muestra en la figura anterior. Asimismo, cuando se obtenga como resultado de cálculo un valor positivo, la suposición inicial es correcta; si por el contrario resulta negativo, el sentido del momento flector correspondiente se invierte (Beer *et al.*, 2010, pp. 363-364).

Se dice que la fuerza cortante V y que el momento flexionante M en un punto dado de una viga son positivos, cuando las fuerzas y los pares internos que actúan sobre cada porción de la viga están dirigidos, como a continuación se muestra (Beer *et al.*, 2010, p. 364).

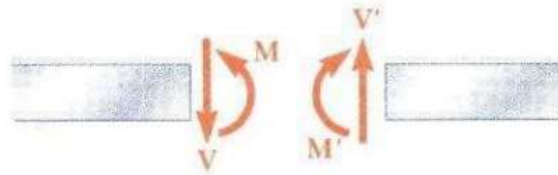


Ilustración 12. Momento flector

Fuente: Libro Mecánica Vectorial para Ingenieros.

La fuerza cortante en C es positiva cuando las fuerzas externas (cargas y reacciones) que actúan sobre la viga tienden a cortar a la viga en C , como se muestra a continuación (Beer *et al.*, 2010, p. 364).

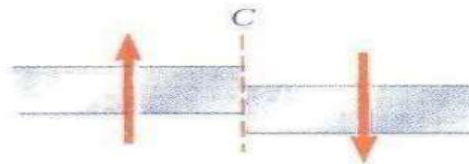


Ilustración 13. Esfuerzos Cortantes

Fuente: Libro Mecánica Vectorial para Ingenieros.

El momento flexionante en C es positivo, cuando las fuerzas externas que actúan sobre la viga tienden a flexionar a la viga en C , como se aprecia a continuación:

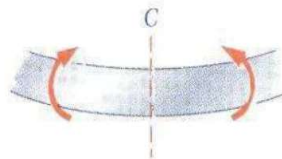


Ilustración 14. Momento flexionante positivo

Fuente: Libro Mecánica Vectorial para Ingenieros.

Normativas vigentes y aplicables para el diseño del horno industrial

Para el diseño industrial del horno de quemado, que se desarrolla en este proyecto, se respetarán una serie de normativas que regulan aspectos muy importantes para considerar; tales como:

Reglamento sobre emisión de contaminantes atmosféricos provenientes de calderas y hornos de tipo indirecto

Redacta sobre el potencial de contaminación atmosférica que pueden generar las emisiones producidas por las actividades industriales, comerciales y de servicios, justifica la adopción de medidas de control estrictas sobre la calidad del aire, niveles de emisión mediante el establecimiento de límites máximos de emisión de contaminantes en las fuentes emisoras, principalmente instalaciones y actividades agrícolas, pecuarias, agroindustriales e industriales, en el presente reglamento.

Que mediante Decreto Ejecutivo N° 30222-S-MINAE publicado en La Gaceta N° 60 del 26 de marzo del 2002, el Poder Ejecutivo promulgó el “Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos provenientes de Calderas”.

Y de acuerdo con los artículos y tablas regidos en estos documentos para el cumplimiento de las funciones y desarrollo del proyecto.

Tabla 1 Clasificación de Hornos de tipo indirecto

Categoría	A	B	C	D
Potencia (kW)	Más de 6000	De 2001 a 6000 Inclusive	Más de 100 a 2000 Inclusive	Menor o igual a 100

Fuente: Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto.

Se excluyen de la aplicación de este reglamento los hornos de tipo indirecto que utilicen combustibles biomásicos con una potencia menor o igual a 500 kW. Para solicitar la exclusión, el ente generador deberá presentar ante el Ministerio de Salud un Balance Térmico

suscrito por un profesional calificado. (Reglamento Sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Porvenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto, 1998)

NFPA 54

Para la instalación de los sistemas de gas se respetarán la norma y la NFPA 54 “Código de gas combustible”.

Cada norma tiene un ámbito de aplicación, la norma NFPA 58 cubre toda la instalación exterior hasta el regulador y la NFPA 54 se encarga de regular desde el regulador hacia el interior del edificio.

Manual de disposición de bomberos

Según el manual de disposición de seguridad emitido por la entidad costarricense de bomberos, respecto al área industrial (la competente para esta investigación) se expone que: “Ocupación donde se fabrican productos o se desarrollan operaciones de procesamiento, ensamblado, mezclado, empaque, acabado, decorado o reparación, en edificios de diseño convencional y adecuados para los diferentes tipos de procesos, materiales o contenidos” (Unidad de Ingeniería de Bomberos, 2013, p. 108). Asimismo, en cuanto a los medios de egreso en estos casos se menciona que:

En las ocupaciones industriales de riesgo leve o moderado y con una carga de ocupación inferior a 500 personas debe permitirse un único medio de egreso individual desde cualquier piso o sección, siempre que la salida se pueda alcanzar dentro de la distancia permitida como recorrido común. En las ocupaciones industriales de riesgo leve o moderado debe permitirse un medio de egreso desde cualquier piso o sección, siempre que la salida se pueda alcanzar dentro de la distancia permitida como recorrido común. Las áreas con contenidos de riesgo alto deben cumplir con la sección 7.11 de la norma NFPA 101 edición 2006 o el equivalente en las versiones más recientes (Unidad de Ingeniería de Bomberos, 2013, p. 109).

Valor actual neto (VAN)

El valor actual neto consiste en encontrar la diferencia del valor actualizado de los flujos de beneficio y el valor, también actualizado, de las inversiones y otros egresos de efectivo.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

(Ecuación 6)

Donde:

V_t : representa los flujos de caja en cada periodo t.

I_0 : es el valor del desembolso inicial de la inversión.

n : es el número de periodos considerado.

Si el valor actual neto de un proyecto es positivo, la inversión deberá realizarse y si es negativo, deberá rechazarse. Las inversiones con valores actuales netos positivos incrementan el valor de la empresa, puesto que tienen un valor mínimo aceptable.

El VAN de los proyectos variará en función de la tasa mínima atractiva de corte utilizada, es decir que la deseabilidad referente a los diferentes proyectos cambiará, si cambia la tasa de rendimiento mínimo aceptable por la empresa. (Francisco Jiménez B., 2007, p. 81)

Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de rendimiento de un proyecto de inversión es la tasa de descuento (i) que hace que el valor actual de los flujos de beneficios (positivos) sea igual al valor actual de los flujos de inversión (negativos). En otras palabras, la TIR es la tasa que descuenta los flujos asociados con un proyecto hasta un valor exactamente de cero. La ecuación es la siguiente (Francisco Jiménez B., 2007, p. 81-82):

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0$$

(Ecuación 7)

Donde:

TIR: Tasa interna de retorno

VAN: Valor actual neto

V_t : representa los flujos de caja en cada periodo t.

I_0 : es el valor del desembolso inicial de la inversión.

n : es el número de periodos considerado.

Si la TIR es mayor a la tasa de expectativa, el proyecto es financieramente atractivo ya que sus ingresos cubren los egresos y generan beneficios adicionales por encima de la expectativa o alternativa. Si la TIR es menor a la tasa de expectativa, el proyecto no es financieramente atractivo ya que hay alternativas de inversión que pueden generar mejores resultados. Dentro de este escenario se nos pueden presentar dos alternativas:

- TIR menor a la expectativa, pero mayor a 0: significa que los ingresos apenas cubren los egresos del proyecto y no se generan beneficios adicionales.
- TIR menor a 0: significa que los ingresos no alcanzan a cubrir los egresos, por ende, el proyecto genera pérdidas.
- Si la TIR es igual a la tasa de expectativa es indiferente realizar el proyecto o escoger las alternativas, ya que generan idéntico beneficio. En caso de no existir alternativas debería llevarse a cabo el proyecto ya que los ingresos cubren los egresos y generan beneficios. (Mete, 2013, s.p.)

Capítulo III

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

Método de la investigación

El proyecto se desarrollará bajo el método científico, el cual es una forma ordenada y planificada de los procedimientos que hace uso la investigación, para observar la extensión de los conocimientos. Se alcanzará a ejecutar los trabajos de investigación por medio del estudio de las ciencias matemáticas y físicas aplicadas, que abarca los diseños de ingeniería. Las fases características del método científico son: la observación, el planteamiento del problema, la hipótesis, la solución del problema y las conclusiones.

El método deductivo infiere los datos y parámetros del diseño basándose en las leyes físicas de la termodinámica, ley de gases ideales, transferencia de calor, etc., donde se extraen conclusiones lógicas y válidas a partir de un conjunto dado de cálculos matemáticos basados en afirmaciones reales creadas por científicos o ingenieros para el razonamiento y ejecución del proyecto.

Enfoque de la investigación

En el presente documento se ejecutará el desarrollo del proyecto, mediante el análisis del método cuantitativo. La recolección de datos, diseño y cálculos para la selección de los equipos más adecuados se basará en la medición numérica y el análisis matemático-físico de transferencia de calor, termodinámica, análisis de estructuras y circuitos de mando de control, para establecer patrones adecuados para un sistema completo de horno industrial que se amolde a las necesidades de la producción de la empresa.

Tipo de investigación

Este proyecto presenta un tipo de investigación explicativo y descriptivo, en el explicativo se busca establecer un ordenamiento secuencial de los pasos necesarios para alcanzar el desarrollo del proyecto, donde primeramente se centra en conocer los orígenes o causas de la falla del fenómeno en este caso el sistema de horno antiguo que posee la empresa, con el fin de determinar la condición del proceso y realizar una investigación que determine los mejores parámetros y componentes para el adecuado diseño.

La investigación descriptiva o estadística, describe los datos y parámetros de medición que serán tabulados para observar el eficiente desarrollo del proyecto.

Fuentes de información

- Catálogos de Hornos Industriales (STEELMAN INDUSTRIES, INC- Electric Motors Industrial Ovens / GUSPRO OVENS)
- Libros de Transferencia de Calor / Termodinámica (Yunes A. Cengel / Yunes A. Cengel y Michael A. Boles)
- Fichas técnicas de proveedores de tipos de aislamientos térmicos.
- Fichas técnicas de controladores, relés, válvulas, interruptores (Honeywell, Autonics, Dwyer, Siemens, ABB, etc.)
- Manuales de Electrical Apparatus Service Association Inc (EASA).
- Reglamento Sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto.
- National Fire Protection Association (NFPA 54).
- Código Nacional Eléctrico (NEC).
- Manual de disposiciones técnicas generales sobre seguridad humana y protección contra incendios.
- Códigos de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias.
- Reglamento general para regulación del suministro de gas petróleo.

Variables

Definición conceptual

- Temperatura: es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, de un objeto o ambiente cerrado como es el caso del horno, su unidad de medición según el sistema internacional son grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y los grados Kelvin (K).
- Tiempo: magnitudes físicas que se encarga de medir el intervalo o secuencia que sucede en una serie ordenada de acontecimientos, su unidad en el sistema internacional es dada en segundos (s), pero para efectos del proyecto la unidad a regir será la hora (h), siendo una hora el equivalente a 3600 segundos.
- Transferencia de calor: es el proceso por el cual se da la propagación de energía en forma de calor, en este caso se da por medio de convección. Se mide en BTU/h.
- Resistencia térmica: es la capacidad del material de oponerse al flujo de temperatura. Es la inversa de la conductividad térmica por ende su unidad de medida es grados Celsius entre Watts ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).
- Potencia eléctrica: es la cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. Su unidad de medida es el Watt (W).
- Tensión eléctrica: es el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas. Su unidad de medida son los voltios (V).
- Corriente eléctrica: el flujo de carga eléctrica que recorren los electrones en el interior de un material. Su unidad de medida son los amperios (A).
- Longitud: es la dimensión o distancia de una línea o de un cuerpo considerando su extensión en línea recta. Su unidad de medida es el metro (m).
- Esfuerzo mecánico: son magnitudes físicas con unidades de fuerza sobre área utilizadas en el cálculo de piezas prismáticas como vigas o pilares y también en el cálculo de placas y láminas. Su unidad de medida está dada en Newton sobre metro cuadrado siendo Pascales (Pa) o libra sobre pie cuadrado, dado por (PSI).

- Costos: es el valor monetario de los consumos de factores que supone el ejercicio de una actividad económica destinada a la producción de un bien, servicio o actividad. Su unidad de medida será los colones (₡).

Definición instrumental

- Temperatura: Se efectuarán los cálculos de temperatura que necesitará el horno para cumplir con la demanda de calor, basados en libros de Transferencia de Calor y Termodinámica.
- Tiempo: se evaluará por medio de cálculos físicos que permitan el análisis de tiempo que tarda la transferencia de calor de masas, para que se cumpla la eficiencia del proceso de quemado de motores.
- Transferencia de calor: se efectuarán cálculos basados en los libros, para elaborar el diseño de acuerdo con las leyes físicas y cumplir con la demanda de calor.
- Resistencia térmica: analizando circuitos térmicos por medio de transferencia de calor, se determinará la resistencia térmica de acuerdo con la conductividad térmica de los aislamientos del horno.
- Potencia eléctrica: se evaluarán los cálculos basados en libros, incluyendo el código nacional para determinar la alimentación del quemador.
- Tensión eléctrica: de igual manera para el caso de voltaje, se ejecutarán cálculos para determinar la alimentación eléctrica de los componentes de control y quemador.
- Corriente eléctrica: se ejecutarán cálculos de consumos de los circuitos eléctricos de los sistemas de control y quemador.
- Longitud: basados en los planos y dimensiones de un generador seleccionado por la empresa Electromotores, se utilizarán esas medidas para efectuar el levantamiento de las dimensiones de la estructura del horno.
- Esfuerzos mecánicos: se efectuarán cálculos de esfuerzos ejercidos en la estructura de la carretilla de transporte por el peso del motor y determinar el esfuerzo permisible utilizando libros de Mecánica Vectorial Estática y Dinámica.

- Costos: se ejecutará una tabla de costos que abarcará todos los precios de los componentes del horno, los equipos seleccionados de acuerdo con los cálculos que los respaldan.

Definición Operacional

- Temperatura: se incluirá en el diseño, sensores de tipo RTD (Resistance Temperature Detector), para monitorear la temperatura interna del horno y comprar dato con los cálculos.
- Tiempo: para efectos del diseño del horno se tomará en cuenta temporizadores en los sistemas de control, que medirán el período de producción que dura este proceso de quemado de máquinas rotativas para analizar la eficiencia del horno.
- Transferencia de calor: basados en los cálculos de transferencia de calor, se seleccionará un quemador de capacidad superior a la que actualmente posee el horno.
- Resistencia térmica: de acuerdo con los cálculos de la resistencia térmica se realizará la selección del espesor y material más adecuado del tipo de aislamiento para el interior del horno.
- Potencia eléctrica: Una vez seleccionado el quemador se definirá la potencia eléctrica para efectos de cableado, instalación y alimentación.
- Tensión eléctrica: de acuerdo a los cálculos de voltaje se elegirán los componentes y cables de alimentación para el quemador y sistema de control.
- Corriente eléctrica: como referencia de los resultados de los cálculos de corriente, se hará la selección del calibre de cable adecuado para el quemador y de igual manera, los sistemas de control.
- Longitud: se seleccionará material y piezas de estructura por medio de las dimensiones basadas en los planos de un generador utilizado como modelo de referencia.
- Esfuerzos mecánicos: basados en los cálculos mecánicos de esfuerzos se elegirán los materiales más adecuados para el diseño de la carretilla de transporte del horno.
- Costos: Una vez definidos equipos y materiales se procederá a seleccionar los mejores precios del mercado para cumplir la relación costo-beneficio.

Instrumentos

Se comenzará a revisar información de varias fuentes de catálogos de hornos industriales (Steelman Industries, Inc- Electric Motors Industrial Ovens / Guspro Ovens) para entender el funcionamiento básico de algunos tipos de hornos en aplicaciones similares a la requerida.

Se investigará en libros de Transferencia de Calor y Termodinámica (Yunes A. Cengel) para los cálculos de energía en forma de calor, conducción, aislamientos, etc. y de igual manera, fichas técnicas de proveedores de tipos de aislamientos en hornos para su selección.

Para efectos del diseño de la carretilla, los cálculos de esfuerzos y selección de materiales se consultará los libros de Mecánica Vectorial Estática y Mecánica de Materiales de Beer / Johnston / Mazurek / Eisenberg / DeWolf.

En el caso de la parte eléctrica de control y diseño, se buscará información de proveedores nacionales, equipos Honeywell, Autonics, Dwyer, Siemens, ABB, etc. para elaborar el circuito de mando que manipule y controle las válvulas de presión, sensores de temperatura y quemador.

Se va a realizar entrevistas a los diferentes operarios del horno, para reconocer las principales fallas en el procedimiento y observar el horno actual, que se encuentra en malas condiciones. Se va consultar los manuales de EASA para obtener información acerca del proceso de quemado de bobinas para ajustar el diseño de acuerdo con la demanda de este.

Se consultará las normativas actuales por regir para el diseño del horno y cumplir con todos los requerimientos, como el Reglamento Sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto, la NFPA 54 y el Código Nacional Eléctrico (NEC).

Capítulo IV

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

Diagnóstico de la situación actual

Descripción de la empresa

Énfasis de trabajos en la empresa

Desde su fundación, Electromotores se planeó para realizar reparaciones y otros trabajos en máquinas y motores eléctricos de carácter industrial. El paso del tiempo y la experiencia adquirida durante el desarrollo del taller ha permitido realizar muchos trabajos hasta la fecha, y de gran calidad, lo cual da credibilidad a los clientes cada día. Se ha trabajado con motores y generadores eléctricos de baja, mediana y alta tensión. En el espacio taller se han realizado excelentes reparaciones en máquinas de hasta 13800 voltios, y fuera del país, se han realizado tanto reparaciones como mantenimientos en máquinas de hasta 100 MW de potencia.

Proceso de reparación de máquinas eléctricas rotativas

Para conceptualizar y lograr entender de mejor manera este proyecto del horno de quemado, el cual se centra en una determinada área de este proceso, es importante comprender en resumen cada paso que se desarrolla en la empresa Electromotores de Costa Rica Ltda.

Inspección inicial del motor o generador

Una vez recibida la máquina en las instalaciones de Electromotores, se le asigna un código EM al motor: un número que se le da a cada motor que ingresa por primera vez al centro de servicios. Por medio de ese código EM, el motor adquiere un expediente de reparación dentro de la empresa. Si el motor que está entrando al taller es reincidente, o sea que ha sido reparado antes en el taller, debe mostrar dicho código EM, para que su reparación forme parte del expediente correspondiente.

Se le asignan una Orden de Trabajo en la Base de Datos de la empresa y una colilla de información al motor, y se crea una Hoja de Datos, que se coloca en una carpeta dedicada al motor, para que se desplace con él a lo largo del proceso de reparación. Como

primera inspección al motor, se le ejecutan una serie de pruebas eléctricas estáticas según estándares IEE-43 2013, para determinar el estado de su sistema de aislamiento a tierra y entre espiras, por medio de pruebas como balance resistivo, resistencia de aislamiento, índice de polarización, prueba surge o de impulsos al voltaje nominal de la máquina y si el motor lo requiere, pruebas dinámicas para verificar la operación de este, en cuanto a balances de corriente, voltaje, temperatura y velocidad.

Inspección mecánica

Los técnicos mecánicos inician el proceso de desarme de acuerdo con el Std. ANSI-EASA AR100, junto a los mecánicos de precisión se encargan de verificar excentricidad al eje, ajustes en los muñones, a los diámetros y alojamientos de tapas del motor, para comparar las medidas nominales con las tolerancias y ajustes máximos y mínimos, y en dado caso que se encuentre alguna incoherencia, se elabora una boleta de reparación que debe ser considerada en la cotización, para una futura reparación en caso de aprobación del servicio. Una vez finalizado el desarme del motor, el técnico eléctrico ejecuta una inspección visual a profundidad en los bobinados para descartar u observar alguna anomalía dieléctrica o térmica en los sistemas de aislamiento de la máquina.

Proceso de rebobinado

En esta etapa primeramente el técnico eléctrico comienza a levantar los datos del núcleo, información de suma importancia tanto para el rebobinado, como para la prueba de núcleo interlaminar que es el primer paso en este proceso, que consiste en medir la pérdidas en watts por cada kilogramo del núcleo, presentadas en forma de calor debido a temperaturas de desgaste y la concentración de corrientes parásitas en el núcleo, ya sea causado cortocircuito de las laminaciones por un arrastre del rotor o por la ruptura del aislamiento interlaminar.

Esta prueba es ejecutada antes y después del proceso de cremado en el horno, con esto se logra cuantificar con resultados estos procesos y determinar afectaciones en la máquina.

La configuración de los parámetros de la prueba debe proyectar un resultado no mayor a 13 W/kg y delta de temperatura en el núcleo no mayor a 15 °C.

Una vez realizada esta prueba se procede a tomar los datos de las diferentes dimensiones del bobinado, ubicación física de grupos-bobinas, conexiones, según disposición original. Luego se procede con el corte de bobinas existentes, para el caso de la extracción completa del devanado, el estator se lleva a un horno de quemado industrial, que en este caso es el que se pretende diseñar en este proyecto, para agilizar el proceso de extracción, dicho horno se encarga de deteriorar por completo el barniz, todo el sistema de aislamiento que dependiendo de la clase que sea, la temperatura de desgaste será mayor o menor.

Se trata de usar el calor proporcionado por el horno para suavizar el alambre dañado y hacer más sencillo el proceso de extracción, también llegar a un punto cercano a fundir todos los componentes de sujeción mecánica y aislamientos que mantienen el devanado con mucha dureza, para mayor facilidad en la limpieza del núcleo; la temperatura crítica para el aislamiento interlaminar es de 370 °C, por tanto esta temperatura no debe ser superada porque se eliminaría la protección dieléctrica entre láminas y provocaría corto circuito en la laminación, aumentando las corrientes de Foucault en el núcleo.

Cuando se termina la extracción completa de las bobinas dañadas se mide el calibre y cantidad de alambre que poseía el estator. Luego se ejecuta la limpieza del núcleo usando aire comprimido seco y cepillos abrasivos no-metálicos y barnizado del núcleo estatístico.

Se finaliza la etapa de preparación del núcleo con la comprobación de las dimensiones del núcleo, cálculo y ejecución de la segunda prueba de núcleo. El resultado de esta prueba se compara con la inicial con el propósito de comprobar que el proceso de extracción no produjo ningún cambio en el aislamiento interlaminar.

El supervisor de departamento eléctrico recibe los datos del bobinado, proporcionados por el técnico que extrajo las bobinas dañadas. Este funcionario revisa el diseño del bobinado utilizando base de datos originales o programa de cálculo.

Mediante este proceso es posible constatar el tipo aislamiento por requerir, el calibre, tipo y cantidad de alambre, y otros materiales si suelen ser necesarios como son los casos de resistencias de calefacción y sensores de temperatura.

Antes de la instalación de las bobinas se coloca todo el sistema de aislamiento a tierra Clase H (180 °C), papel Nomex-Mylar. Nomex, durante la instalación de las nuevas bobinas los técnicos eléctricos van ajustando las dimensiones del cabezal similar a su diseño original, reforzando el aislamiento con cintas, telas especiales, tape de silicón, mica, fibra de vidrio y *spaguetti* para mayor protección del bobinado y de igual manera para la soldadura de las juntas de conexión, antes de llevar la máquina a la planta de barniz se instalan las nuevas cuñas para darle mayor sujeción mecánica. El proceso de impregnación de barniz a presión y al vacío (VPI), se encarga de concluir esta etapa, donde cada área del núcleo y bobinado es sumergida a barniz o resina para darle mayor solidez y aparte ese detalle estético al estator.

Donde luego, el estator es llevado a un horno de secado con controladores de temperatura. Este horneado opera a una temperatura cercana a los 150 °C durante 12 a 13 horas dependiendo de la masa y tamaño de la máquina, con el objetivo de que, al curarse el barniz, el devanado adquiriera una resistencia mecánica perfecta para operar sin que se desprenda ni un solo hilo bobinado.

Una vez concluido este el curado del barniz se procede a ejecutar las pruebas eléctricas estáticas y de certificación del bobinado y sus sistemas de aislamiento, lo más favorable es aprovechar la temperatura que todavía mantiene la máquina salida del horno, las pruebas se realizan a una temperatura cercana a los 40°C, según normas internacionales, siendo la temperatura ambiente de operación para la mayoría de los motores.

Pruebas de certificación utilizando equipo BAKER D65R. Las pruebas incluyen:

- Medición de resistencia por circuito y por fase
- Índice de polarización y absorción dieléctrica (de conformidad con la norma IEEE 43)
- Pruebas de Hi-Pot (Voltaje de prueba: $3.4E + 1700$)
- Prueba Surge (Voltaje de prueba: $3.5 * Pu$)

Proceso de ensamble

El siguiente proceso por ejecutar es en el departamento mecánico, donde a la máquina se le realizan una serie de trabajos para cumplir con las estándares de calidad mecánica del motor, el cual en caso de realizar alguna reparación según los resultados obtenidos en la inspección inicial, sea rectificaciones en la tapas, ejes (muñones), alguna fabricación de piezas mecánicas, se concluyen para proceder con el balanceo dinámico del rotor (Equipo utilizado IRD B50/290).

Según ISO 1940-1, seguidamente se procede a la instalación de rodamientos según diseño original, método de montaje por inducción y se continúa con el ensamble del motor. Finalizando este proceso se aplica pintura anticorrosiva para mayor acabado del motor.

Cómo último procedimiento para la entrega del motor se ejecutan las pruebas eléctricas dinámicas, con la operación del motor en vacío, con el fin de analizar balances de corriente, voltaje, temperatura de rodamientos y velocidad. Con toda la certeza se espera que el motor esté en óptimas condiciones, y para asegurar su buen funcionamiento se realiza una medición y análisis de vibraciones de los espectros y amplitudes obtenidas en la prueba, para certificar el motor mecánicamente.

Entrega del motor

Este es el último paso de la secuencia, en el cual el motor se entrega al cliente junto con un informe explícito con los detalles, ilustraciones del proceso y la información de resultados de pruebas ejecutadas.

Este proceso es basado en manuales del estándar EASA AR100 2015, y desarrollado por Electromotores de Costa Rica LTDA.

Ubicación geográfica

Electromotores de Costa Rica se encuentra localizado en El Coyol de Alajuela, específicamente, a la altura de la autopista Bernardo Soto, 500 metros al oeste desde la Intersección Coyol. Investigaciones realizadas indican que la altitud de la zona es cercana a los 813 m s. n. m. La temperatura promedio del lugar es 30 °C y la presión atmosférica estimada es 900 mbar.

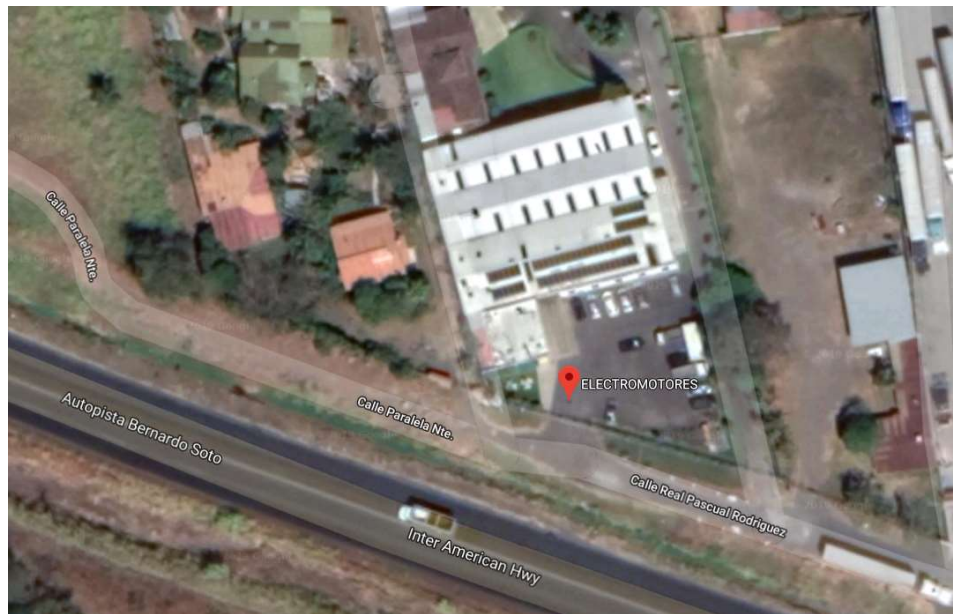


Ilustración 15. Ubicación de Electromotores via satélite
Fuente: Google Maps.

Como anteriormente se mencionó, la empresa de Electromotores de Costa Rica ofrece variedad de servicios, inspecciones y reparaciones para máquinas rotativas de alta y mediana potencia, como principal función de esta empresa para este proyecto, se va basar en el proceso de rebobinado que se ejecuta en el taller, específicamente en la parte de extracción del devanado dañado, donde actualmente se cuenta con un horno de quemado en muy malas condiciones y que no cumple con los estándares de calidad que representa la compañía.

Funciona a llama directa al núcleo del motor, y no hay manera de monitorear la temperatura que posee dentro del estator, el operario no cuenta con un sistema de control para observar y controlar las variables del quemado, sino solamente con un pirómetro que

detecta el calor emergido del horno, pero este no es exactamente la temperatura transferida al núcleo y manualmente abre y cierra la válvula del gas, para aumentar o disminuir la llama.

Es una de las principales etapas en el comienzo del proceso, considerado crítico para la producción de la empresa, donde es de suma importancia tomar en cuenta su buena operación, para que no provoque en las máquinas defectos en proceso como, por ejemplo, ligamiento o soldadura por exceso de calor en las láminas que producen pérdidas de calor por corrientes de Foucault.

Definición del proyecto por diseñar

En vista de los acontecimientos ocasionados por el actual horno en los núcleos de los estatores, evidenciados por las pruebas que se ejecutan antes y después del proceso de quemado, se propone diseñar un horno, que disminuya grandemente las pérdidas por calor al exterior, que sea de mayor capacidad y que ahorre combustible respecto al consumo actual. Se seleccionará el quemador con base en la demanda de calor y las pérdidas que genere.

El quemador industrial por medio de la chispa y el gas producirá una llama que elevará la temperatura y enviará todo el calor por medio del ventilador a los ductos que conducen hacia la cámara del horno, donde es colocado el estator para su debido proceso de quemado del alambre. Es de suma importancia considerar el sistema de control nuevo que se va a implementar al horno, con la finalidad de facilitar y mejorar el proceso, monitoreando cada variable importante en esta etapa, para mejor manipulación de la temperatura del horno desde un mando y que la temperatura sea lo más exacta posible.

Para esto se va definir los requerimientos del proceso en vista de la necesidades y mejoras que requiere el horno de la empresa respecto a la demanda de producción, los cálculos de calentamiento, pérdidas de calor en el horno con el tipo de aislamiento térmico por utilizar, mediante los cálculos de resistencia térmica que ofrece cada uno los aislamientos disponibles en el mercado, aparte de diseñar una carretilla para el transporte de motores, dentro y fuera de la cámara de quemado, para esto se ejecutarán una serie de cálculos de esfuerzo y pesos.

Recolección de información técnica y levantamiento de datos

Durante la inspección realizada y toma de datos se analizó detenidamente cada detalle por mejorar en el diseño respecto al actual horno que se encuentra en la empresa.

Se investigó acerca de la prueba que se encarga de cuantificar los resultados de este proceso en pérdidas en el núcleo, esta prueba consiste en realizar, por medio de un equipo especializado, una bobina por medio cables con el objetivo de excitar o saturar el núcleo con un nivel de flujo magnético cercano al de plena carga de la máquina, La prueba busca determinar las pérdidas del núcleo provocadas por concentración de corrientes parásitas en puntos específicos del núcleo, que se ven reflejados en calor. Los criterios de evaluación, pérdidas permisibles son los siguientes:

- 1 - 6 W/lb (2 - 13 W/kg)
- Delta de temperatura (°C) permisible: 5 – 15 °C

Un análisis muy importante efectuado en este proyecto es sobre el horno actual de la empresa, los núcleos -como se han descrito en este documento- están conformados por chapas apiladas y presurizadas entre sí, que contienen aislamiento orgánico entre las láminas. La temperatura crítica de este sistema ronda los 370 °C, y en caso de deterioro de este provocaría unión entre las láminas, produciendo calor.

En Electromotores esta prueba es ejecutada dos veces, antes y después haber extraído el alambre con ayuda del horno, por las debilidades que presenta este horno, en cuanto a control de llama y monitoreo de la temperatura. Se ha encontrado evidencia de malos resultados obtenidos después de haber ejecutado las pruebas, como la siguiente imagen que refleja pérdidas en comparación con el estado inicial y esto, sumado a la termografía que se realiza durante la prueba, ha mostrado grandes áreas del núcleo con aumentos de temperatura.



Ilustración 16. Ejecución de prueba núcleo con termografía

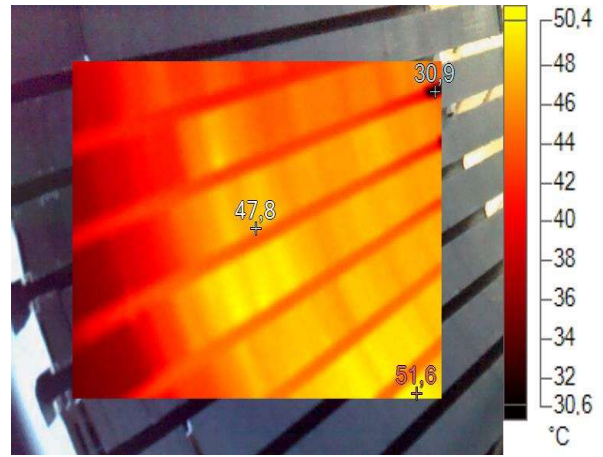


Ilustración 17. Evidencia de alta temperatura en área del núcleo

Fuente: Electromotores de Costa Rica

Fuente: Electromotores de Costa Rica

PRUEBA DE NÚCLEO INTERLAMINAR																	
Dimensiones (mm)		Variables Eléctricas		OT		10501											
L	292	VOLTIOS	25	<p>Nota: Dimensiones en milímetros (mm)</p>													
D1	362	HZ	60														
S	49																
B	56																
	DIAM. MEDIO	516															
	VUELTA	4,6															
	AMPERIOS	123,8															
	PESO NÚCLEO	192,5	kg														
LEAD WIRE SELECTION	Size AWG	18	16	14	12	10	8	6	4	3	2	1	1/0	2/0	3/0	4/0	LEAD SIZE
	Amperes [†]	18	22	25	30	40	50	70	90	105	120	140	155	185	210	235	
	Metric Size mm	1,0	1,5	2,5	4,0	6,0	10	16	25	35	50	50	70	95	120		
† Note: If estimated amperes fall between table's values, use next higher value for selection of lead wire or cable.																	
PRUEBA	T. AMB (°C)	HORA INICIO	HORA FINAL	T. FINAL (°C)	T. AUMENTO (°C)	VOLT	AMP	WATTS	PERDIDAS WATTS/KG								
INICIO	28	2:00	2:30	33	5	26	39	1014	5,3								
FINAL	30	8:30	9:00	57	27	30	64	1920	10,0								
Realizado por:	Jairo Gómez		Fecha:	08/11/2019			ESTADO	OK									
Realizado por:	Jairo Gómez		Fecha:	13/11/2019			ESTADO	REPARAR									

Ilustración 18. Comparación de valores de temperatura y pérdidas, antes y después del proceso de quemado

Fuente: Electromotores de Costa Rica LTDA.

Como se evidencia en las imágenes anteriores, los resultados obtenidos en las pruebas muestran valores de alerta, el núcleo se encuentra físicamente sin ningún golpe, fricción, etc., aparte los valores iniciales se encuentran en perfectas condiciones, entonces es cuando se debe tomar la decisión de reparar el núcleo, por medio del Restack, que consiste en extraer todo el laminado del núcleo para aplicar manualmente un sistema de barniz aislante en las laminaciones, donde luego se ensambla de nuevo el núcleo, se mide mecánicamente que se encuentre centrado y se le realiza otra prueba para determinar el buen estado del estator.

Estas reparaciones no se contemplan en la cotización, son reparaciones internas debido, en algunos casos, al sobrecalentamiento del horno al núcleo.



ELECTROMOTORES

Reparación de Núcleo (Restack)



Ilustración 19. Proceso de reparación laminado

Fuente: Electromotores de Costa Rica LTDA.



ELECTROMOTORES

Ensamble de laminación y carcasa



Ilustración 20. Ensamble de laminación y ejecución de prueba

Fuente: Electromotores de Costa Rica LTDA.

Verificación de excentricidad

Ilustración 21. Verificación mecánica posición del Núcleo

Fuente: Electromotores de Costa Rica LTDA.

Tabla 2. Dimensiones de estructura externa de horno antiguo

Altura (m)	2,5
Largo (m)	1,16
Ancho (m)	1,28

Fuente: Elaboración propia.

En la operación del horno se tomaron medidas durante el quemado de un motor, los rangos de temperatura que se van alcanzando varían respecto a las dimensiones, la masa del estator, la cantidad de alambre, el tipo de aislamiento instalado, el tipo y cantidad de barniz que posee el motor. Para este caso a continuación se describen los datos que este modelo poseía.

- Potencia: 150 HP
- Peso del estator: 407 Kg
- Peso del alambre: 90 Kg

Tabla 3. Escala de temperatura arranque-operación horno actual

Tiempo (h)	Temperatura (°C)
1	170
1,5	200
2	230
2,5	250
3	260
3,5	270
4	270
4,5	270

Fuente: Elaboración propia

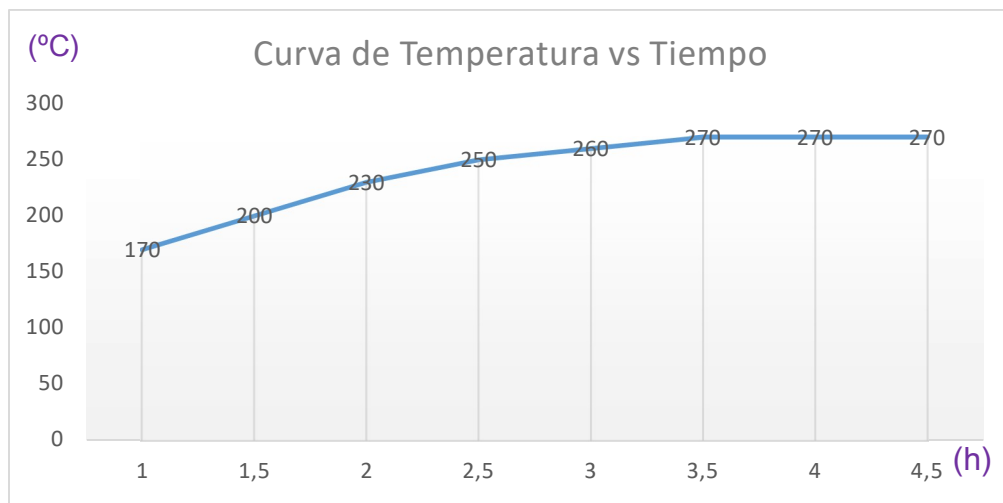


Gráfico 1. Curva de operación de horno actual

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en las figuras siguientes, el horno tiene la similitud a una cocina de gas, en la base de soporte donde se coloca el estator (ver Ilustración 5), se ubica el quemador y al operar la llama entra directamente al núcleo (ver Ilustraciones 6 y 7), por tanto la temperatura en su interior puede ser muy elevada y no hay sensores de temperatura, los técnicos solamente verifican el calor colocando un pirómetro de láser al interior del horno, monitoreando el estator y el núcleo donde se ubica la llama, abren y cierran la válvula en caso de exceder 370 °C, siendo el valor crítico para el aislamiento interlaminar, esta práctica puede traer consecuencias en la máquina, provocando daño por exceso de temperatura.

El deterioro del aislamiento térmico (fibra de vidrio) y el mal estado de la estructura han provocado que se escape el humo proveniente del quemador y este se expande al ambiente del taller, contaminando todo el aire de la zona. Se logra observar también que el combustible gas no se encuentra debidamente instalado conforme a los estándares de la NFPA 54, no tiene protección ni seguridad y se ubica a una distancia de 1,5 m del horno (ver Ilustración 4).



Ilustración 22. Detalle de Horno



Ilustración 23. Interior de Horno



Ilustración 24. Detalle del combustible (gas) del horno



Ilustración 25. Base de soporte y salida del quemador.



Ilustración 26. Detalle de operación del horno



Ilustración 27. Llama directa en el núcleo del motor

Fuente: Electromotores de Costa Rica – Horno actual de la empresa.

Modelo referencia para diseño del horno

Se ejecutaron una serie de reuniones con el ingeniero a cargo del taller y el gerente general respecto al presupuesto y requerimientos para el horno, como mejoras que hacer en cuanto al proceso, en vista del horno dañado que actualmente posee la empresa. Según indican los señores ingenieros, el presupuesto no será definido para tener mayor alcance en cuanto a la búsqueda de equipos, al gerente le interesa que el diseño del horno sea competitivo en el sentido de similitud a los hornos industriales de fabricantes de USA como es el caso de Steelman Industries.

La metodología usada reveló la necesidad de remitir el diseño a aspectos de realidad, los dueños del taller tenían en la mente para qué tipo y tamaño de motor se diseñaría el horno. Las dimensiones sugeridas para el nuevo horno fueron basadas en unas máquinas de una planta eólica, la idea de los gerentes es que el horno sea de mayor tamaño que el que actualmente poseen, para cumplir con la actual demanda de producción. Electromotores inclusive repara máquinas de mayores tamaños, como generadores de mediana y alta potencia, pero el proceso de extracción es ejecutado manualmente sin quemado del alambre.

A continuación, se detalla los datos de placa del generador.

Tabla 4. Datos de placa del generador

KW	2100
Marca	ELIN EBG
RPM	1812
Voltaje	600 V
Amperios	2190 A
Frecuencia	60 Hz
Clase Aislamiento	F
Peso	8600 Kg

Fuente: Elaboración propia

Durante la recolección de información, se logró conseguir los planos de fábrica del generador (**ver Anexo 1**), por medio de la influencia y comunicación de Electromotores con importantes fabricantes de máquinas rotativas, en este caso representantes de ELIN EBG

Motoren, se facilitó obtener las dimensiones del generador por medio de los planos, estas longitudes se describen a continuación.

Tabla 5 Dimensiones del generador (Modelo referencia).

Altura	Ancho	Largo
1,26 m	1,6 m	1,97 m

Fuente: Elaboración propia

Se hizo referencia a la masa del generador que pudiera hornearse, de acuerdo con los planos dados, el estator tiene un peso de 4000 Kg.

Propuesta de solución

Parámetros de cálculo

Análisis de transferencia de calor

Este cálculo determina la energía necesaria para levantar la temperatura mínima desde su valor en el ambiente de 18,6 °C promedio del Coyol de acuerdo una investigación elaborada por el Instituto Meteorológico Nacional y hasta los 300 °C de proceso. La masa por calentar será la del estator, es el generador modelo que se seleccionó, a partir de la planilla de datos, el cual está hecho de acero A30. El cálculo se basa para establecerlo como extremo crítico de operación del horno, ya que máquinas de menor masa pueden ingresar más fácilmente al horno y el calor será mayormente absorbido por motores más pequeños.

El cálculo de demanda de calor requerida se hará mediante la ecuación:

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

Ecuación 8

Calor requerido para calentar la masa del estator

Donde:

- Q: Capacidad térmica del horno [J]
- m: Masa por calentar [kg]
- Cp: Calor específico de la masa por calentar [J/kg °C]
- ΔT: Cambio de temperatura en el calentamiento [°C]

Específicamente sustituimos valores obtenidos mediante la recolección de datos para calcular dicha demanda respecto a la masa del estator. El calor específico es tomado de la tabla A-3 Propiedades de metales sólidos, del libro de Transferencia de Calor.

$$Q_{estator} = m_{estator} \cdot Cp_{acero} \cdot \Delta T$$

- **Masa estator:** 4000 kg
- **Calor específico Acero A30:** 460,46 J/kg °C
- **Cambio de temperatura:** 18,6 a 300°C

$$Q_{motor} = (4000 \text{ kg}) \cdot (460,46 \text{ J/kg}^\circ\text{C}) \cdot (300 - 18,6)^\circ\text{C}$$

$$Q_{motor} = 518\,293\,776 \text{ J ó } 518,293 \text{ MJ}$$

Por lo tanto, la demanda de energía requerida para calentar el estator es de 518,293 MJ. El calor debe ser transferido por el flujo que proviene del quemador a través del ducto que es expulsado por medio del abanico.

Calor requerido para calentar la masa de aire

Para elevar la temperatura del aire que está a 18,6 °C aproximadamente, se va a necesitar una capacidad térmica importante, para esto se van a calcular una serie de valores por considerar:

Para calcular la masa del aire con la ecuación:

$$m = \rho * v$$

Ecuación 9

Donde:

- m: Masa por calentar [kg]
- V: Volumen del horno [m^3]
- ρ : densidad [kg/m^3]

De las dimensiones obtenidas de la estructura del horno, largo (l), ancho (a) y altura (h), se calcula el volumen.

$$V = l * a * h$$

Ecuación 10

$$V = (2,35 \text{ m}) * (2 \text{ m}) * (2 \text{ m}) = 9,40 \text{ m}^3$$

Dado que la densidad aproximada del aire para una temperatura de 18,6°C es 1,16 kg/m³, se obtiene la masa del aire de la ecuación 2.

$$m = 1,212 \text{ kg/m}^3 * 9,40 \text{ m}^3 = \mathbf{11,38 \text{ kg}}$$

Se procede a calcular la entalpía, por medio de la interpolación lineal de la siguiente tabla del aire atmosférico en el interior del horno.

Tabla 6. Propiedades de gas ideal del aire

<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>P_r</i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v_r</i>	<i>s°</i> kJ/kg · K
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531
580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140

Fuente: Extracto de Tabla de Termodinámica Séptima Edición, Cengel. A Yunes.

Interpolación lineal a 291,75 K o 18,6 °C = 291, 91 kJ/Kg

Interpolación lineal a 573, 15 K o 300 °C = 578, 88 kJ/Kg

De las dos entalpías para temperaturas de 18,6 °C y 300 °C, se obtiene un Δh , que será sustituido en la siguiente ecuación.

$$Q_{aire} = m_{aire} \cdot \Delta h$$

- Masa aire: 11, 38 Kg
- Cambio de entalpía: 286, 97 kJ/kg

$$Q_{aire} = (11, 38 \text{ Kg}) \cdot (286, 97 \text{ kJ/kg}) = \mathbf{3265, 72 \text{ kJ}}$$

Por lo tanto, la demanda de energía requerida para elevar la temperatura del aire hasta los 300°C es de **3265,72 kJ**.

Análisis de potencia requerida para el horno

El tiempo que tarda el actual horno en conseguir el estado estacionario del horno a los 270 °C para una masa de 407 kg, es de 3,5 horas, pero dado que se desconoce la potencia de este quemador, ya que es un horno elaborado por personal de Electromotores y posee un quemador similar al de una cocina de gas, se supondrá y se realizarán los cálculos de potencia del quemador para un tiempo requerido de 2 horas hasta llegar alcanzar la temperatura constante y el calor requerido para suplir la demanda que necesita la masa de 4000 kg del estator y los 11,38 kg del aire. De manera que a esta potencia se le agregará las pérdidas que se producirán en el proceso para finalmente seleccionar el quemador industrial que transferirá todo el calor a la cámara de horno.

Se espera que el tiempo de este proceso sea menor, el tiempo iniciará desde la temperatura inicial del ambiente, hasta conseguir la temperatura nominal de operación, el cual varía de acuerdo con la masa que se está calentando, como anteriormente se mencionó. De esta manera, los motores de menor masa tardarán menos tiempo en alcanzar la temperatura dada y viceversa.

Ahora bien, donde se tiene el tiempo requerido para este proceso, se procede a calcular la potencia que necesitará el horno para llevar a cabo el cremado de los sistemas de aislamiento y barnices del estator.

Se sabe que el término potencia significa energía (calor) a través del tiempo, y responde a la ecuación:

$$Q = Q / t \quad \text{Ecuación 11.}$$

A partir de la ecuación anterior, al considerar la energía de calentamiento del generador modelo y asumiendo un tiempo de dos horas, es posible calcular la potencia mínima, que se será un dato de suma importancia para la selección del quemador.

$$Q = Q / t$$

Sumando el calor requerido para calentar el aire y el estator, se obtiene:

$$Q = 518\,293 \text{ kJ} + 3265,72 \text{ kJ} = \mathbf{521\,558,72 \text{ kJ}}$$

$$t = 2h \times \frac{3600s}{1h} * = 7200s$$

$$Q = 5,22 \times 10^8 J / 7200s$$

$$Q = \mathbf{72,438 \text{ kW}}$$

$$= \mathbf{72\,438 \text{ W}}$$

Análisis de pérdidas de calor y aislamientos seleccionados

De acuerdo con el análisis térmico de los aislamientos por medio de circuitos de resistencia térmica, se evalúan distintos materiales para las paredes y el suelo, con espesores diferentes. Este cálculo se realiza mediante una plantilla de Excel (ver Anexo 3), donde se evalúa cada material y se observa el comportamiento de las pérdidas, por medio de esto se analiza la factibilidad de invertir en otro aislamiento y espesor que disminuya las pérdidas por transferencia de calor al exterior.

Analizando las variables antes mencionadas se selecciona el material de fibra mineral como aislamiento para las placas (paredes), se evalúa la relación de costo-beneficio con

respecto a las pérdidas y la fibra cerámica en costo más bajo da mayores pérdidas que la fibra mineral, por tanto la fibra mineral, debido a que tiene menor conductividad térmica, no requiere de un espesor tan grande para que las pérdidas no sean dominantes y se evita disminuir el área interna del horno. Para el suelo se decide utilizar cemento refractario, debido a que posee menores pérdidas que utilizando ladrillo, además, respecto a la mano de obra y materiales adicionales, en la instalación se va a consumir mayor tiempo con los ladrillos porque estos requieren de una capa de mortero volcánico añadido y a diferencia del cemento solo necesitaría de agua.

Se analizan las paredes por separado debido a que las propiedades de algunos son diferentes, por ejemplo, el área de la placa frontal y trasera son diferentes a las caras de izquierda, derecha y superior. Pero con respecto al cálculo de la resistencia de convección externa, la variable por analizar, el coeficiente de transferencia de calor por convección (h), varía respecto a la velocidad del aire en el ambiente. Para esto se consulta el Instituto Meteorológico Nacional, tomando como referencia el valor promedio de la velocidad en los distintos meses del año y la temperatura mínima promedio de acuerdo a la posibilidad de operar el horno en horas de la noche, donde la demanda de energía de la empresa es menor.

El horno se encuentra expuesto a una puerta al oeste que va al exterior (ambiente) y que se encuentra a una distancia de 5 m que los separa (ver Anexo 4). Respecto al estudio antes mencionado del clima, se toma como referencia el promedio de todas las velocidades del viento durante el año, debido a que la mayor parte ingresa del oeste y el horno estaría expuesto a ese flujo proveniente del ambiente, se analiza con esta velocidad para evaluar el caso más crítico en los que si haya flujo de aire constante para sobredimensionar los cálculos.

Esta velocidad para la placa derecha, superior y trasera, se asume flujo paralelo a estas paredes. Respecto a la pared frontal se asume una velocidad menor ya que por ese lado solo habría velocidades menores por abanicos que no pegan directamente al horno y la velocidad del paso de las personas (personal del taller) que es 5 km/h (velocidad promedio de ser humano caminando). Se asume una velocidad media a la de una persona caminando.

V_{viento} para las paredes derecha, superior y trasera = **14,4 Km/h o 4 m/s**

$V_{\text{viento para la pared frontal}} = 2,5 \text{ Km/h o } 0,694 \text{ m/s}$

En el caso de la pared izquierda, esta se va a encontrar a distancia de 3 pulgadas de una pared de lámina de metal, que subdivide el taller; por tanto, se asumirá velocidad del viento 0 y se realizará el cálculo por medio de conducción pura del aire.

En la parte inferior o suelo, se evaluará las pérdidas por conducción pura y la temperatura exterior se evaluó por medio de un barrido de temperaturas tomadas en campo, con un pirómetro marca Fluke y como referencia se usará 22 °C.

Para el cálculo del coeficiente de convección se asume una temperatura de 18,6 °C, con el fin de sobredimensionar y analizar la pérdida mayor que podría tener la pared, con el coeficiente de convección más grande.

Tabla 7. Propiedades del aire a 1 atm

TABLA A-15							
Propiedades del aire							
Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935

Fuente: Segmento tomado de Tabla A-15, Transferencia de Calor y Masa, Yunus A. Cengel.

Cálculo de coeficiente de convección en las paredes

De la de Tabla 6 Propiedades del aire a una $T= 18,6 ^\circ\text{C}$ se obtiene interpolando:

- Viscosidad cinemática (ν) = $0,0000150 \text{ m}^2/\text{s}$
- Prant (Pr) = $0,7313$
- Conductividad Térmica aire (k) = $0,02503 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$

Pared derecha y superior: Estas dos paredes poseen las mismas variables de área y velocidad.

$$V \text{ viento} = 14,4 \text{ Km/h o } 4 \text{ m/s} \quad \text{Área pared} = 4,70 \text{ m}^2 \quad \text{Largo pared (L)} = 2,35 \text{ m}$$

Se procede a calcular el número de Reynolds (Re) para determinar si el flujo del viento es turbulento o laminar, y depende de esto se procede a calcular Nusselt (Nu) para el flujo determinado.

$$Re = \frac{Vaire * L}{\nu} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$Re = \frac{4 \text{ m/s}^2 * 2,35}{0,0000150 \text{ m}^2} = 626 \ 666,67$$

Dado que el valor de Reynolds es de 626 666,67 es mayor que 500000 se considera el flujo turbulento y se procede a calcular el Nusselt con la siguiente fórmula:

$$Nu = 0,037 * Re^{0,8} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$Nu = 0,037 * 626 \ 666,67^{0,8} * 0,7313^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 1447,20$$

Ahora, teniendo todas las variables, se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección:

$$h = \frac{Nu * k}{L} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$h = \frac{1447,20 * 0,02503}{2,35 \text{ m}} = 15,41 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Pared frontal:

V viento= 2,5 Km/h o 0,694 m/s Área pared= 4,0 m² Largo pared (L)= 2 m

Se procede a repetir los cálculos del número de Reynolds (Re) y el Nusselt (Nu)

$$Re = \frac{Vaire * L}{\nu} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$Re = \frac{0,694 \text{ m/s}^2 * 2 \text{ m}}{0,0000150 \text{ m}^2} = 92533,33$$

En este otro caso se considera de igual manera flujo laminar, el valor de Reynolds es de 92533,33, es menor que 500000 y se procede a calcular el Nusselt con la siguiente fórmula.

$$Nu = 0,664 * Re^{0,5} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$Nu = 0,664 * 92533,33^{0,5} * 0,7313^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 181,98$$

Ahora, teniendo todas las variables, se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección:

$$h = \frac{Nu * k}{L} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$h = \frac{181,98 * 0,02503}{2m} = 2,27 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

Pared trasera:

V viento= 14,4 Km/h o 4 m/s Área pared= 4 m² Largo pared (L)= 2 m

Se procede a repetir los cálculos del número de Reynolds (Re) y el Nusselt (Nu)

$$Re = \frac{Vaire * L}{\nu} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$Re = \frac{4 \text{ m/s} * 2m}{0,0000150 \text{ m}^2} = 533 \text{ 333, 33}$$

En este otro caso se considera flujo turbulento, el valor de Reynolds es de 533 333,33 es mayor que 500000 y se procede a calcular el Nusselt con la siguiente fórmula.

$$Nu = 0,037 * Re^{0,8} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$Nu = 0,037 * 533 \text{ 333, 33}^{0,8} * 0,7313^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Nu} = 1272,04$$

Ahora, teniendo todas las variables, se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección:

$$h = \frac{\text{Nu} * k}{L} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$h = \frac{1272,04 * 0,02503}{2m} = 15,92 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

Análisis del circuito térmico

Una vez determinado el coeficiente de convección del aire para la parte externa, se analiza las pérdidas por medio de circuito térmico con resistencias.

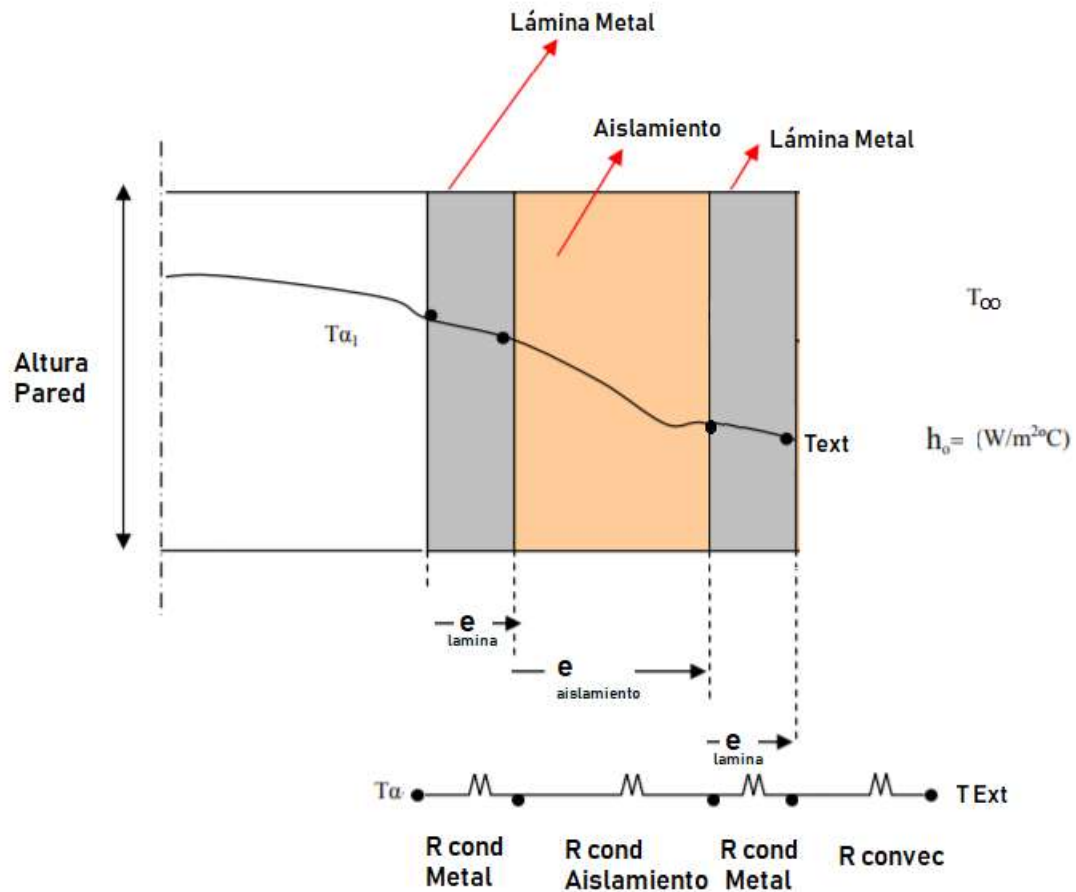


Ilustración 28. Circuito Térmico de las paredes del horno

Fuente: Elaboración propia.

- Temperatura ambiente (T_{∞}) = 18,6 °C
- Temperatura interna (T_{int} o T_a) = 300 °C
- Conductividad Térmica Lámina de Metal (k) = 60,5 W/m°C
- Conductividad Térmica Fibra Mineral (k) = 0,0475 W/m°C
- Espesor Lámina Acero Negro cubierto Zn (e) = 1/4 in o 0,0064 m

- Espesor Lámina Fibra Mineral (**e**) = 2 in o 0,0508 m

Pared derecha y superior

$$\text{Área} = \text{Largo} \times \text{ancho} = 2,35 * 2,0 = \mathbf{4,7 \text{ m}^2}$$

Analizando el circuito térmico, se tiene 4 resistencias térmicas en serie:

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{conducción metal}} + R_{\text{conducción Aislamiento}} + R_{\text{conducción metal}} + R_{\text{convección aire}}$$

Se sustituyen las variables de resistencia por las ecuaciones de transferencia de calor.

$$R_{\text{Total}} = \frac{e_{\text{metal}}}{K * A} + \frac{e_{\text{aislamiento}}}{K * A} + \frac{e_{\text{metal}}}{K * A} + \frac{1}{h * A}$$

Ecuación 15

$$R_{\text{Total}} = \frac{0,0064 \text{ m}}{60,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} * 4,70 \text{ m}^2} + \frac{0,0508 \text{ m}}{0,0475 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} * 4,70 \text{ m}^2} + \frac{0,0064 \text{ m}}{60,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} * 4,70 \text{ m}^2} + \frac{1}{15,41 \text{ W/m}^2\text{C} * 4,70 \text{ m}^2}$$

$$\mathbf{R_{\text{Total}} = 0,2414 \text{ }^{\circ}\text{C/W}}$$

Una vez determinada la resistencia térmica que van a tener las paredes derecha y superior, se procede a calcular la pérdida de calor en esas placas (Q), conociendo el delta de temperaturas, que es la resta de la temperatura interna del horno con la del ambiente. Se obtiene la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{\text{pared}}}$$

Ecuación 16

$$Q = \frac{(300 - 18,6)^{\circ}\text{C}}{0,2414 \text{ }^{\circ}\text{C/W}} = \mathbf{1165,88 \text{ W}}$$

Se observa que las pérdidas obtenidas en las paredes van a ser de **1165,88 W**.

Pared frontal

$$\text{Área} = \text{Largo} \times \text{ancho} = 2,0 * 2,0 = 4,0 \text{ m}^2$$

De igual manera a las paredes anteriores, se tiene un circuito de cuatro resistencias donde se obtiene de la ecuación 15:

$$R_{\text{Total}} = \frac{0,0064 \text{ m}}{60,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} * 4,0 \text{ m}^2} + \frac{0,0508 \text{ m}}{0,0475 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} * 4,0 \text{ m}^2} + \frac{0,0064 \text{ m}}{60,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} * 4,0 \text{ m}^2} + \frac{1}{2,27 \text{ W/m}^2 * 4,0 \text{ m}^2}$$

$$R_{\text{Total}} = 0,3772 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Se procede a calcular las pérdidas de temperatura en la pared (Q).

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{\text{pared}}}$$

Ecuación 16

$$Q = \frac{(300 - 1,6)^{\circ}\text{C}}{0,3772 \text{ }^{\circ}\text{C/W}} = 746,03 \text{ W}$$

Pared trasera

$$\text{Área} = \text{Largo} \times \text{ancho} = 2 * 2 = 4 \text{ m}^2$$

De igual manera a las paredes anteriores, se tiene un circuito de cuatro resistencias en donde se obtiene de la ecuación 15:

$$R_{\text{Total}} = \frac{0,0064 \text{ m}}{60,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} * 4,0 \text{ m}^2} + \frac{0,0508 \text{ m}}{0,0475 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} * 4,0 \text{ m}^2} + \frac{0,0064 \text{ m}}{60,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} * 4,0 \text{ m}^2} + \frac{1}{15,92 \text{ W/m}^2 * 4,0 \text{ m}^2}$$

$$R_{\text{Total}} = 0,2831 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Se procede a calcular las pérdidas de temperatura en la pared (Q).

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{pared}}$$

Ecuación 16

$$Q = \frac{(300 - 1,6)^{\circ C}}{0,2831 \text{ }^{\circ C/W}} = 993,90 \text{ W}$$

Pared izquierda

$$\text{Área} = \text{Largo} \times \text{ancho} = 2,35 \times 2 = 4,70 \text{ m}^2$$

Como anteriormente se había mencionado, la pared izquierda no va a estar expuesta al flujo de aire, por tanto, se evaluará el circuito como un bloque de aire estático, en el circuito térmico se presentará cuatro resistencias por transferencia de calor por conducción. La cara externa de la pared estará 3 in de una lámina que divide una parte del taller, por tanto esa distancia será tomada como referencia para espesor del aire.

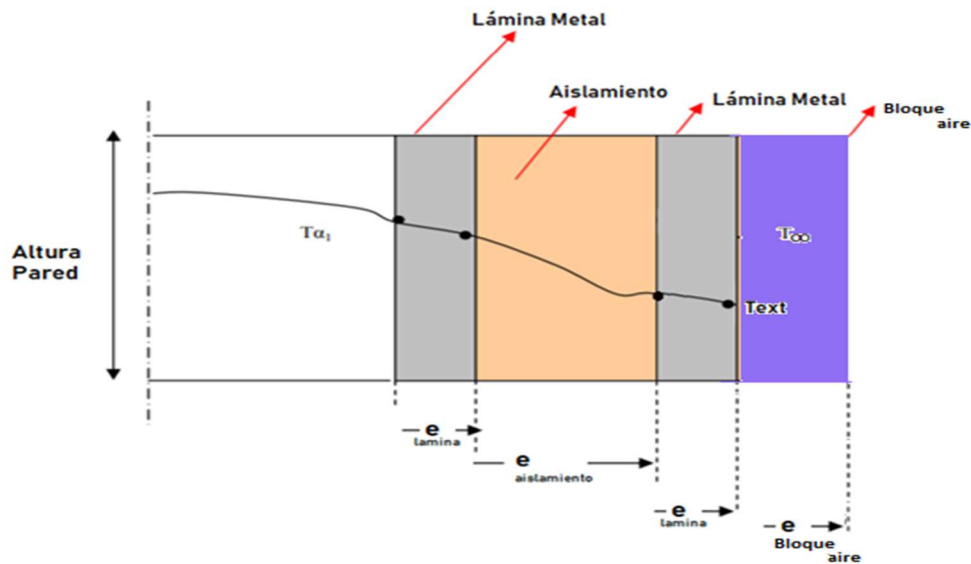


Ilustración 29. Circuito Térmico Pared Izquierda

Fuente: Elaboración propia.

$R_{\text{Total}} = R_{\text{conducción metal}} + R_{\text{conducción Aislamiento}} + R_{\text{conducción metal}} + R_{\text{conducción aire}}$

Se sustituyen las variables de resistencia por las ecuaciones de transferencia de calor.

$$R_{\text{Total}} = \frac{e_{\text{metal}}}{k \cdot A} + \frac{e_{\text{aislamiento}}}{k \cdot A} + \frac{e_{\text{metal}}}{k \cdot A} + \frac{e_{\text{aire}}}{k \cdot A}$$

Ecuación 15

$$R_{\text{Total}} = \frac{0,0064 \text{ m}}{60,5 \text{ W/m}^{\circ\text{C}} \cdot 4,70 \text{ m}^2} + \frac{0,0508 \text{ m}}{0,0475 \text{ W/m}^{\circ\text{C}} \cdot 4,70 \text{ m}^2} +$$
$$\frac{0,0064 \text{ m}}{60,5 \text{ W/m}^{\circ\text{C}} \cdot 4,70 \text{ m}^2} + \frac{0,0762 \text{ m}}{0,02503 \text{ W/m}^2 \cdot 4,70 \text{ m}^2}$$

$$\mathbf{R_{\text{Total}} = 0,8753 \text{ }^{\circ}\text{C/W}}$$

Dado que se tiene la resistencia térmica de la pared, se calcula las pérdidas en esa placa (Q), conociendo el delta de temperaturas. Se obtiene de la fórmula 16:

$$Q = \frac{(300 - 1,6)^{\circ\text{C}}}{0,8753 \text{ }^{\circ}\text{C/W}} = \mathbf{321,48 \text{ W}}$$

Se observa que las pérdidas obtenidas en las paredes van a ser de **321,48 W**.

Suelo

$$\text{Área} = \text{Largo} \times \text{ancho} = 2,35 * 2 = \mathbf{4,70 \text{ m}^2}$$

En el análisis del tipo de aislamiento por usar en el suelo, se tenían opciones como ladrillos refractarios, que se instalaban aplicando mortero refractario, pero finalmente la opción más viable para el horno fue el cemento refractario, debido a su baja conductividad y la rápida aplicación al suelo. Como se dijo anteriormente, la temperatura en suelo se analizó midiendo con pirómetro y se observó que se encontraba a 22 °C. A continuación, se describe el circuito térmico desarrollado para esta placa.

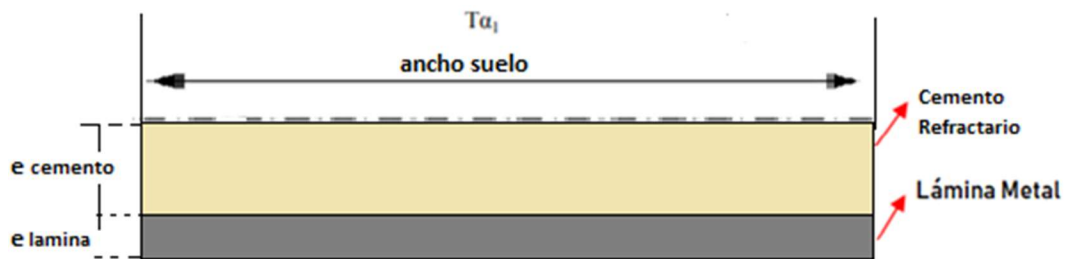


Ilustración 30. Circuito Térmico suelo

Fuente: Elaboración propia.

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{conducción metal}} + R_{\text{conducción Cemento}}$$

Se sustituyen las variables de resistencia por las ecuaciones de transferencia de calor.

$$R_{\text{Total}} = \frac{e_{\text{metal}}}{k * A} + \frac{e_{\text{cemento}}}{k * A}$$

$$R_{\text{Total}} = \frac{0,0064 \text{ m}}{60,5 \text{ W/m}^{\circ\text{C}} * 4,70 \text{ m}^2} + \frac{0,0762 \text{ m}}{0,885 \text{ W/m}^{\circ\text{C}} * 4,70 \text{ m}^2}$$

$$R_{\text{Total}} = \mathbf{0,01834 \text{ }^{\circ}\text{C/W}}$$

Ahora, se calcula las pérdidas en esa placa (Q), conociendo el delta de temperaturas. Se obtiene de la fórmula 16:

$$Q = \frac{(300 - 22)^{\circ\text{C}}}{0,023 \text{ }^{\circ}\text{C/W}} = \mathbf{15156,60 \text{ W}}$$

Se observa que las pérdidas obtenidas en el suelo son de **15156, 60 W**.

Luego de obtener las pérdidas por transferencia de calor en las placas de acuerdo con los aislamientos seleccionados, se procede a evaluar las pérdidas totales, donde se analiza que las paredes superior, derecha, frontal y trasera presentan pérdidas por convección y además radiación, la pared izquierda se analiza por el método de conducción pura junto con el suelo, pero a diferencia del suelo, esta sí posee pérdidas por radiación. Del análisis efectuado se procede a evaluar pérdidas por radiación.

Transferencia de calor por radiación

La radiación térmica se considera por las ondas electromagnéticas que emite un cuerpo hacia el exterior debido a su temperatura, de acuerdo con el caso más crítico de tener una temperatura exterior en la placa igual al interior de 300 °C, se procede a calcular transferencia de calor para el cuerpo asumiendo que es un prisma rectangular, exceptuando el área del suelo:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon * \sigma * A_s * (T_s^4 - T_{\infty}^4)$$

Ecuación 16

Donde:

Q rad: Transferencia de Calor por radiación (W)

ε : Coeficiente de Emisividad del Acero = 0,25

σ : Constante de Stefan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

A_s : Área de la superficie del Horno = $26,80 \text{ m}^2, -4,70 \text{ m}^2 = 22,1 \text{ m}^2$

$(T_s^4 - T_{\infty}^4)$ = Delta de Temperaturas (K)

De acuerdo al cálculo de la temperatura externa analizado en cada pared por medio de la siguiente fórmula:

$$T_{\text{externa}} = T_{\text{interna}} - (\mathbf{R}_{\text{Convección externa}} * \mathbf{Q}_{\text{perdidas pared}})$$

Se consigue encontrar el promedio de temperatura externa en las paredes, que será utilizada para el cálculo de radiación.

$$T_{\text{externa promedio}} = \frac{283,91 + 283,91 + 9,77 + 218,11 + 284,39}{5 \text{ paredes}} = 232,42^{\circ}\text{C o } 505,57 \text{ K}$$

$$Q_{\text{rad}} = 0,25 * 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4 * 22,1 \text{ m}^2 * (505,57^4 - 291,75^4) \text{ K}$$

$$Q_{\text{rad}} = 18196,71 \text{ W}$$

Se procede a sumar todas las pérdidas de las caras de acuerdo con el método analizado:

$$Q_{\text{Máxima}} = Q_{\text{convección}} + Q_{\text{conducción}} + Q_{\text{radiación}}$$

$$Q_{\text{convección}} = 1165,88 \text{ W} + 1165,88 \text{ W} + 746,03 \text{ W} + 993,90 \text{ W} = 4071,69 \text{ W}$$

$$Q_{\text{conducción}} = 321,48 \text{ W} + 15156,60 \text{ W} = 15478,08 \text{ W}$$

$$Q_{\text{radiación}} = 18196,71 \text{ W}$$

$$Q_{\text{Máxima}} = 4071,69 \text{ W} + 15478,08 \text{ W} + 18196,71 \text{ W} = 37746,48 \text{ W}$$

Las pérdidas totales serán de 37746,48 W

Cálculo de potencia del quemador

Las pérdidas por transferencia de calor total en todo el horno se tomarán en cuenta para seleccionar la potencia del quemador, este equipo deberá suministrar el calor al horno para calentar la masa del estator y la del aire, además de superar el calor perdido en las paredes y suelo del horno. De acuerdo con lo mencionado, se definirá la potencia del quemador a partir de esta sumatoria.

$$Q_{\text{quemador}} = (Q_{\text{aire}} + Q_{\text{motor}}) + Q_{\text{pérdidas}}$$

$$Q_{\text{quemador}} = 72\,438 \text{ W} + 37\,746,48 \text{ W}$$

$$Q_{quemador} = 110\,184,48 \text{ W}$$

Por medio de conversiones, calculamos la potencia en BTU /h:

$$Q_{quemador} = 110,184 \text{ kW} * \frac{3412,142 \text{ BTU} / \text{h}}{1 \text{ KW}} = 375\,963,45 \text{ BTU} / \text{h}$$

Se seleccionará un quemador que tenga capacidad de **400 000 BTU / h**, de acuerdo con su valor comercial de 200 000 BTU/ h a los 400 000 BTU / h, el valor comercial y recomendaciones de proveedores, se analiza con su potencia máxima debido a que, respecto al tiempo, en la potencia la máxima el quemador va a tardar menos de dos horas en llegar a la temperatura nominal, a diferencia de la potencia media que el quemador tardará dos horas exactas.

De acuerdo con la potencia del quemador se consultaron varias marcas como Industrial Combustion, pero al final de cuentas se selecciona el HSG-400 de Wayne, en cuanto a precio, el quemador Wayne es más económico en comparación al Industrial y requiere de un controlador ON / OFF y no un modulante, que para este proceso en específico es aceptable, ya que debido que la temperatura crítica (370 °C) no está cercana a los 300 °C de operación, no se requiere de un controlador sofisticado que mantenga la temperatura constante. Este proceso se adapta a un quemador que me cumpla con la demanda de calor y que mantenga la temperatura en un rango cercano a la de operación con cierta tolerancia de ajuste como los ON/OFF (ver ficha técnica Quemador HSC 400 adjunta en Anexos).

Una vez definido el quemador y la potencia se procede a calcular la demanda de combustible, en este caso gas licuado de petróleo (GLP). Donde analiza lo siguiente:

Con la potencia máxima que el quemador necesita para alcanzar la temperatura máxima que es la etapa de arranque tardará 2 horas, siendo el tiempo de mayor consumo y luego las restantes 6 horas, el quemador cumplirá con el calor para superar las pérdidas.

Potencia del Quemador: 375 963,45 Btu /h

Tiempo: 2 h

Poder Calorífico según RECOPE: 48.00 MJ/kg

Precio del kg de Gas según ARESEP: 594, 95 ¢/kg

$$1 \text{ BTU} = 1,06 \times 10^{-3} \text{ MJ}$$

Calor requerido para el arranque = 375 963, 45 Btu / h * 2 h = 751 926,91 Btu

$$751 \ 926,91 \text{ Btu} * \frac{1,06 \times 10^{-3} \text{ MJ}}{1 \text{ BTU}} = \mathbf{797,04 \text{ MJ}}$$

$$\text{Consumo} = \frac{797,04 \text{ MJ}}{48 \text{ MJ/kg}} = \mathbf{16,61 \text{ kg}}$$

Ahora, para el restante proceso de seis horas para cumplir con la demanda de las pérdidas:

Potencia de las pérdidas: 37746, 48 W *3,41 BTU /h = 128 715, 49 BTU /h

Tiempo: 6 h

Poder Calorífico según RECOPE: 48.00 MJ/kg

Precio del kg de Gas según ARESEP: 594,95 ¢/Kg

$$1 \text{ BTU} = 1,06 \times 10^{-3} \text{ MJ}$$

Calor requerido del proceso = 128 715,49 Btu / h * 2 h = 257 430,99 Btu

$$257430,99 \text{ Btu} * \frac{1,06 \times 10^{-3} \text{ MJ}}{1 \text{ BTU}} = \mathbf{272,88 \text{ MJ}}$$

$$\text{Consumo} = \frac{272,88 \text{ MJ}}{48 \text{ MJ/kg}} = \mathbf{5,68 \text{ kg}},$$

Consumo para las 8 horas = 16,61 kg + 5,68 kg = 22, 295 kg

Costo del Combustible por las 8 horas del proceso = 22, 30 kg * 594, 95 ¢/Kg

$$= \mathbf{¢ \ 13 \ 264,41}$$

Para aplicaciones de gas LP, se logrará el mejor rendimiento con un ajuste de CO₂ de 9.5% a 11.8% (3% a 6.5% O₂) y el CO₂ debe minimizarse con una meta de 100 ppm o menos. En ningún caso el CO₂ debe estar por encima de 400 ppm sin aire.

Análisis eléctrico

Motor de quemador

De acuerdo con el quemador seleccionado el HSG-400 de Wayne, posee un motor de 115V y 2,4 A. (ver ficha técnica adjunta en Anexos).

De acuerdo con la potencia de este se ejecutará la selección de cableados, protecciones y canalizaciones, con base en el Código Eléctrico Nacional (NEC).

De la sección II, artículo 430.22 inciso (A) que relata sobre conductores para circuitos de motores:

“Los conductores que alimenten un solo motor usado en una aplicación de servicio continuo, deben tener una ampacidad no inferior al 125% del valor nominal de la corriente de plena carga del motor” (NEC, edición 2014).

Conforme al artículo descrito, se procede a calcular la corriente demandada para la potencia y conductores.

$$I (A) * 125\% = 2,4 A * 125\% = \mathbf{3 A}$$

La potencia del motor para la carga demandada será de:

$$P = V * I_D = 115 V * 3 A = \mathbf{345 VA}$$

Para la carga del neutro será el producto de la carga demandada por 75%, de acuerdo con el artículo 220.61, inciso (B).

$$\text{Carga Neutro} = \text{Carga Demandada} * 75\% = 345 * 75\% = \mathbf{258.75 VA}$$

De lo anterior se deduce que:

- Corriente instalada: 2,4 A
- Corriente demandada: 3 A

Para efectos del cableado, se selecciona un cable #12 AWG para alimentador de Fase y Neutro, para sobredimensionamiento y como cableado mínimo para instalaciones eléctricas, conforme a la tabla 310.6 Ampacidades permisibles en conductores aislados y de

la tabla 250.122 Calibre mínimo de conductores de Puesta Tierra, del NEC edición 2014. Se selecciona:

- Fase y neutro: Cable AWG 12 THHN CU
- Puesta tierra: Cable AWG 14 THHN CU

Basado en el artículo 430.32 inciso 1, de protección contra sobrecargas, se procede a efectuar el cálculo para protección del motor en cuanto a sobrecargas de corriente y que logre accionar el disparo sería producto del 115% por la corriente de plena carga.

$$\text{Protección contra sobrecarga mínima} = 3A * 115\% = 3,45 A$$

$$\text{Protección contra sobrecarga máxima} = 3A * 130\% = 3,90 A$$

En el artículo 430.110 relata sobre el valor nominal de corriente y capacidad de interrupción, donde en el inciso (3), describe los motores pequeños que no indica la letra de código, como se puede ver en la ficha técnica del quemador adjunta en anexos, se debe asumir que la corriente con rotor bloqueado es seis veces la corriente de plena carga:

$$\text{Protección rotor bloqueado} = 3A * 6 = 18 A$$

Ahora bien, es importante considerar en caso de una emergencia el disparo instantáneo del sistema eléctrico del quemador, para esto se consulta la Tabla 430.52 del NEC, que relata sobre el valor nominal o ajuste máximo de los dispositivos contra cortocircuito y falla a tierra para los ramales del motor, que según se muestra para motores monofásicos, se selecciona el interruptor automático de disparo instantáneo con un porcentaje de 800 que se multiplica a la corriente de plena carga:

$$\text{Fusible automático de disparo instantáneo} = 3A * 800\% = 24 A$$

En el manual de instalación del quemador se recomienda un fusible no menor a 15 A (ver Anexo)

Para efectos de la canalización se consulta la Tabla 5 del NEC, por medio del cable seleccionado AWG 12 THHN, se obtiene el área de 0,0133 in², que luego nos envía la tabla

4 y seleccionando una canalización de EMT metálica para 3 alambre, se obtiene un tamaño comercial de ½, que de igual manera será utilizado para la fase.

Controlador Honeywell S89E

El controlador Honeywell es el equipo que se encarga de hacer todas las etapas de la combustión como se describe en el marco teórico, viene totalmente equipado con sus componentes y completamente cableado. Solo es necesario suministrar el circuito de voltaje de línea, termostato y circuito de límite. Todo el cableado debe cumplir con el Código Eléctrico Nacional, el cableado será la misma alimentación del controlador. El quemador está equipado con su propio transformador de 24 V_{AC}, y de igual manera el circuito interno está elaborado por el fabricante.

Controlador de temperatura Dwyer A16

Se selecciona este controlador de costo menor en comparación al Honeywell, como antes se mencionó, este proceso no requiere de un controlador tan preciso para mantener la temperatura constante; sin embargo, este controlador tiene la posibilidad de ejecutar los métodos PID, ON / OFF y ajuste manual, pero para efectos de operación del horno se ejecutará mediante ON / OFF, ya que el quemador opera de esta manera. El A16 ofrece dos salidas independientes para control de bucle doble en acción directa o inversa. Una pantalla LED doble proporciona la indicación local de valor de proceso y valor de punto de ajuste. Las salidas de alarma se pueden configurar rápidamente mediante las trece funciones de alarma incorporadas. Además, en caso de que en un futuro requiera implementar un control más sofisticado o inspeccionar variables, el controlador se comunica con dispositivos externos, como PC y PLC, para integración en sistemas y búsqueda de datos mediante la interfaz RS-485

El suministro de voltaje para este equipo es de 120 V_{AC}.

Termopar de superficie magnética

Debido a la importancia de monitorear la temperatura en el núcleo del motor, debido a la criticidad del proceso y como mejora para evitar los conflictos que se presentaba con el

antiguo horno con la degradación térmica del sistema de aislamiento interlaminar, se procede a investigar sobre termopares que tengan un imán para que pueda conectarse al fondo del estator y además que posean un accesorio flexible.

Los termopares de superficie magnética de la serie M se usan comúnmente para mediciones de temperaturas de superficie de materiales ferrosos. Un potente imán Alnico presiona la punta del sensor con resorte contra la superficie a medir. El imán tiene una fuerza de retención de 16 libras y puede soportar hasta 1000 ° F (535 ° C) sin degradación, el cual se encuentra por encima de la temperatura de operación del horno (535 ° C).

Termopar de superficie magnética tipo K, con extensión de fibra de vidrio de 72", extremos de 3".

También se contemplará otro sensor de temperatura (Termocupla) con cable tipo J, con protección y cubierta de fibra de vidrio, de 5,5 in de largo de conexión ½ NPT, este para llevar el monitoreo de la cámara del horno.

Análisis mecánico estructural

Cálculos en la estructura

Para la estructura del horno es importante destacar que se tomó la decisión de usar tubos estructurales cuadrados de acero A36, de 2" de lado, con un espesor de 1/8".

Por lo general, las estructuras metálicas son diseñadas para soportar cargas secundarias considerables, pero el actual caso plantea una estructura para el cuerpo del horno que le dé mayor solidez al horno en cuanto a soportar pesos mínimos como lo son los de las láminas y aislamientos; además, la estructura debe ser capaz de soportar su propio peso, lo cual evidentemente sería posible usando una armazón con las estructuras sugeridas.

Tabla 8. Dimensiones del horno

Largo	Ancho	Alto
2,35 m	2,0	2,0

Fuente: Elaboración propia.

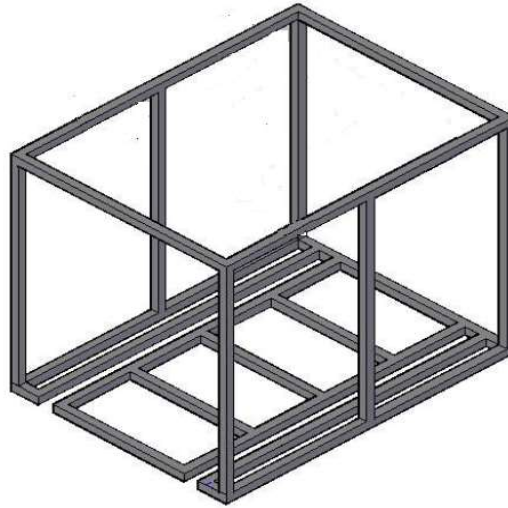


Ilustración 31. Plano cuerpo de tubería estructural del horno

Fuente: Electromotores de Costa Rica LTDA.

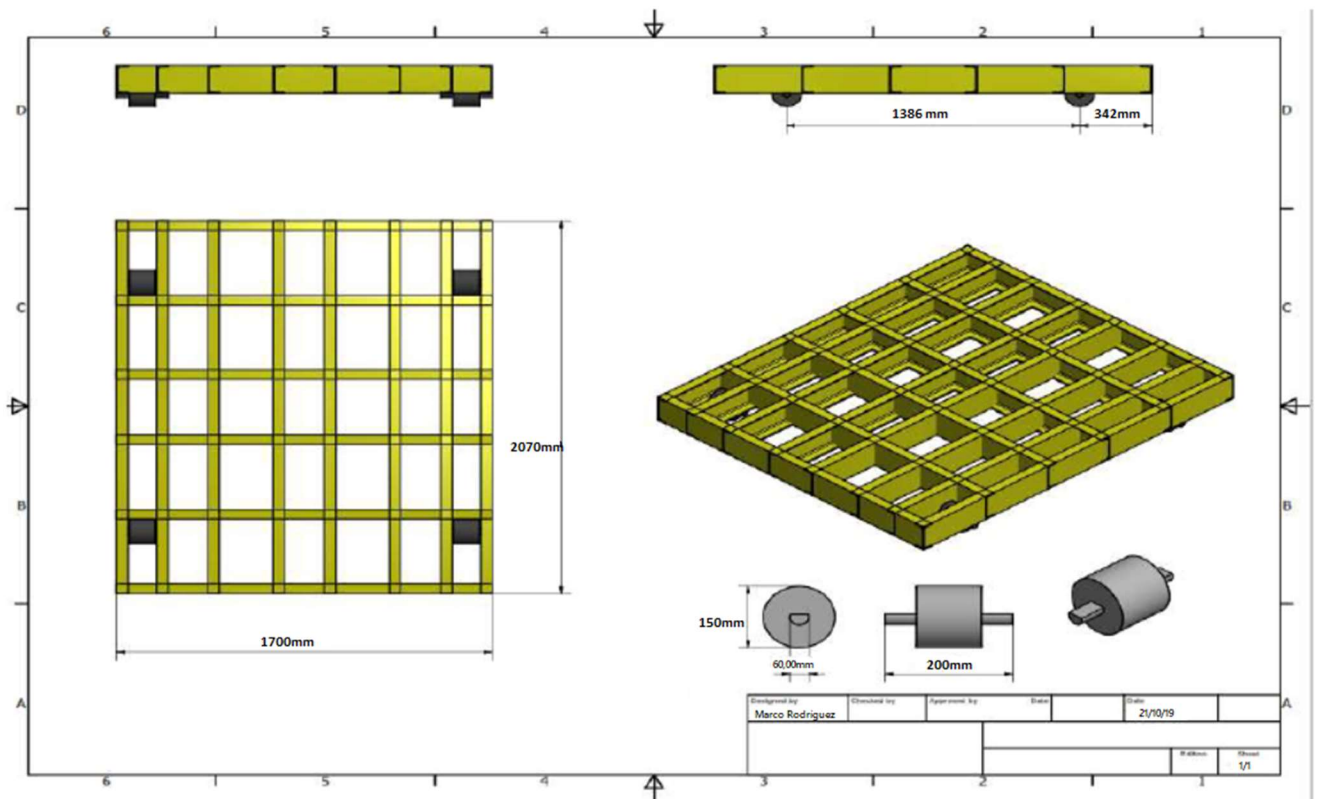


Ilustración 32. Planos de la Carretilla. Elaborado en Inventor

Fuente: Electromotores de Costa Rica

Cálculos en la carretilla

La carretilla propuesta para este proyecto se toma como referencia del modelo elaborado para un horno de marca Steelman (ver Anexo 2), la carretilla contará con un sistema de ruedas de marca Rhombus que soporta 4 Toneladas en cada rueda, de acuerdo a los datos que presenta la ficha técnica (Ver Anexo 8), este sistema cuenta con una pletina de 230 mm que se instalarán en los tubos estructurales y dos rieles que se colocarán en el suelo del horno para darle movimiento ágil de salida y entrada al horno.

La configuración en buena teoría las demás piezas que conforman la carretilla no deberán soportar esfuerzos mayores a los ejercidos en estas vigas. Por lo anterior, el cálculo mecánico facilitará el análisis del perfil de acero necesario que soportará la carga definida.



Ilustración 33. Ruedas de Carga

Fuente: Colson Group

Se contemplará una lámina de acero A36 de espesor de 1/8, del mismo material que los tubos estructurales, para dar mayor soporte en cuanto a la distribución del peso y así posicionar cualquier masa de motores más pequeños, sin que queden fuera del agarre de las vigas.

$$m_T = 4Ton = 4000 \text{ kg}$$

$$F = 4000 \text{ kg} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$F = 39\,240\text{ N}$$

Este peso total que ejerce el estator, ahora bien, analizando estas fuerzas y distribuidas en las cuatro patas se obtiene:

$$F_{\text{Pata}} = \frac{39240\text{ N}}{4} = 9810\text{ N}$$

Este peso es distribuido en el tubo estructural en dos direcciones, que van a ser las dos patas frontales, pero para contemplar un caso más crítico se va a evaluar la dirección de la fuerza en el centro de la viga, donde se evalúa la mayor flexión que puede llegar a tener ese tubo. Para esto se suma la fuerza de las dos patas y se coloca en dirección central, de acuerdo con siguiente diagrama de cuerpo libre.

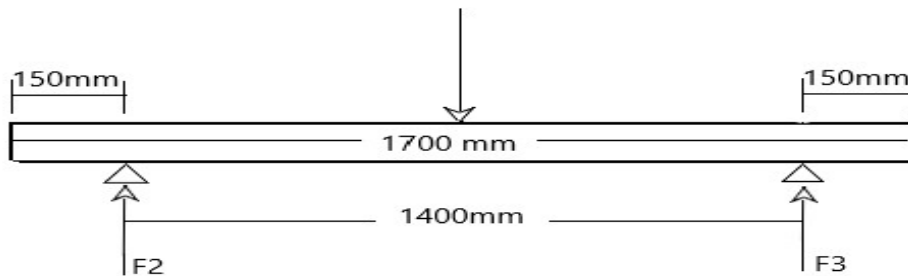


Ilustración 34. Diagrama de Cuerpo Libre Tubo estructural de anchura.

Fuente: Elaboración propia.

$$\sum M_A = 0 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$(F2 * 1400\text{mm}) - (19620\text{ N} * 700\text{mm}) = 0$$

$$F2 = \frac{19620\text{ N} * 700\text{ mm}}{1400\text{ mm}} = 9810\text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_y = F1 - 19620\text{ N} + 9810\text{ N} = 0$$

$$F1 = 9810\text{ N}$$

Después de analizar que la estructura se encuentra en equilibrio de fuerzas, se procede a ejecutar el análisis de fuerza cortante máxima y momento máximo:

Del diagrama se obtiene el valor del cortante máximo en ese tubo estructural, siendo

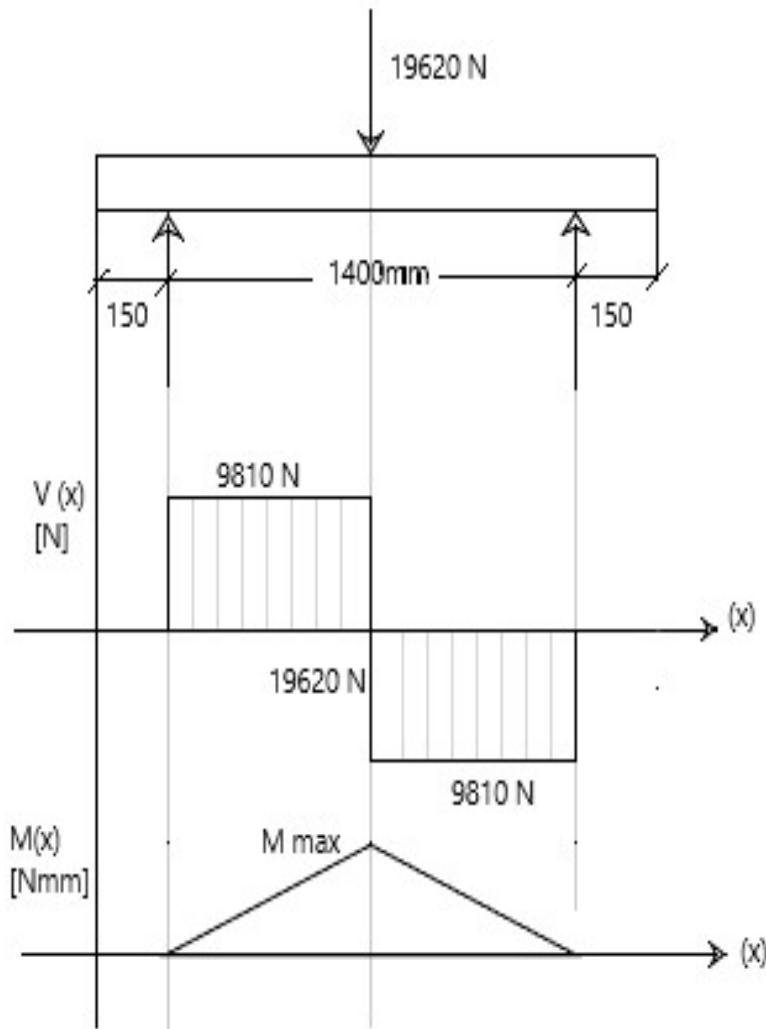


Ilustración 35. Diagrama de fuerzas cortante y momento máximo

Fuente: Elaboración propia.

de 9810 N, de igual manera, por medio de este valor, se analiza el área del cortante, donde se efectúa el siguiente cálculo:

Área del Cortante Máximo

$$M_{\text{máx}} = 9810 \text{ N} * 700 \text{ mm} = 6,87 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

Con el área en el diagrama del cortante se efectúa el análisis del momento máximo obtenido en esa viga, para proceder se analiza el perfil de la viga y sus componentes de importancia para análisis del factor de diseño con el material seleccionado.

Acero A36, 4" x 4" y ¼ espesor

Propiedades del Acero

- Esfuerzo de fluencia: 250 MPa
- Esfuerzo cortante: 145 MPa
- Módulo de elasticidad: 200 GPa
- Coeficiente de expansión térmica: $11,7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$

Se procede a calcular el momento de inercia en el tubo estructural.

$$I_x = \frac{a^4}{12} - \frac{a'^4}{12} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$4 \text{ in} \times 25,4 \text{ mm} = 101,6 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{4} \text{ in} \times 25,4 \text{ mm} = 6,35 \text{ mm}$$

$$I_x = \frac{101,6^4}{12} - \frac{88,9^4}{12} = 3,67 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Una vez obtenido el momento de inercia de la pieza, se analiza el esfuerzo de flexión, tomando en cuenta el centroide de 88,9

$$\sigma_f = \frac{M \max * C}{I} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\sigma_f = \frac{6,87 \times 10^6 \text{ Nmm} * 50,8 \text{ mm}}{3,67 \times 10^6} = 95,09 \text{ Mpa}$$

Se compara el valor calculado respecto al esfuerzo de fluencia, descrito anteriormente para analizar el factor de seguridad del diseño.

$$f.s = \frac{250 \text{ MPa}}{95,09 \text{ MPa}}$$

$$= 2,63$$

Se asume un buen factor de seguridad para este diseño, ya que es importante considerar que la estructura de la carretilla está sobredimensionada en cuanto a flexión se refiere, dado que el análisis es ejecutado con la dirección de la fuerza en un punto de mayor criticidad como lo es el centro.

Se analiza el esfuerzo cortante de la sección transversal, analizando en el centro de esta sección, que es donde se da el máximo cortante, que se describe a continuación con la siguiente fórmula:

$$\tau = \frac{V * y * A_s}{I * t}$$

Ecuación 20

Donde:

- Fuerza cortante máxima: 9810 N
- Centroide del corte de la sección transversal (y): 25,4 mm
- Área de la sección transversal (As): 50,8 mm x 101,6 mm = 5161,28 mm²
- Momento de inercia (I) = 3,67x10⁶ mm⁴
- Sumatoria de espesores $\sum t = 12,7$ mm

$$\tau = \frac{9810 \text{ N} * 25,4 \text{ mm} * 5161,28 \text{ mm}^2}{3,67 \times 10^6 \text{ mm}^4 * 12,7}$$

$$= 27,59 \text{ MPa}$$

$$f.s = \frac{145 \text{ MPa}}{27,59} = 5,25 \text{ MPa}$$

La deformación térmica es un factor muy importante por el que debe ser analizada detenidamente la carretilla, de acuerdo con la deformación unitaria respecto al material y la temperatura expuesta.

$$\Delta L = \alpha * \Delta^\circ F * L$$

Ecuación 21

Donde:

- Deformación lineal (ΔL)
- Coeficiente de expansión térmica (α): $11,7 \times 10^{-6} / ^\circ F$
- Diferencial de temperaturas ($\Delta ^\circ F$)

$$\Delta T = 300 \text{ } ^\circ C - 30 \text{ } ^\circ C = 270 \text{ } ^\circ C$$

Se realiza la conversión y se utiliza el dato en grados Fahrenheit = 518 $^\circ F$ y $L = 1400$ mm

$$\Delta L = 11,7 \times 10^{-6} / ^\circ F * 518 ^\circ F * 1700 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 10,30 \text{ mm}$$

De la deformación lineal obtenida de 10,30 mm, se expresa que el tubo estructural se expande a ese valor, esto quiere decir que la carreta sometida a la temperatura del proceso medirá 1710,30 mm y no habría ningún problema de esfuerzo ejercido contra la pared interna del horno, debido a que esta internamente mide 1885,7 mm.

Costos económicos del proyecto

Tabla 9. Costos del Proyecto

Descripción de Materiales	Modelo	Área	Costo
Cemento Refractario	Super Kast- Set PLUS	Transferencia Calor	₺ 205.434,00
Fibra Mineral	Versaboard	Transferencia Calor	₺ 172.890,00
Quemador	Wayne	Transferencia Calor	₺ 760.250,00
Controlador de Temperatura	Dwyer 16A	Eléctrico	₺ 95.000,00
Termocupla	Tipo RTD	Transferencia Calor / Eléctrico	₺ 35.000,00
Termopar magnético	Dwyer	Transferencia Calor / Eléctrico	₺ 90.000,00
2 disyuntores	Eaton	Eléctrico	₺ 18.000,00
Cableado y Canalización	AWG-EMT	Eléctrico	₺ 60.000,00
Seccionador de 1 polo + Fusibles	Siemens	Eléctrico	₺ 10.000,00
Protecciones motor	STECK	Eléctrico	₺ 7.000,00
Láminas Acero	A36	Estructura Mecánica	₺ 212.000,00
Tubos estructurales	A36	Estructura Mecánica	₺ 552.386,00
Ruedas			₺ 155.000,00
Construcción del horno y Mano de obra	Hora	Cantidad de horas	Total mano de obra
3 Operarios	₺ 2.100,00	47,5	₺ 299.250,00
Total Proyecto			₺ 2.672.210,00

Fuente: Elaboración propia

Estos precios fueron analizados y evaluados respecto a los distintos proveedores, para canalizar la opción más adecuada para el proyecto, en cuanto a precios factibles y equipos de buena calidad.

En algunos casos no fue posible obtener cotizaciones de algunos materiales, se hace referencia en el documento a los precios estimados por los proveedores de manera informal por medio de correos electrónicos, y conforme a las demás cotizaciones se adjuntan en la parte de anexos, se hicieron comparaciones de costos en para definir la mejor opción. De igual manera se contempla los costos de mano de obra y consumo de combustible para la operación del horno. Se hace un análisis de un estimado del horno, en cuanto a componentes

principales, no contempla estimaciones de cantidad y precios de las tuberías de gas y salida escape o chimenea del horno.

Para efectos del análisis financiero, se toma en cuenta un porcentaje de interés que brinda el Banco Nacional, de 14% para un plazo de 8 años. Se evalúa el retorno de la inversión con la ganancia obtenida en cuanto al ahorro en los gastos que poseía el antiguo horno en su operación, como por ejemplo el consumo de combustibles, los costos de reparación de los motores y las horas invertidas en un operario monitoreando la temperatura del proceso.

Para la operación del horno es notable que disminuyen los costos solo a consumo de combustible, que de igual manera se reduce este valor de costos de operación.

En el proceso no se puede predecir gastos fijos, ya que las máquinas que entran al horno no son iguales, por tanto se asume que para máxima carga en los hornos, se van a realizar 2 procesos iguales en un mes, ósea 2 máquinas en las mismas condiciones y se evalúa en un periodo de 4 años.

Tabla 10. Costos de Operación antiguo horno

Costos/proceso	Costos/mes	Meses	Costos/año
Calculo consumo			
₡ 26.987,00	₡ 53.974,00	12	₡ 647.688,00
Reparación de núcleo			
₡ 24.500,00	₡ 49.000,00	12	₡ 588.000,00
Técnico de Reparación			
₡ 41.324,00	₡ 82.648,00	12	₡ 991.776,00
Monitoreo del proceso			
₡ 33.600,00	₡ 67.200,00	12	₡ 806.400,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Costos de operación del horno nuevo

Horno Nuevo			
Costos/proceso	Costos/mes	Meses	Costos/anales
Calculo consumo			
₡ 13.267,00	₡ 26.534,00	12	₡ 318.408,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Flujos de Caja

Fuente: Elaboración propia

Sin proyecto	Años			
	1	2	3	4
Consumo de combustible	₺ 647.688,00	₺ 647.688,00	₺ 647.688,00	₺ 647.688,00
Monitoreo del Proceso	₺ 806.400,00	₺ 806.400,00	₺ 806.400,00	₺ 806.400,00
Reparación núcleo	₺ 1.579.776,00	₺ 1.579.776,00	₺ 1.579.776,00	₺ 1.579.776,00
Total	₺ 3.033.864,00	₺ 3.033.864,00	₺ 3.033.864,00	₺ 3.033.864,00

Con proyecto	Años			
	1	2	3	4
Consumo de Combustible	₺ 318.408,00	₺ 318.408,00	₺ 318.408,00	₺ 318.408,00
Total	₺ 318.408,00	₺ 318.408,00	₺ 318.408,00	₺ 318.408,00

Diferencia				
₺2.672.210,00	₺ 2.715.456,00	₺ 2.715.456,00	₺ 2.715.456,00	₺ 2.715.456,00

Tabla 13. Resultados del Análisis Financiero

VAN	₺ 5.239.847,56
TIR	95%

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en los resultados el ejecutar el proyecto es muy factible, incluso en el análisis se observa que la recuperación de la inversión se da en el primer año, dando como resultado un valor actual neto de ₺ 5.239.847,56 y una tasa interna de retorno de 95%.

Comentarios

Como se observa en el desarrollo de este proyecto, se consigue mejorar puntos importantes para la demanda de producción, donde se aumenta 2,5 veces la capacidad del volumen del horno. De igual manera, por medio de los cálculos de transferencia de calor se evalúan las pérdidas transferidas al exterior, por ende se selecciona un quemador que aparte de cumplir con la demanda de calor para las masas internas del horno, sea capaz de suplir las pérdidas que generará en el proceso.

Se determinó que para un tiempo de 8 horas de proceso, el antiguo horno consumía 45 kg, o sea, un cilindro completo de 100 lb de gas, para una masa de 1,5 Ton y en el caso de este proyecto se observa que disminuye el consumo de combustible del horno actual a 55%, dando 25 kg de gas y con una masa aún mayor que la capacidad del actual, siendo 4 Ton, por tanto se mejora el consumo de combustible, se eleva la capacidad del horno y se acorta el tiempo del proceso, dando como resultado un horno muy eficiente.

Se desarrolló el sistema de control de temperatura que le dará soporte al controlador del quemador HSG 400, para monitorear ya sea un rango de temperatura cercano a los 300 °C o constantes es el Dwyer A16, con la posibilidad de ejecutar los métodos PID, ON / OFF y ajuste manual, es importante considerar que se implementó un sensor tipo termocupla de superficie magnética, para colocarlo en el núcleo del motor, para monitorear la transferencia de calor al laminado y su aislamiento, ya que es el componente más crítico para este proceso.

Se diseña la carretilla con perfiles de tubo estructural 4'' x 4'' y espesor de $\frac{1}{4}$ para utilizar un factor de seguridad de 2,63 en flexión y con las direcciones de la fuerza sobredimensionando esta variable, en esfuerzo cortante se determinó un valor por encima de 5 en factor de diseño.

Conclusiones

Se determinó el diseño electromecánico óptimo del horno de quemado para el proceso de extracción de alambre en motores por rebobinar, mediante la mejor relación costo-beneficio en la empresa Electromotores de Costa Rica, ubicada en Coyoil de Alajuela.

Se definió que los requerimientos del proceso respecto a las necesidades actuales y futuras de la empresa eran aumentar la capacidad del horno y de carga, que se consigue elevar 2,5 veces el volumen de este y la carga se aumenta 2,67 veces. De igual manera el tiempo del proceso se logra disminuir porque para una carga mucho más elevada se dura ocho horas, esto quiere decir que, para máquinas mucho más pequeñas, duraría menos tiempo del que requerían anteriormente, siendo de dos horas de arranque del quemador y seis horas de proceso, de acuerdo con esto se procedió a calcular la estimación de costos de combustible disminuyendo 55% del gasto de este, en comparación con el antiguo horno.

Se estableció que el tipo de aislamiento térmico por utilizar mediante el análisis de resistencia térmica es la fibra mineral de espesor de dos pulgadas para las paredes y cemento refractario para el suelo con espesor de tres pulgadas, recomendado por proveedores, en las cuales se comparaban las pérdidas de calor calculadas para los diferentes espesores y se observaba el comportamiento económico en cuanto a la diferencia de costos entre ellos, para sí requerir de menor consumo de combustible de acuerdo con la potencia requerida del proceso.

Se determinó la lógica de control que llevará el quemador, siendo este Honeywell S89E que vendrá instalado en el equipo, y se implementó un sistema de control de temperatura con monitoreo ON/OFF y un sensor de temperatura magnético que se ajustará al núcleo del motor para monitoreo de este y una termocupla para la cámara del horno, el cual dará mayor seguridad al proceso de quemado, para asegurar el cumplimiento de los requerimientos del proceso.

Se estipuló la inversión necesaria del proyecto contemplando materiales y mano de obra, dando como resultado ₡2.672.210,00 y se observa mediante el análisis financiero de

costos que la recuperación del proyecto se logra conseguir en el primer año de operación del horno.

Recomendaciones

1. Se recomienda verificar constantemente, en la operación del horno, la temperatura crítica en el núcleo estatórico, para llevar mejor control del proceso.
2. Se recomienda verificar las emisiones de gas con equipos importantes de medición, así como el estudio de cómo mejorar el proceso para la carbono neutralidad y ayudar a evitar el calentamiento global.
3. Se recomienda etiquetar todos los cables antes de desconectarlos, cuando se realice el mantenimiento de los controles. Los errores de cableado pueden causar una operación incorrecta y peligrosa. Verificar el funcionamiento correcto después del servicio.
4. Consultar el manual de instalación del quemador para la instalación de los distribuidores y tuberías, que transportan el combustible, acorde a la potencia del quemador, en este caso 400 000 BTU / hr.
5. Se recomienda realizar una investigación más a fondo de los parámetros de diseño de cómo mejorar el proceso, de igual manera consultar el manual de instalación del quemador y el decreto 39813-S del Reglamento de configuración en sitios de muestreo en chimeneas y ductos, para instalación de una chimenea en el horno y un sistema contra incendios de acuerdo con la NFPA.

Referencias Bibliográficas

- Agua Market. (Santiago de Chile). Agua Market. Obtenido de Agua Market:
<https://www.aguamarket.com/productos.p.rodutos.asp?producto=3925>
- Çengel, Y. A. (2011). *Tranferencia de Calor y Masa*. 4a ed. México: McGraw-Hill.
- Donald G. Fink, H. W. (1981). *Manual práctico electricidad ingenieros*. Reverté SA.
- EcuRed. (s.f.). *Gradiente de temperatura*. Obtenido de EcuRed:
https://www.ecured.cu/Gradiente_de_temperatura
- Fasar Electronica S.R.L. (Ancona, Italia). *Sistemas electrónicos de control para hornos profesionales e industriales*. Obtenido de fasarelectronica.com:
<http://www.fasarelectronica.com/es.p.rodutos/sistemas-electronicos-de-control-para-hornos-profesionales-e-industriales>
- Ferdinand P. Beer, E. R. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros*. 9ª ed. México: McGrawHill.
- Jiménez, F. (2007). *Ingeniería Económica*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Honeywell. (1999). Módulos de Relé SERIE 7800. *Control de Flama Honeywell*.
- Mc Graw Hill Education. (s.f.). *MH Education*. Obtenido de MH Education:
<https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>
- Mete, M. R. (7 de julio de 2013). *Scielo.org*. Obtenido de Scielo.org:
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2014000100006
- Mora, J. F. (2003). *Máquinas Eléctricas V edición*. Madrid: Concepción Fernández Madrid.
- Núñez, O. (2013). *Motor Tico*. Obtenido de Motor Tico:
<http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2013%20JUN%20-%20Prueba%20al%20Nucleo%20Laminado%20de%20Estator.pdf>

Pardo, C. (2013). *Picuino*. Obtenido de Picuino:
<https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>

Reglamento Sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Porvenientes de Calderas y Hornos de Tipo Indirecto, Capítulo 1 (Decreto Ejecutivo No. 26789-MTSS 2 de Abril de 1998).

SAS, I. (s.f.). Protección pasiva contra incendios. *Ingeniería Montaje Aislamientos y Combustión*.

Spark, W. (S/F). *Weather Spark*. Obtenido de Weather Spark:
<https://es.weatherspark.com/y/15529/Clima-promedio-en-Alajuela-Costa-Rica-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Steelman Industries, Inc. (Texas de 2019). *Steelman.com*. Obtenido de Steelman.com:
<https://www.steelman.com/product-category/industrial-process-ovens/>

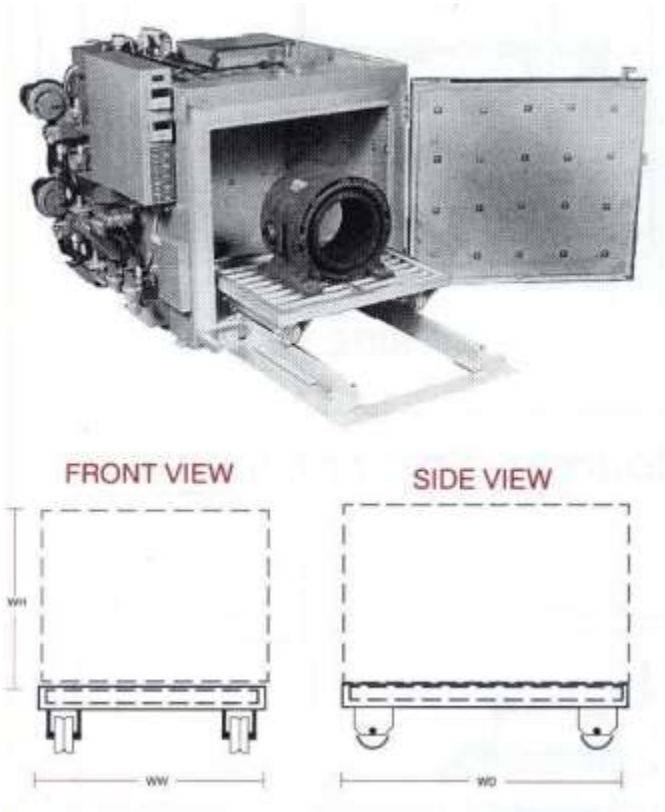
Steelman Industries, Inc. (2019). *Steelman.com*. Obtenido de Steelman.com:
<https://www.steelman.com/product-category/industrial-process-ovens/>

Tei Ingeniería. (2010). *Tei Ingeniería de México*. Obtenido de Tei Ingeniería de México:
<http://www.teii.com.mx/controles-temperatura.html>

Vargas, C. (Ingeniería en Montajes Aislamientos y Combustión). *Aislamientos técnicos para hornos industriales*. Obtenido de Academia. Edu:
https://www.academia.edu/12085929/AISLAMIENTOS_TERMICOS_PARA_HORNOS_INDUSTRIALES?auto=download

Villajulca, J. C. (18 de junio de 2019). *Instrumentación y Control*. Obtenido de
<https://instrumentacionycontrol.net/control-on-off-o-todo-nada/>

Anexo 2. Modelo de carretilla para hornos Steelman



Anexo 3. Plantilla de Excel del cálculo de transferencia de calor

Datos del Horno						
Largo (m)	ancho (m)	alto (m)	Volumen m ³	Area Horno m ²	Area Placa Plana lateral m ²	Area Placa Plana frontal m ²
2,35	2	2	9,40	26,80	4,70	4,70
Vista desde la puerta del Horno						
Placa lateral derecha y superior						
Lado Exterior del Horno						
T °C	Velocidad aire(m/s)	U m ² /s	Largo de la Placa m	Re	Pr	Nu
30	1,38	0,00001608	2,35	201679,10	0,7382	268,28
300	1,38	0,00004765	2,35	68058,76	0,6935	153,33
K aire W/m ² ·C	h W/m ² ·C					
0,0259	2,9545					
0,04418	2,8826					
Placa Metal						
Tipo de Aislamiento	Espesor (m)	K W/m ² ·C	Tipo Metal	Espesor (m)	K W/m ² ·C	
Fibra Mineral Refractorio	2	0,0508	Acero Negro A36	0,06	60,5	
Fibra Cerámica	4	0,1016	Acero Inoxidable AISI 304	0,375	16	
			Acero A36	0,375	0,0095	
Resistencia Convección externa	Resistencia Conducción Placa Metal	Resistencia Conducción Aislamiento	Resistencia Conducción Placa Metal	Resistencia Térmica Total	T _{ext} °C	Q externa [W]
0,0720	0,00001	0,2275	0,00001	0,2596	300	901,38

Anexo 4. Ubicación y posición del horno en vista de la exposición al viento



Posición del horno en vista desde exterior



Puerta oeste, a 10 m del horno

Anexo 5. Ficha Técnica Quemador Wayne HSG 400

Specifications

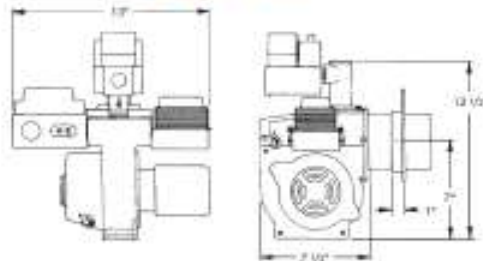
200/400 GAS BURNER

HSG 200 - 60M Btu/hr to 200M Btu/hr
HSG 400 - 200M Btu/hr to 400M Btu/hr

THE BLUE ANGEL™ POWER GAS BURNER - MODEL HSG

Capacities	Firing rates from 60M through 400M Btu/hr.
Fuel	Natural or LP Gas 2" to 4" water column - adjustable.
Controls	24-volt combination control 3/4" IPS, with redundant valve. Flamerod sensor 4 second safety shutdown.
Ignition	Direct spark ignition 7300-volt ignition transformer. Remove top cover for easy access to ignition components.
Motor	3450 RPM - 115V - 2.4A.
Fan Housing	Aluminum alloy, die cast housing. Maintains alignment of all moving parts throughout the lifetime of the burner.
Mounting	Adjustable flange (pedestal mount available.)
Air Tube	4" OD available in standard lengths of 6", 9" and 12".
Combustion Head	Stainless steel, precision stamping. No change for entire firing range.

DIMENSIONS



MOUNTINGS



Complete Burner:

All BLUE ANGEL Model HSG flame retention gas burners are supplied completely assembled and testfired. Additional orifices supplied. Combination redundant gas valve and ignition control package installed. The models at right include an adjustable flange with gasket as standard and are available for immediate shipment.

Shipping Information:

- Individually cartoned
- Weight: 26 lbs.
- 18 burners per pallet

ORDERING INFORMATION

Part No.	Model No.	Tube Length	Capacity - M Btu/hr
62376C	HSG 200	6"	60-200
62377C	HSG 400	6"	200-400
62378C	HSG 200	9"	60-200
62379C	HSG 400	9"	200-400
62380C	HSG 200	12"	60-200
62381C	HSG 400	12"	200-400



Anexo 6. Cotización HSG 400



Cédula Jurídica: 3-101-005756
 San José, Costa Rica, Calle 2 - Ave 16/18
 150mts norte entrada principal Ferrocarril al Pacífico.
 Tel. (506) 2257 6464. Fax. (506) 2222 1111 Apdo. 4366-1000 | www.setec-cr.com

Cotización CRM-201911-8968
 04-Nov-2019

Sres:	Electromotores de costa rica Jairo Gomez	Código Cliente:	
Fax:	70405788	Asesor:	Ramiro Vargas
E-mail:	jairo.gomez@electromotores.com	Vendedor:	
		Tel:	+50683958538
		E-mail:	rvargas@setec-cr.com

Cant.	Descripción	Código	Precio Unidad	Desc.	Importe
1	QUEMADOR PARA GAS DE 200.000 A 400.000 BTUH 120 VOLTIOS, TOMA DE 3/4" NPT, RECIBE 1/2 PSI. MODELO HSG-400 MODELO HSG-400, PARTE NO. 62379C	62379	¢ 760,250.00	0.00 %	¢ 760,250.00
1	CONTROL DE TEMPERATURA ELECTRONICO DIGITAL, RECIBE TERMOCUPLA TIPO J O K. CON SALIDA CONTACTO DE RELAY, MARCA HONEYWELL U.S.A. MODELO DC-1010CT-111-	DC1010CT-111-000-E	¢ 255,730.00	0.00 %	¢ 255,730.00
3	PIES CABLE TERMOCUPLA TIPO J, CON CUBIERTO FIBRA DE VIDRIO	J-FB/FB-20F	¢ 680.00	0.00 %	¢ 2,040.00
Serv.	(1) termocupla tipo J 5.5" de largo conexión 1/2NPT	Servicio	¢ 98,500.00	0.00 %	¢ 98,500.00

Total Producto	¢ 1,116,520.00
Descuento	¢ 0.00
Subtotal	¢ 1,116,520.00
I.V.A.	¢ 145,147.60
Colones - Total	¢ 1,261,667.60

Anexo 7. Cotización tubo estructural para carretilla y horno

Cotización No. 2000140160

15.11.2019

DISTRIBUIDORA
METALCO®
Por encima de todo

www.metalco.net

22471100

Página 1 de 1

Nacional

Cliente: 614000000 JAIRO GOMEZ

Fecha de pedido :15.11.2019

FaxNo. (506)2247-1100

e-Mail:

Condición Pago:CONTADO

Dirección de envío: 200 N DE ESC. RAFAEL VARGAS QUIROS

Ciudad: Tibás

País: CR

Moneda: CRC

Comentarios:

Estado del pedido:

Código	Descripción del Item	Cant.Pedida	Unid	Peso	PrecioUnit	Total
102730	Tubo Estructural Cuadrado Caliente 72 x 3.17 mm 6.00 m	6.00	UN	253.52	37,820.0000	226,920.00
102728	Tubo Estructural Cuadrado Caliente 90 x 3.17 mm 6.00 m	18.00	UN	526.75	26,190.0000	471,420.00

Total Peso Neto : 780.27

SUBTOTAL: 698,340.00
Descuento: 209,502.00
Impuesto: 63,548.94
Total General: 552,386.94

PRECIOS SUJETOS A CAMBIOS IMPREVISTOS.

NOTA: En caso de cancelación por medio de cheque, favor girarlo a nombre de DISTRIBUIDORA METALCO S.A.
Vigencia 1 día calendario. Sujeto a disponibilidad.

Anexo 8. Ficha Técnica Ruedas de la carreta

JWCU 3003 60702



Datos Técnicos

Diámetro		300 mm
Ancho de banda de rodadura		2x70 mm
Altura		375 mm
Desplazamiento		83 mm
Dimensión pletina		230x230 mm
Diámetro agujeros pletina		19 mm
Distancia entre agujeros pletina		190x190 mm
Carga		4000 kg



A company of Colson Group
RHOMBUS Rollen Holding-GmbH, Industriestraße 8, D-42499 Hückeswagen,
Tel. +49 2192 9368-0, Fax +49 2192 9368-477, info@rhombus-rolien.com