



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
MECÁNICA ELÉCTRICA**

Optimización de un horno eléctrico con control de temperatura para
mejorar el nivel de aislamiento en bobinas de motores eléctricos
hasta 300 HP.

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Mecánico Electricista**

AUTORES:

Sanchez Ramos, Nicolay (ORCID:0000-0003-4617-6899)
Sucasaire Villanueva, Walter Kevin (ORCID:0000-0002-5040-2847)

ASESORA:

Mg. Armas Alvarado Maria Elisia (ORCID: 0000-0003-4081-7755)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Modelamiento y simulación de sistemas electromecánicos.

TRUJILLO – PERÚ

2021

DEDICATORIA

A Dios quien me guía y protege. A mi esposa, a mis hijos por su amor y constante apoyo en el transcurso de este proyecto. A mis padres por su ejemplo de esfuerzo y valentía para enfrentar la vida.

Sánchez Ramos, Nicolay

Dedico a Dios, ya que, sin él, nada de esto sería posible. A mis padres, por su apoyo incondicional, a mi hermana por siempre estar pendiente de cada avance. A mi futura esposa Estelita Miranda y a mi bebe que está en camino quien son ahora mi principal fuente de motivación e inspiración.

Sucasaire Villanueva, Walter Kevin

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la familia, la salud, los amigos y por permitirme culminar esta etapa de mi formación profesional.

A mis compañeros que compartieron sus conocimientos alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante estos cinco años me apoyaron para que este sueño se haga realidad.

A la universidad Cesar Vallejo y a sus diferentes docentes personas de gran sabiduría que gracias a sus conocimientos y dedicación lograron importantes objetivos como culminar mi carrera con éxito.

Sánchez Ramos, Nicolay

Un agradecimiento muy profundo para toda mi familia porque sin su paciencia, comprensión y apoyo no hubiese sido posible culminar mi tesis. A mis padres Walter y Sandra, por ser los principales promotores para cumplir mi anhelo y por nunca perder sus expectativas en mí, por sus buenos principios y valores que me han influido. Un agradecimiento especial para mi tía Trinidad Marchena Briceño por su apoyo incondicional en toda mi etapa profesional.

Agradezco a los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Cesar Vallejo que nos apoyaron con sus enseñanzas, conocimientos y experiencias a lo largo de mi etapa universitaria. Al ingeniero Walter Castro por su paciencia y valioso aporte para el desarrollo de nuestra tesis.

Sucasaire Villanueva, Walter Kevin

Índice de contenidos

Dedicatoria	i
Agradecimiento	iii
Índice.....	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	14
II. MARCO TEÓRICO	17
III. METODOLOGÍA.....	36
3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	36
3.2. VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN	38
3.2.1. <i>Variables Dependientes</i>	38
3.2.2. <i>Variables Independientes</i>	38
3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO	39
3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	39
3.5. PROCEDIMIENTOS.....	39
3.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS	40
3.7. ASPECTOS ÉTICOS	40
IV. RESULTADOS	41
4.1. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN ÓPTIMA DE UN HORNO ELÉCTRICO PARA SECADO DE BOBINAS	41
4.1.1. <i>Planeación del producto</i>	41
4.1.2. <i>Desarrollo del concepto</i>	41
4.1.3. <i>Evaluación de conceptos</i>	56
4.2. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE HORNO ELÉCTRICO	57

4.2.1.	<i>Análisis de energía almacenada.....</i>	59
4.2.2.	<i>Cálculo de energía perdida por las paredes y el techo.....</i>	86
4.2.3.	<i>Cálculo de energía total requerida.....</i>	87
4.3.	OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL HORNO ELÉCTRICO	88
4.3.1.	<i>Cargas.....</i>	88
4.3.2.	<i>Combinaciones de carga.....</i>	91
4.3.3.	<i>Cálculo de momentos y fuerzas cortantes.....</i>	93
4.3.4.	<i>Criterio de fluencia por flexión según norma técnica peruana E.090 104</i>	
4.3.5.	<i>Criterio de fluencia por corte según norma técnica peruana E.090</i>	106
4.3.6.	<i>Optimización de la sección de la estructura en SolidWorks</i>	107
4.4.	DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES ELÉCTRICOS	115
4.4.1.	<i>Esquemas para secado con convección natural y radiación</i>	115
4.4.2.	<i>Parámetros eléctricos del circuito de potencia - caso convección natural</i>	119
4.4.3.	<i>Esquemas para secado por convección forzada</i>	121
4.4.4.	<i>Parámetros eléctricos del circuito de potencia - caso convección forzada</i>	127
4.5.	PLANOS DE FABRICACIÓN DE SECADOR OPTIMIZADO	131
4.6.	PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	135
4.6.1.	<i>Medición previa al mantenimiento de un motor de 4 Hp.....</i>	136
4.6.2.	<i>Secado de un motor de 4 Hp en horno sin aire forzado</i>	137
4.6.3.	<i>Medición post mantenimiento sin aire forzado.....</i>	138
4.6.4.	<i>Medición previa al mantenimiento de un motor de 25 Hp.....</i>	139
4.6.5.	<i>Secado de un motor de 20 Hp en horno con aire forzado</i>	140
4.6.6.	<i>Medición post mantenimiento con aire forzado</i>	141
4.6.7.	<i>Registro de temperaturas</i>	144
V.	DISCUSIÓN.....	145
VI.	CONCLUSIONES.....	149
VII.	RECOMENDACIONES	153
	REFERENCIAS.....	154

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Operacionalización de variables.</i>	38
Tabla 2. <i>Técnica e instrumentos.</i>	39
Tabla 3. <i>Necesidades identificadas para optimizar el diseño actual del horno eléctrico secador de bobinas en la empresa Electromecánica Tesla.</i>	42
Tabla 4. <i>Lista de métricas para el horno eléctrico secador de bobinas en la empresa Electromecánica Tesla.</i>	43
Tabla 5. <i>Matriz de relación de necesidades y métricas para la optimización del horno eléctrico secador de bobinas en la empresa Electromecánica Tesla.</i>	44
Tabla 6. <i>Lista de proveedores de horno eléctrico y su origen.</i>	44
Tabla 7. <i>Valores de métricas de la competencia.</i>	45
Tabla 8. <i>Valores objetivos de la optimización del diseño del horno eléctrico secador de bobinas en la empresa Electromecánica Tesla.</i>	46
Tabla 9. <i>Tabla de combinación de materia 1.</i>	49
Tabla 10. <i>Tabla de combinación de materia 2.</i>	49
Tabla 11. <i>Tabla de combinación de energía y señal.</i>	50
Tabla 12. <i>Matriz de selección de conceptos de la parte mecánica.</i>	56
Tabla 13. <i>Energía almacenada para secado de bobina de 500 mm de diámetro en 2 horas.</i>	85
Tabla 14. <i>Energía total para secado con convección natural y forzada.</i>	87
Tabla 15. <i>Resumen de cargas totales en la estructura del secador a optimizar.</i> ..	90
Tabla 16. <i>Valores mínimos aceptables de resistencia de aislamiento. Fuente: IEEE 43-2000.</i>	135
Tabla 17. <i>Índice de polarización. Fuente: IEEE 43-2000.</i>	135
Tabla 18. <i>Registro de temperaturas para convección natural y forzada.</i>	144

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Optimización y el proceso de diseño. (Childs, 2004).....	20
<i>Figura 2.</i> Partes de un horno para cuadro de resinas. (PREMAC, 2020).....	21
<i>Figura 3.</i> Esquema del sistema secador eléctrico. (Costa & Ferreira, 2007)	22
<i>Figura 4.</i> Dimensiones de motor WEG 300 HP. (WEG, 2014)	22
<i>Figura 5.</i> Lana mineral en placa y rollo. (Imperbe, 2020)	23
<i>Figura 6.</i> Aislamiento térmico de fibra de vidrio. (Aislasur, 2020).....	24
<i>Figura 7.</i> Tipos de resistencias de potencia para aire, a) resistencia con aletas rectas, b) resistencia con aletas helicoidales, c) batería de resistencia con aletas rectas y d) batería con aletas helicoidales. (Brototermic, 2020)	25
<i>Figura 8.</i> PLC Twido con módulo de entrada analógico. (Schneider Electric, 2020)	26
<i>Figura 9.</i> Elemento volumen para análisis de conducción de calor. (Holman, 2002)	27
<i>Figura 10.</i> Temperaturas en la capa límite convección sobre placa. (Cengel & Ghajar, 2011)	28
<i>Figura 11.</i> Radiación de superficie a superficie circundante. (Cengel & Ghajar, 2011)	29
<i>Figura 12.</i> Modelo para el cálculo de parámetros de un gas en el interior de una caja adiabática, con circulación de aire e ingreso de calor por una resistencia. (Massoud, 2005)	30
<i>Figura 13.</i> Variación de la deformación frente a la tensión aplicada en un ensayo de tracción del acero AISI 304 a diferentes temperaturas. (Corrêa Soares, Mendes Rodrigues, & de Arruda Santos, 2017).....	32
<i>Figura 14.</i> Resistencia a la fluencia en función de la temperatura del acero AISI 304. (Corrêa Soares, Mendes Rodrigues, & de Arruda Santos, 2017).....	32
<i>Figura 15.</i> Unión a tope típica sometida a tensión. (Shigley, 2008)	34
<i>Figura 16.</i> Unión a tope típica sometida a corte. (Shigley, 2008).....	34
<i>Figura 17.</i> Simbología para soldadura según AWS. (Shigley, 2008).....	35
<i>Figura 18.</i> Diseño de investigación.	37
<i>Figura 19.</i> Black box de horno eléctrico secador de bobinas de hasta 300 HP. ..	47
<i>Figura 20.</i> Estructura de funciones para optimizar el horno eléctrico secador de bobinas de hasta 300 HP.	48

<i>Figura 21.</i> Bosquejo de alternativa de solución MA.	52
<i>Figura 22.</i> Bosquejo de alternativa de solución MB.	53
<i>Figura 23.</i> Bosquejo de alternativa de solución MC.	55
<i>Figura 24.</i> Parámetros de estudio de transferencia de calor en horno con secado por convección natural y radiación.	57
<i>Figura 25.</i> Parámetros de estudio de transferencia de calor en horno de secado por convección forzada y radiación.	58
<i>Figura 26.</i> Diagrama de Zankey del flujo de energía en la cámara de secado. ...	59
<i>Figura 27.</i> Idealización de bobina de motor para el modelo de cálculo propuesto.	59
<i>Figura 28.</i> Resultados de programa en MATLAB para el cálculo de la velocidad, número de Reynolds y Nusselt en el proceso convectivo en la cámara.....	63
<i>Figura 29.</i> Curva coeficiente de transferencia por diámetro vs longitud, para una potencia de 5044.95 W, temperatura inicial de bobina de 30°C y del aire 200°C.	64
<i>Figura 30.</i> Curva coeficiente de transferencia por diámetro vs velocidad por diámetro potencia de 5044.95 W, temperatura inicial bobina de 30°C y aire 200°C.	65
<i>Figura 31.</i> Curva coeficiente de transferencia por diámetro vs temperatura de superficie para potencia de 5044.95 W, temperatura inicial de 30°C y aire 200°C.	66
<i>Figura 32.</i> Curvas de coeficiente y velocidad potencia de 6505.92 W, temperatura inicial bobina de 30°C y aire 200°C.....	67
<i>Figura 33.</i> Curva coeficiente de transferencia por diámetro vs temperatura de superficie para potencia de 6505.92 W, temperatura inicial de 30°C y aire 200°C.	67
<i>Figura 34.</i> Temperatura en función del tiempo para una bobina de 700 mm de largo, 500 mm de diámetro, potencia consumida 5044.95 W, temperatura inicial 30 °C, temperatura de aire de 200°C en un tiempo de secado de 2 horas.	68
<i>Figura 35.</i> Temperatura en función del tiempo para una bobina de 700 mm de largo, 500 mm de diámetro, potencia consumida 6505.92 W, temperatura inicial 30 °C, temperatura de aire de 200°C en un tiempo de secado de 2 horas.	69
<i>Figura 36.</i> Dimensiones para bobina con diámetro máximo de 500 mm.....	70

<i>Figura 37.</i> Flujo de aire alrededor de bobina para determinar caudal proporcionado por el ventilador centrífugo.....	71
<i>Figura 38.</i> Conducción unidimensional en pared aislante bañada por aire a diferente temperatura por ambos lados.....	73
<i>Figura 39.</i> Gráfica de la temperatura en función del tiempo como resultado de 240 cálculos por cada 30 segundos de intervalo considerado según el criterio de estabilidad para el método explícito.	78
<i>Figura 40.</i> Parámetros para calcular la energía almacenada en el techo.	79
<i>Figura 41.</i> Gráfica de la temperatura de los nodos del techo en función del tiempo como resultado de 240 cálculos por cada 30 segundos de intervalo considerado según el criterio de estabilidad para el método explícito.	84
<i>Figura 42.</i> Esquema con parámetros para el cálculo de pérdidas por convección y radiación, tanto en pared como en techo.	86
<i>Figura 43.</i> Marco simplificado de la estructura.....	91
<i>Figura 44.</i> Combinación de carga 1, D.....	91
<i>Figura 45.</i> Combinación de carga 2, D+L.....	92
<i>Figura 46.</i> Combinación de carga 2, D+L.....	92
<i>Figura 47.</i> Diagrama momentos flectores en el marco, combinación 1.....	96
<i>Figura 48.</i> Diagrama de fuerza cortante en el marco, combinación 1.	97
<i>Figura 49.</i> Diagrama de fuerza cortante en el marco, combinación 2.	97
<i>Figura 50.</i> Diagrama de fuerza cortante en el marco, combinación 2.	98
<i>Figura 51.</i> Diagrama de momento flector en el marco, sismo.	102
<i>Figura 52.</i> Diagrama de fuerza cortante en el marco, sismo.	103
<i>Figura 53.</i> Diagrama de momento flector en el marco, combinación de carga 3.....	104
<i>Figura 54.</i> Diagrama de momento flector recalculado para la sección U4x5.4... ..	105
<i>Figura 55.</i> Modelo marco en SolidWorks.	107
<i>Figura 56.</i> Modelo marco en SolidWorks.	108
<i>Figura 57.</i> Modelo marco en SolidWorks.	108
<i>Figura 58.</i> Combinación de cargas en modelo marco en SolidWorks.	109
<i>Figura 59.</i> Mallado marco en SolidWorks.....	109
<i>Figura 60.</i> Esfuerzos de Von Mises para la combinación de carga 3, en SolidWorks.	110
<i>Figura 61.</i> Desplazamientos para la combinación de carga 3, en SolidWorks... ..	110

<i>Figura 62.</i> Esfuerzos normales en dirección paralela al eje longitudinal de elementos AB y CD para la combinación de carga 3, en SolidWorks.	111
<i>Figura 63.</i> Esfuerzos normales en dirección paralela al eje longitudinal del elemento BC para la combinación de carga 3, en SolidWorks.	111
<i>Figura 64.</i> Factor de seguridad del modelo del marco para la combinación de carga 3, en SolidWorks.	112
<i>Figura 65.</i> Variables de optimización del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.	113
<i>Figura 66.</i> Restricción de optimización del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.	113
<i>Figura 67.</i> Objetivos de optimización del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.	113
<i>Figura 68.</i> Resultados de optimización 1 del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.....	114
<i>Figura 69.</i> Resultados de optimización 2 del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.....	114
<i>Figura 70.</i> Circuito de potencia para secado por radiación y convección natural.	115
<i>Figura 71.</i> Circuito de mando para secado por radiación y convección natural.	116
<i>Figura 72.</i> Conexión de controlador de temperatura para secado por radiación y convección natural.	117
<i>Figura 73.</i> Estado del circuito en funcionamiento para una lectura de temperatura por debajo del valor programado para secado por radiación y convección natural.	118
<i>Figura 74.</i> Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de control (parte 1).	122
<i>Figura 75.</i> Circuito de mando para secado por convección forzada.....	123
<i>Figura 76.</i> Conexión de variador de frecuencia con configuración por frecuencias fijas, con 3 combinaciones.	124
<i>Figura 77.</i> Circuito de potencia para secado por convección forzada.	125
<i>Figura 78.</i> Captura de la simulación con el variador en combinación 1.	126
<i>Figura 79.</i> Captura de la simulación con el variador en combinación 2.	126
<i>Figura 80.</i> Estructura principal de horno secador optimizado.....	131

<i>Figura 81.</i> Esfuerzo normal en la estructura.....	131
<i>Figura 82.</i> Estructura interior y exterior del horno secador.....	132
<i>Figura 83.</i> Simulación de estructura interior y exterior del horno secador.....	132
<i>Figura 84.</i> Estructura interior y exterior del horno secador.....	133
<i>Figura 85.</i> Plano de fabricación de la estructura del horno secador.....	133
<i>Figura 86.</i> Medición resistencia de aislamiento fase-tierra antes de mantenimiento.	136
<i>Figura 87.</i> Temperatura de secado en horno sin aire forzado.....	137
<i>Figura 88.</i> Estator en posición vertical en el interior de horno sin aire forzado. .	137
<i>Figura 89.</i> Medición resistencia de aislamiento para secado sin aire forzado de estator de 4 Hp.....	138
<i>Figura 90.</i> Medición resistencia de aislamiento fase-tierra antes de mantenimiento del motor de 25 Hp.....	139
<i>Figura 91.</i> Mantenimiento del motor eléctrico 20 Hp.	140
<i>Figura 92.</i> Temperatura programada de 130°C para secado con convección forzada y temperatura máxima por encima del valor requerido.	140
<i>Figura 93.</i> Secado en horno con aire forzado.	141
<i>Figura 94.</i> Secado en horno con aire forzado.	141
<i>Figura 95.</i> Medición resistencia de aislamiento para secado con aire forzado de estator de 20 Hp.....	142
<i>Figura 96.</i> Medición resistencia de aislamiento para secado con aire forzado de estator de 20 Hp para secado a 150 °C en cámara y 2 horas de secado.	143

Resumen

La presente tesis tiene como objetivo la optimización de un horno eléctrico para secado de bobinas de motores eléctricos de hasta 300 hp, donde se hace uso de un controlador de temperatura para mejorar el nivel de aislamiento medido en gigaohmios. El estudio se ha realizado aplicando la metodología de diseño de productos propuesta por Ulrich y Eppinger, donde se describe la importancia del análisis conceptual, la comparación con un equipo existente ya sea disponible para tomar datos o mediante búsqueda de información de proveedores. La optimización es una de las actividades del diseño de un producto, por eso se optó por esta metodología como herramienta para optimizar. Se inició el proceso de optimización con un estudio a nivel conceptual calificando tres alternativas de solución, definidas por valores objetivos para cada métrica de interés de mejora del horno. Luego se realizó el análisis térmico del horno modelando la bobina como un elemento cilíndrico de diámetro máximo de 500 mm por 700 mm de largo y calculando para dos opciones de secado, una por radiación más convección natural y el otro por convección forzada. Luego se optimizó la estructura principal del horno, modelada por separado como un marco empotrado resolviendo mediante la ecuación de pendiente – deflexión y aplicando el criterio de diseño por esfuerzos admisibles, ASD. Como cuarta parte de los resultados, se optimizó el sistema eléctrico agregando un ventilador con variador de frecuencia y se planteó un diagrama de flujo para predefinir el circuito de mando; sección que finalizó con el cálculo de los parámetros eléctricos. Se abordó el dibujo de la estructura más la cobertura y ductos que se plasmaron en un plano de fabricación. Finalmente, se realizaron pruebas con motores de 4 hp y 20 Hp en un prototipo de horno fabricado; durante el secado se tomaron los datos de temperatura inicial y final en los mismos puntos que se realizó el cálculo térmico. Se pudo concluir que al optimizar el horno tanto en parte eléctrica, térmica y estructural, se logra aumentar la calidad del aislamiento de las bobinas de motores eléctricos.

Palabras clave: Control, temperatura, bobinas, optimizar, horno.

Abstract

The present thesis aims to optimize an electric oven for drying electric motor coils up to 300 hp, where a temperature controller is used to improve the insulation level measured in gigaohms. The study has been carried out by applying the product design methodology proposed by Ulrich and Eppinger, which describes the importance of conceptual analysis, comparison with an existing equipment, whether available to collect data or by searching for information from suppliers. Optimization is one of the activities of the design of a product, that is why this methodology was chosen as a tool to optimize. The optimization process began with a conceptual study qualifying three solution alternatives, defined by objective values for each metric of interest to improve the furnace. Then the thermal analysis of the oven was carried out by modeling the coil as a cylindrical element with a maximum diameter of 500 mm by 700 mm long and calculating for two drying options, one by radiation plus natural convection and the other by forced convection. Then the main structure of the furnace was optimized, modeled separately as an embedded frame, solving using the slope-deflection equation and applying the design criteria for allowable stresses, ASD. As a quarter of the results, the electrical system was optimized by adding a fan with a variable frequency drive and a flow diagram was proposed to predefine the control circuit; section that ended with the calculation of the electrical parameters. The drawing of the structure was addressed, plus the coverage and ducts that were reflected in a manufacturing plan. Finally, tests were carried out with 4 hp and 20 Hp motors in a prototype manufactured oven; During drying, the initial and final temperature data were taken at the same points as the thermal calculation. It was possible to conclude that by optimizing the furnace both in electrical, thermal and structural part, it is possible to increase the quality of the insulation of the electric motor coils.

Keywords: Control, temperature, coils, optimize, oven.

I. INTRODUCCIÓN

El motor eléctrico de inducción es una de las máquinas eléctricas que tienen mayor uso en la industria actual a nivel mundial, por su versatilidad, resistencia, costos de adquisición bajos en relación a otros equipos, constitución simple y por ende mayor facilidad de construcción y mantenimiento (Wildi, 2007). La crisis por el COVID-19 ha traído consigo problemas económicos, sin embargo, no serán un impedimento para el crecimiento en aproximadamente un 3% del mercado de motores eléctricos, según una encuesta realizada por Global Industry Analysts publicada en su revista Market Impact Survey – Covid-19 & Looming Recession (Global Industry Analysts, 2020). Claramente, si se sigue produciendo motores eléctricos, se tendrán más motores a los cuales se les debe dar mantenimiento; parte de esta actividad, es el control y reposición del aislamiento eléctrico de los motores para conservar su resistencia eléctrica en los valores adecuados.

En la actualidad, según los importadores, la vida útil de los motores eléctricos de mayor rendimiento en promedio los de clase A y B, tienen una duración mayor a 20 años; a diferencia de los motores de baja eficiencia o de la categoría C, los que alcanzan los 12 años (Ministerio de energía, 2010). Para alcanzar este tiempo de vida útil se requiere de una correcta instalación, sistema de fuerza, protección y control correctamente dimensionados y de un mantenimiento preventivo constante que garantice el óptimo funcionamiento y se eviten múltiples fallas, entre ellas las de aislamiento. En el proceso de renovar el aislamiento se requiere extraer la humedad la cual queda en el motor, en especial en el bobinado del rotor y estator, para ello se requiere de hornos de secado, con lo cual se logra que la resistencia del aislamiento del motor aumente o llegue a sus valores óptimos (García Cochachi, 2008).

Las empresas del Perú se caracterizan en su gran mayoría por contar con un alto porcentaje de mantenimiento correctivo y, por ende, requieren de una respuesta inmediata de mantenimiento para poder continuar con su producción, es natural que estas empresas cuenten con máquinas eléctricas de repuesto; sin embargo, también se requiere además de un mantenimiento rápido, un trabajo de buena calidad que pueda garantizar los valores requeridos en el aislamiento del motor. Actualmente, ya no basta con el desarrollo de un sistema o producto viable o factible

que cumpla las funciones para la que fue diseñada, es necesario contar con una función objetivo para mejora, como: ganancias, costos, calidad del producto o producción; esto es, lograr optimizar el diseño de un producto (Jaluria, 2020).

En Trujillo, la empresa Electromecánica Tesla, es una micro empresa que brinda servicio de mantenimiento electromecánico, rebobinado de motores, transformadores y generadores eléctricos de hasta 300 HP. Electromecánica Tesla está enfocada en mejorar el nivel de aislamiento y así alargar la vida útil de los equipos eléctricos monofásicos y trifásicos; esto mediante la optimización de un horno eléctrico. Un factor importante al momento de realizar el secado de las bobinas, es mantener la temperatura dentro de los valores adecuados; con la intención de lograr la resistencia correcta de aislamiento. Por este motivo surge la necesidad de contar con un equipo de secado controlado del aislamiento para poder satisfacer la actual demanda de mantenimiento de motores, estos equipos se les conoce como hornos eléctrico barnizador.

El control de temperatura es fundamental en estos procesos de mantenimiento de bobinas, por ello es importante controlar los parámetros de temperatura con la mínima variación. La temperatura de secado de los motores depende de las clases de aislamiento según las especificaciones técnicas del motor; actualmente los sistemas de control automático permiten una regulación con errores mínimos. Una razón importante por lo cual se plantea el diseño del horno con capacidad de hasta 300 HP es porque la empresa solo cuenta con equipos para realizar las maniobras hasta esta capacidad.

Por ello se planteó el siguiente problema: ¿Cuál es el diseño óptimo de un horno eléctrico que permita la mejora de las condiciones de secado de bobinas de motores eléctricos hasta 300 HP?

El estudio de un diseño óptimo es parte de la metodología del diseño y de ejecutarlo: (1) se podrá mejorar la calidad del aislamiento de bobinas de motores eléctricos en el servicio de mantenimiento por parte de la empresa Electromecánica Tesla, esto se reflejará en cubrir la demanda actual de este servicio, (2) el correcto funcionamiento del aislamiento en los motores eléctricos está asociada a la seguridad de los operarios y de los equipos alrededor, ya que una falla de

aislamiento puede tener diferentes efectos como inutilización del motor, electrocución del personal y sobrecalentamiento del motor, por tal motivo es prioritario diseñar un horno eléctrico y por último (3) el proyecto tiene un costo de inversión, sin embargo, en este proyecto con la optimización de los recursos y un diseño óptimo del horno eléctrico permitirá contar con un costo bajo y también con un buen retorno de la inversión.

El objetivo general del proyecto es Optimizar un horno eléctrico con control de temperatura para mejorar el nivel de aislamiento de bobinas de motores eléctricos hasta 300 HP. En base al objetivo general se planteó los siguientes objetivos específicos: (1) analizar alternativas de solución óptima de un horno eléctrico para secado de bobinas, (2) realizar el análisis energético del horno eléctrico (3) calcular la estructura del horno eléctrico, (4) dimensionar los componentes eléctricos de potencia y control del horno eléctrico, (5) dibujar los planos de fabricación del horno eléctrico óptimo, y por último (6) probar el funcionamiento y definir las especificaciones técnicas del horno eléctrico optimizado.

II. MARCO TEÓRICO

El bobinado de motores es un campo de trabajo muy visitado, sin embargo, con muy poca bibliografía respecto al tema; por ello Méndez Altamirano en el año 2012, recurrió a realizar un proyecto y evaluarlo en funcionamiento; esto fue descrito en su tesis: diseño y fabricación de un horno eléctrico para el secado de los bobinados de motores de hasta 10 HP (Méndez Altamirano, 2012). En el proceso de evaluación, Méndez comprobó que el mantenimiento en un horno de combustión en relación al de un horno de resistencias eléctricas, es más costoso. Califica el horno eléctrico como mejor en términos de condiciones ambientales, seguridad de operación, versatilidad en el funcionamiento y un proceso mejor controlable. En las condiciones de instalación Méndez opta por una alimentación trifásica R, S, T con una tensión entre fases de 220 V; conectó las fases directamente al contactor que alimenta al conjunto de resistencias. Para el motor las fases las conecta con una protección térmica derivada de la línea a la resistencia. En la prueba de operación que realizó determinó que en 18 minutos logra los 100°C y 55 minutos después alcanza 200°C. Parte del sistema de secado, es el motor que acciona el ventilador de alabes hacia adelante, la potencia del motor es de ½ HP con una velocidad de rotación de 1725 rpm, con corriente nominal de 2 Amperios; dicho ventilador Méndez lo instaló haciendo una perforación de 12.46 cm de diámetro a la cámara de secado.

En la búsqueda de la optimización del sistema de secado para un mayor aprovechamiento de la energía y en la búsqueda de mejora de la confiabilidad en los resultados con los parámetros descritos por las normativas, el investigador Solís Bustamante en el año 2019, diseñó un sistema de control de temperatura de un horno, utilizado para el secado de barniz aislante (Solís Bustamante, 2019). El autor demuestra que un sistema de control de temperatura mediante PID en un horno eléctrico le proporciona ventajas cualitativas como: Eficiencia en operación, precisión en el fenómeno térmico en la cámara y lo más importante mayor seguridad para el personal que opera el equipo y para la planta, manifestándose en una disminución de riesgos laborales. Con una buena interfaz hombre-máquina del sistema de control se logra una mayor manipulación y monitoreo, en términos de sencillez y desempeño. El autor logró que la máquina sea de fácil aprendizaje para

los operarios que no tengan conocimientos avanzados en la constitución de la máquina, dando la máquina la posibilidad de seleccionar las condiciones de los parámetros del proceso térmico en función al tipo de barniz aislante que se requiera según la máquina eléctrica que se le de mantenimiento. Solís comprueba que, en operación para lograr estabilizar la temperatura en la cámara, existe un impulso de 8 °C que sobrepasa el valor de temperatura requerido en periodo de tiempo aproximado de 6 segundos, enseguida la temperatura se mantiene dentro de un rango estable; dichas pruebas se hicieron para una temperatura de secado y pre-secado de barniz de 120 °C y 100 °C respectivamente.

Los sistemas de control de lazo cerrado permiten un control de las salidas de un proceso y es más eficiente cuando el control es automatizado. Uno de los equipos que brindan flexibilidad en aplicaciones y de fácil programación, son los controladores lógicos programables, PLC, por ello en el año 2016, diseñó e implementó un sistema automático de control de temperatura de un horno industrial utilizado en el proceso de secado del bobinado de motores y generadores eléctricos en la empresa AFLOMOTORS de la ciudad de Quito (Flores Medina, 2016). Flores consideró la instalación de un PLC para el control de la temperatura donde el hardware del sistema, es un PLC S7-1200 con una interfaz gráfica haciendo uso de una pantalla táctil KTP600 lo que permitió controlar y mantener un registro de dato. Según el autor, se alcanzaron los tiempos requeridos de entrega del servicio, sin faltar a los protocolos correspondientes al secado del bobinado y además de entregar un registro de pruebas, manifestándose todo ello en la conformidad y satisfacción del cliente. Se usó un bloque de instrucción PID_Compact del software TIA PORTAL. Se realizaron pruebas de funcionamiento del equipo que controla el sistema, considerando una carga de 4 toneladas en el horno industrial a una temperatura de 100 °C, el tiempo necesario para alcanzar dicha temperatura es de 255 minutos lo cual solo permite tener a esta capacidad 2 servicios por jornada laboral. Si se requiere una temperatura de 130 °C, el tiempo casi se duplica siendo 460 minutos. Finalmente, Flores indica que controlar el horno eléctrico con la tecnología implementada, permite ahorrar energía en un 30.77%.

Cada vez más, los softwares de ingeniería permiten una ingeniería más fluida, dando acceso y solucionando problemas con soluciones de carácter iterativo de

manera rápida. Por este motivo, en el año 2016, investigadores diseñaron, optimizaron y construyeron un horno de recalentamiento utilizando resistencias eléctricas y el software SolidWorks (Echevarria Burgos & Reyes Olivares, 2016). Los autores, lograron contar con una temperatura exterior de 27 °C en la superficie de la cámara que es una temperatura aceptable como seguridad y rendimiento energético. Cuando simularon en SolidWorks el programa daba como resultado 26.091 °C, esto es un poco menos de 1 °C como delta de temperatura. Se logró realizar los planos en SolidWorks en 2D y 3D para lo cual se consideró los equipos que estarían en su interior y también considerando las paredes de aislamiento térmico. Echavarría y Reyes seleccionaron una resistencia eléctrica de 80 Ni – 20 Cr puesto en placas ranuradas para evitar contacto directo, asimismo se seleccionaron los accesorios de protección del circuito de alimentación en 220 V. Un punto que se consideró muy importante, fue el sistema de cierre para evitar pérdidas de calor.

Es necesario contar con un **sustento teórico** que permita profundizar en los parámetros de diseño e identificar las variables a optimizar. La aplicación de los conocimientos en diseño electromecánico, optimización y transferencia de calor, serán de utilidad para el desarrollo de esta tesis.

La optimización, es la acción de encontrar mejoras de una actividad. Considerando en el ámbito del diseño de equipos industriales, se puede redefinir como la búsqueda de mejoras de un diseño existente para obtener un mayor rendimiento en diferentes aspectos, tales como: técnicos, económicos de seguridad y medio ambiente. La teoría de la optimización está compuesta por un grupo de resultados y métodos analíticos y numéricos dirigidos a determinar la alternativa mejor. En términos generales, la optimización es un problema de solución (Universidad Politécnica de Cartagena, 2020). El ingeniero, no solo tiene que diseñar estructuras que sean seguras, sino también debe abarcar otros factores como son la optimización de costes, el impacto medioambiental, social, etc. La seguridad y la reducción de costos son objetivos contrapuestos, sin embargo, es posible diseñar estructuras que sean óptimas. El diseño basado en fiabilidad estudia los métodos que se aplican para diseñar productos que sean a la vez óptimos y fiables. Los métodos de fiabilidad son usados para aproximar la probabilidad de que una

estructura bajo consideración no cumpla los requisitos exigidos por los estados límites o modos de falla (Barragué, 2013). Los elementos de la optimización son: función de coste o criterio, modelo del sistema o proceso y las restricciones. Es decir, en función a un criterio se deberá tomar una decisión.

En la práctica es aconsejable que los diseñadores consideren la confiabilidad en esta etapa. Esto puede proporcionar información valiosa para seleccionar distribuciones que se adapten bien a la aplicación, interpretación de datos, diseño experimental, asignación de confiabilidad y técnicas analíticas y de simulación para la evaluación de confiabilidad y optimización del sistema (Collins A, Busby, & STAAB, 2010). La optimización forma parte del proceso de diseño, dado el caso de contar con un diseño actual, también es posible la aplicación del estudio de optimización de un producto o proceso. Las etapas para la optimización del diseño, inicia por la síntesis de la necesidad y analizar los parámetros involucrados. La etapa de la optimización es plantear el criterio y las restricciones de la mejora y según los resultados se itera para obtener la solución óptima. (Childs, 2004)

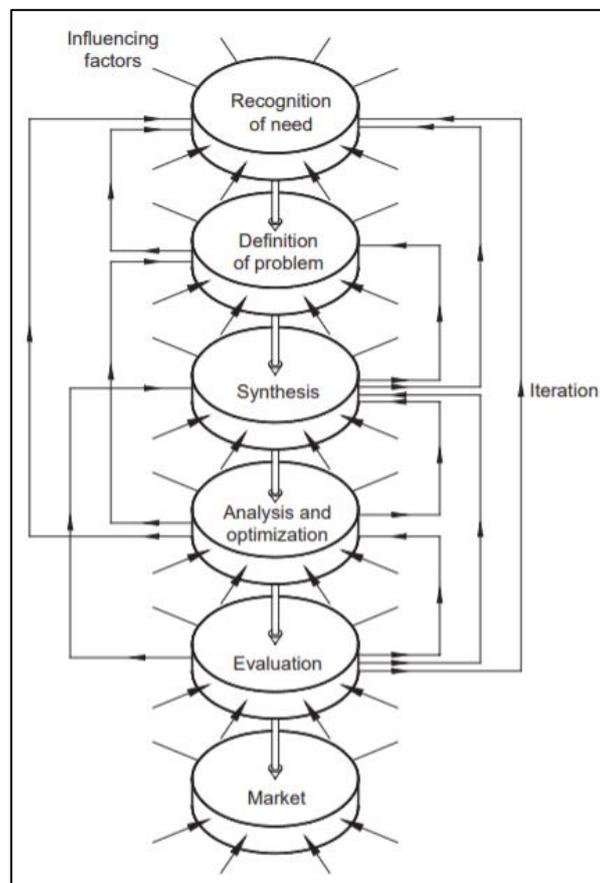


Figura 1. Optimización y el proceso de diseño. (Childs, 2004)

La conceptualización del diseño es entender el problema, identificar las necesidades, proponer soluciones y seleccionar desde un punto de vista cualitativo. Esta etapa del diseño se realiza mediante tres pasos: Análisis, síntesis y evaluación. El análisis abarca la comprensión del problema y definición de las exigencias que involucran dicho problema. Luego se debe realizar la síntesis, esto es evaluar de manera general, el comportamiento que deben tener las posibles soluciones; a través de una caja negra con entradas y salidas incluyendo las deseadas primarias, deseadas secundarias y no deseadas (GARCIA, 2019). En el anexo 11 se muestra un sistema con los elementos descritos. Finalmente se debe evaluar entre las alternativas de solución que se tengan en función a las funciones *identificadas en el análisis; para ello se plantea una matriz morfológica. En el anexo 11, se muestra una matriz morfológica aplicada a la búsqueda de la mejor alternativa para extraer rodamientos. Un horno eléctrico o industrial, es un equipo que utiliza la energía térmica producto del efecto Joule de una resistencia eléctrica dispuestas de modo que el calentamiento se dé con homogeneidad en toda la pieza dispuesta para secar. La transferencia de calor se da por los diferentes mecanismos de transferencia de calor, estos son: Conducción, convección y radiación (Echevarria Burgos & Reyes Olivares, 2016) . La eficiencia de los hornos eléctricos está directamente ligado al control de la temperatura, la correcta selección y dimensionamiento del material de aislamiento térmico y este a su vez depende de los parámetros de operación y de la geometría del horno.*

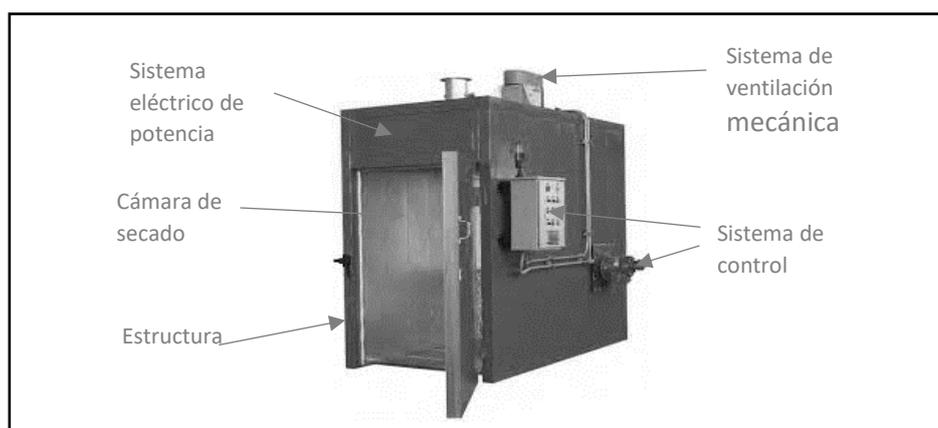


Figura 2. Partes de un horno para cuadro de resinas. (PREMAC, 2020)

La geometría del horno eléctrico, se puede abordar considerando que el horno está dividido en 5 partes muy importantes, estos son: la cámara de secado, sistema de

control, sistema eléctrico de potencia, sistema de ventilación mecánica y estructura. Véase la figura 2 como referencia de un horno eléctrico y sus partes. Para poder tener una lectura de la temperatura se necesita un sensor de temperatura óhmico.

En la figura 3 se puede observar las partes del sistema de control de un secador eléctrico, estos: Sensor, transductor (módulo analógico), el centro de control lógico (PLC) Variador de velocidad (Ventilación) y circuito de potencia (resistencias).

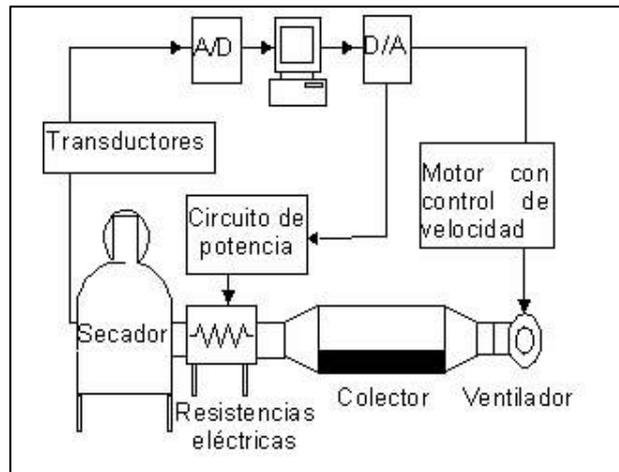


Figura 3. Esquema del sistema secador eléctrico. (Costa & Ferreira, 2007)

La geometría depende de las dimensiones de las máquinas eléctricas que serán introducidas. En la figura 4, se puede observar las dimensiones de un motor eléctrico de 300 HP de la marca WEG, la unidad de longitud es pulgadas. El plano completo se puede observar en la siguiente figura mostrada. Lo concerniente a la cámara de secado y que se podría decir es la parte principal, ya que un correcto posicionamiento de las resistencias en la cámara y una correcta selección de los materiales de aislamiento térmico, se puede lograr una mayor eficiencia.

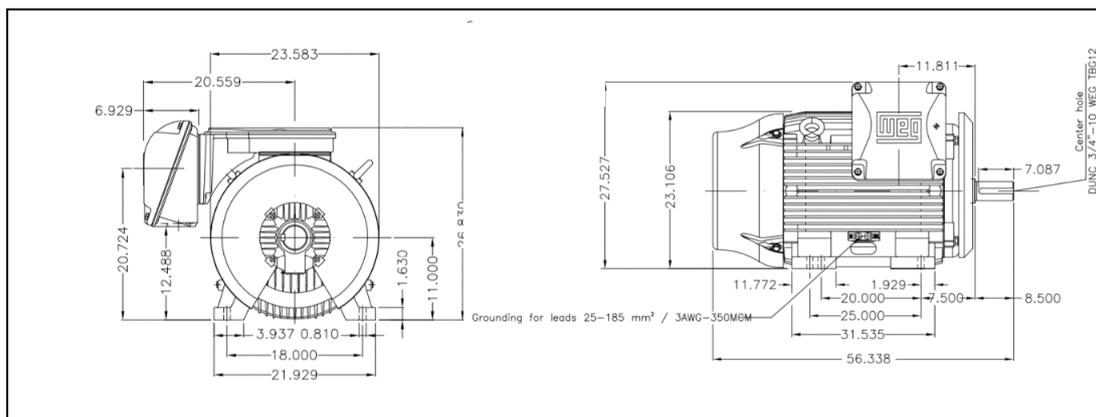


Figura 4. Dimensiones de motor WEG 300 HP. (WEG, 2014)

Las temperaturas de secado, están estandarizadas por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Este estándar clasifica los sistemas de aislamiento, nombrándolos como aislamiento para motores de corriente alterna: B, F y H; donde cada clase es tratada con diferente temperatura, es decir cuentan con una temperatura permisible en el devanado mayor para su correcto secado sin alterar sus propiedades eléctricas. La temperatura para B es 80 °C, para F es 105 °C y H, 125 °C (NEMA, 2010) Esta temperatura se debe mantener constante a lo largo del secado por ello es necesario contar con un control de temperatura y con aislamiento térmico. El control de temperatura involucra la presencia de un sistema de control de lazo cerrado y de un elemento de corrección que en este caso sería el ventilador, que, a la vez de uniformizar la corriente de aire en el interior de la cámara de secado, a su vez, debe evitar que la temperatura de la bobina supere los valores permisibles por NEMA y por ende se logren las resistencias mínimas en bobinas de motores. En el anexo 1 se muestra las resistencias permisibles en función del voltaje.

Las dimensiones del motor eléctrico son aproximadamente de 1431 mm de longitud por 600 mm de ancho y 681mm de altura. El peso aproximado de estos equipos es de 1300 Kg, por ello se debe considerar las tolerancias geométricas para el acceso. La geometría de la cámara de secado y de la estructura en consecuencia, considera también el espesor del aislamiento térmico. Los aislamientos térmicos existentes son la fibra de vidrio y lana mineral, en la figura 5 y 6 se puede observar una foto referencial de los dos tipos de aislamientos térmicos y sus principales presentaciones.



Figura 5. Lana mineral en placa y rollo. (Imperbe, 2020)

La lana mineral cuenta con una baja conductividad térmica, esta se encuentra en un rango de 0.050 y 0.031 W/m*K. (Imperbe, 2020) y la fibra de vidrio su conductividad, 0.04 W/m*K (ERICA AISLAMIENTO Y ESTANQUEIDAD, 2020) Las especificaciones y geometría como se suministra se muestran en el anexo 4.



Figura 6. Aislamiento térmico de fibra de vidrio. (Aislasur, 2020)

La resistencia eléctrica debe tener la capacidad de suministrar la potencia térmica para poder realizar la actividad de secado. Estas resistencias generalmente están fabricadas de una aleación de cromo-níquel. (Echevarria Burgos & Reyes Olivares, 2016) Existen diferentes tipos de resistencias eléctrica de potencia, estas son: Resistencia para inmersión, para aire, flexibles, para ambientes explosivos y resistencias tipo abrazaderas. Las resistencias eléctricas de potencia para aire, en el mercado se encuentran en diferentes presentaciones, las que pueden resultar de interés para esta aplicación, son: Resistencia de calefactores aleteados, aleteados helicoidales, baterías de resistencias aleteadas. En la figura 7 se muestran estos tipos de resistencias (Brototermic, 2020).

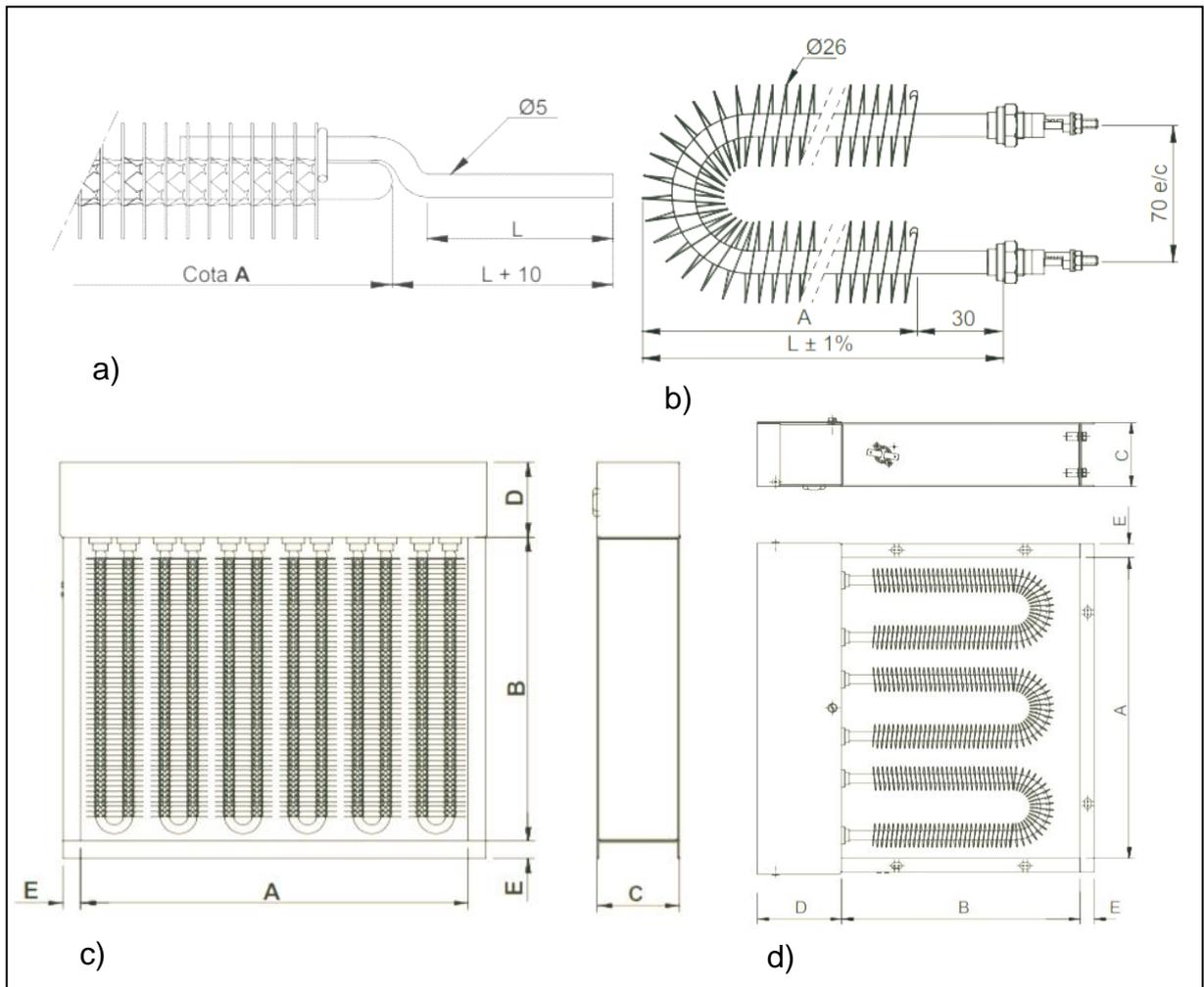


Figura 7. Tipos de resistencias de potencia para aire, a) resistencia con aletas rectas, b) resistencia con aletas helicoidales, c) batería de resistencia con aletas rectas y d) batería con aletas helicoidales. (Brototermic, 2020)

Los PLC's son usados frecuentemente en el control de los parámetros de funcionamiento en el interior de la cámara. Esto involucra que el PCL cuente con un módulo analógico para el control gradual de la temperatura mediante un sensor óhmico. Con ello se controla el encendido y apagado del motor y el tiempo de encendido de las resistencias o baterías de resistencias. Los PLC's se programan generalmente con lenguaje Ladder y se sugiere tener esta secuencia de programación, se debe empezar (1) con el estudio completo de los requerimientos de la maniobra, (2) asignar variables de entrada y salida, (3) nombrar las variables involucradas, (4) plantear el cronograma de operaciones del sistema, (5) determinar las señales de activación y parada, (6) conocer las funciones del autómatas que se ha seleccionado para el sistema (debido a que las instrucciones pueden variar entre

diferentes fabricantes), (7) se escribe el programa de forma sencilla utilizando comentarios, (8) realizar una simulación de lo programado en computadora antes de conectar al sistema real, (9) Transferir el programa al PLC, (10) Ajuste de errores y puesta en marcha. (Pérez Cruz & Pineda Sánchez, 2008) En la figura 7 se puede observar los módulos de entrada analógicos y un PLC Twido.

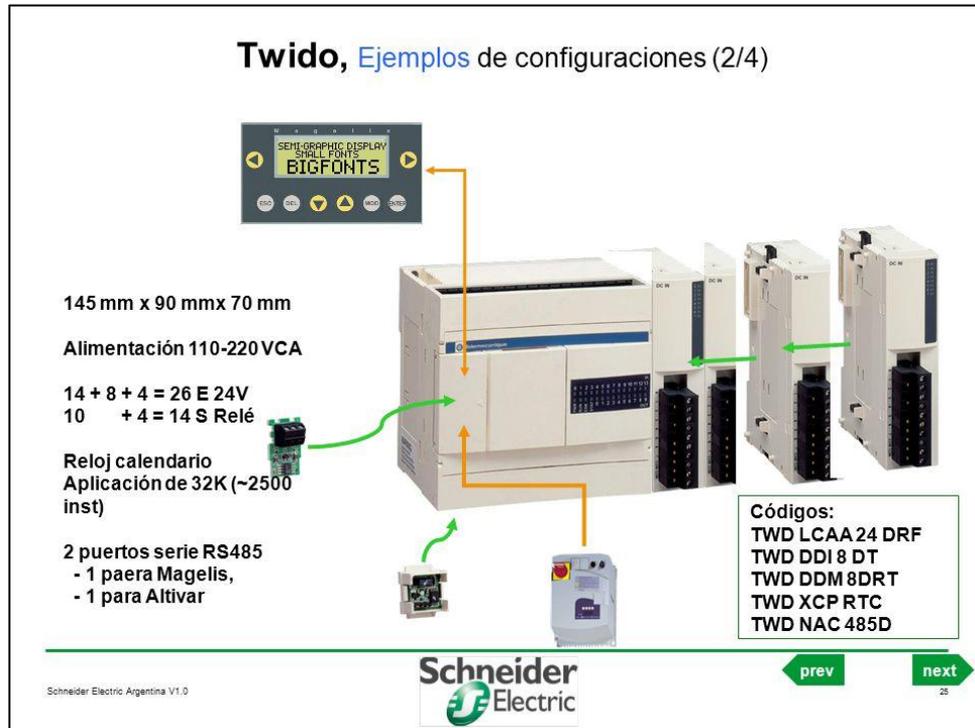


Figura 8. PLC Twido con módulo de entrada analógico. (Schneider Electric, 2020)

El análisis de transferencia de calor es el estudio de la transferencia de energía desde una masa dada a otra, impulsada por una diferencia de temperatura, esta transferencia se puede dar por medio de los mecanismos de conducción, convección y radiación. La transferencia de calor está asociada al concepto de flujo de calor, esto es una razón de transferencia de calor y si se conoce el tiempo del proceso, es posible calcular la cantidad de calor transmitida en el proceso (Cengel & Ghajar, 2011)

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \text{ (J)} \quad \dots (1)$$

La primera ley de la termodinámica indica que el cambio de energía en un sistema es igual a la diferencia de la energía de entrada menos la de salida (Cengel & Ghajar, 2011)

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}} \quad \dots (2)$$

Los mecanismos de transferencia de calor se expresan mediante las ecuaciones:

Conducción, véase la figura 9 para el planteamiento de la ecuación general de la conducción de calor en coordenadas cartesianas. (Holman, 2002)

$$\frac{q}{k} = A * \frac{dT}{dx} \quad \dots (3)$$

Donde α es la difusividad térmica y k , la conductividad térmica, véase el anexo 2.

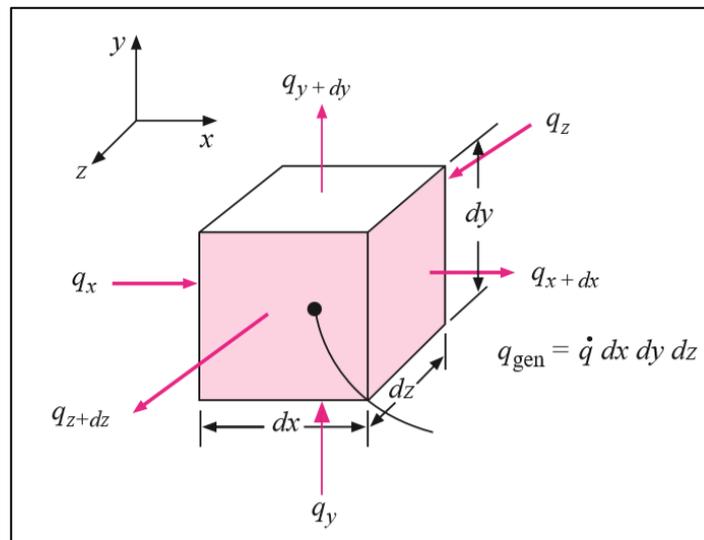


Figura 9. Elemento volumen para análisis de conducción de calor. (Holman, 2002)

Convección, se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton, (Holman, 2002) considere la figura 10. La convección es un fenómeno que expresa la transferencia de calor entre un fluido y un sólido, donde por la condición de no deslizamiento en la interfaz sólido-fluido, se genera una variación de la velocidad y a su vez un gradiente de temperatura, ya que la transferencia de energía entre fracciones de fluido que se mueven por acción natural por una diferencia de presión o presión generada por un ventilador, va disminuyendo conforme el gradiente va descendiendo (Kreith, Manglik, & Bohm, 2012).

$$\dot{Q} = h * A * (T_s - T_{\infty}) \quad \dots (4)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor que depende de la velocidad del flujo de aire.

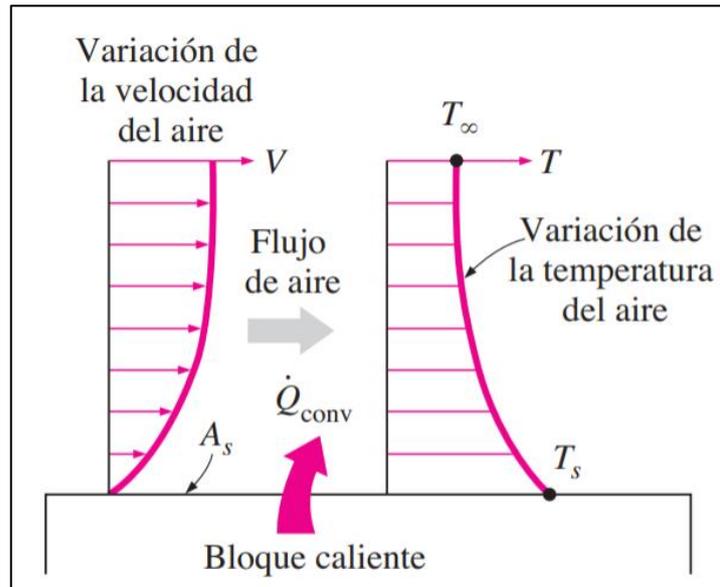


Figura 10. Temperaturas en la capa límite convección sobre placa. (Cengel & Ghajar, 2011)

El coeficiente de transferencia de calor depende del número de Nusselt y este a su vez del número de Prandtl y el número de Reynolds (Holman, 2002).

$$h_x = \frac{Nu_x * k}{x} \quad \dots (5)$$

en donde, h_x es el coeficiente de transferencia de calor en $\frac{W}{m^2 \cdot C}$, Nu_x es el número de Nusselt en, k es la conductividad térmica del aire, x es longitud en metros.

Y el número de Nusselt, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Nu_x = 0.332 * Pr^{\frac{1}{3}} * Re_x^{\frac{1}{2}} \quad \dots (6)$$

La radiación, es el mecanismo de transferencia de calor en forma de ondas electromagnéticas, (Holman, 2002) la cual a diferencia de la conducción y convección no requiere de un medio para su transferencia, la energía puede transmitirse a través del vacío. Para el cálculo de la radiación se requiere de la temperatura absoluta y la de la superficie. Una idealización de un cuerpo de radiación perfecto, se basa en la teoría del cuerpo negro y se puede calcular mediante la siguiente expresión (7). (Kreith, Manglik, & Bohm, 2012) Dicha relación es conocida como la Ley de Stefan-Boltzmann.

$$\dot{Q}_e = \sigma * A_s * T_s^4 \quad \dots (7)$$

Donde, \dot{Q}_e es la tasa de transferencia de calor del cuerpo negro (W), A_s es el área del cuerpo que emite la radiación (m^2) y T_s es la temperatura del cuerpo negro (K), σ es la constante de Stefan-Boltzmann que equivale a $5,67 \cdot 10^{-8}$ ($W/m^2 \cdot K^4$). Pero debido a que en la realidad no existe tal cuerpo, interviene un parámetro que mide cuan próxima esta una superficie real de parecer un cuerpo negro, esta es la emisividad, $0 < \varepsilon < 1$. (Cengel & Ghajar, 2011)

$$\dot{Q}_e = \varepsilon * \sigma * A_s * T_s^4 \quad \dots (8)$$

en donde, ε es la emisividad.

Ver la figura 11 para observar los parámetros involucrados en la radiación.

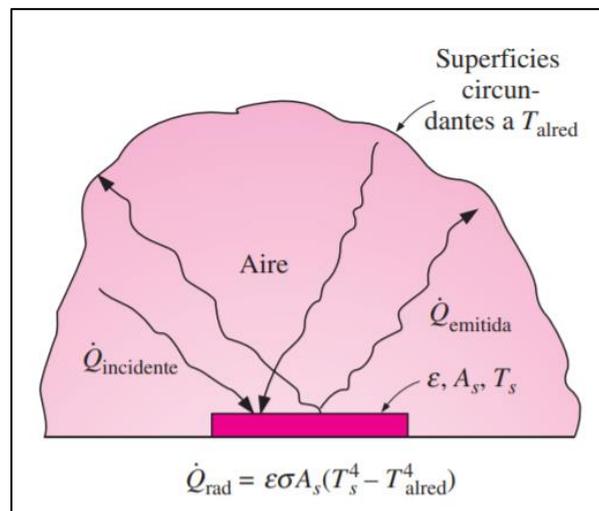


Figura 11. Radiación de superficie a superficie circundante. (Cengel & Ghajar, 2011)

El fenómeno térmico en el interior de un horno eléctrico es un conjunto de interacciones entre los diferentes mecanismos de transferencias de calor, y se puede abordar de dos maneras, como un volumen de control o como un sistema cerrado.

En la figura 12 se muestra un volumen de control de un gas ideal en una caja adiabática, en donde ingresa un determinado flujo másico \dot{m} de gas con una entalpía de entrada h_e menor que la entalpía de salida h_e , esto debido a que en el interior de la caja se encuentra un generador de calor \dot{Q}_{heater} . En el modelo de la figura 12, también se puede observar el ventilador como salida de energía, por el trabajo mecánico que se realiza para generar la circulación del gas. (Massoud, 2005) Las condiciones en el interior de la caja, de manera ideal, la temperatura

debería mantenerse constante, sin embargo, esto no ocurre en la realidad; asimismo, la presión en el interior de la caja variara en función del tiempo, $P(t)$.

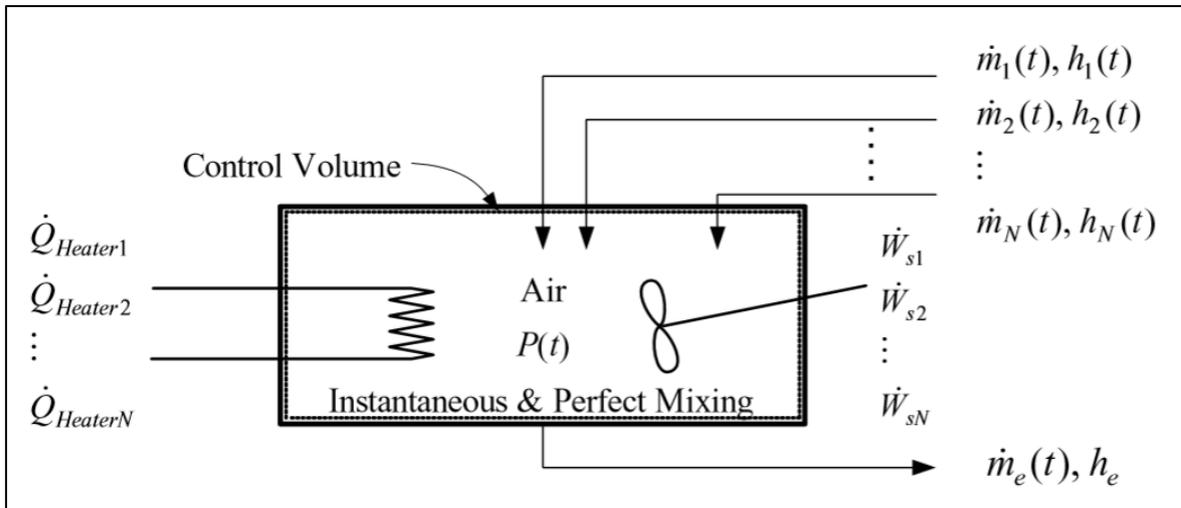


Figura 12. Modelo para el cálculo de parámetros de un gas en el interior de una caja adiabática, con circulación de aire e ingreso de calor por una resistencia. (Massoud, 2005)

La generación de energía por una resistencia eléctrica, se basa en el efecto Joule, en la expresión a continuación de la energía generada está en $W \cdot m^3$.

$$e_{gen} = \frac{I^2 * R_e}{\pi * r_0^2 * L} \quad \dots (9)$$

Donde I es la corriente eléctrica, R_e es la resistencia del conductor, y en el denominador de la ecuación están los parámetros geométricos del alambre o barra.

El cálculo de estructuras hace referencia al diseño del soporte metálico y al material de recubrimiento exterior e interior. Refiriéndose al diseño, este va más allá de solo un cálculo estructural, se debe contemplar varios aspectos, como: verificar la tecnología disponible del fabricante, disponibilidad de materiales, componentes que puedan incorporarse existentes en el mercado, costo del producto terminado, etc. En el proceso del diseño se debe tener claro 3 definiciones, estos son: Funciones, parámetros de diseño y criterios de evaluación. (Mott, 2006) Esto debe plantearse antes del proceso de cálculo para tener claro y lograr un diseño óptimo. El diseño de estructuras para sistemas que involucran cambios de temperatura, se deben abordar considerando los cambios de las propiedades mecánicas de los materiales. Respecto al cálculo el diseño se debe empezar con un bosquejo con el cual se pueda modelar el comportamiento de la distribución de temperaturas y del flujo de

aire. Se debe seleccionar un material que soporte las condiciones de trabajo del modelo. Para el cálculo de resistencia mecánica de la estructura, se debe plantear las ecuaciones de equilibrio y luego calcular las secciones y espesores de cada elemento. El diseño es un proceso iterativo y se debe enfocar en un panorama de esfuerzo-resistencia en un punto crítico (controlado), se debe buscar resistencia en la geometría y condición de uso. (Shigley, 2008)

El cálculo estructural se inicia por el planteamiento de un diagrama de cuerpo libre, enseguida se plantean las ecuaciones de equilibrio.

$$\sum F_x = 0 \quad \dots (10)$$

$$\sum F_y = 0 \quad \dots (11)$$

Luego se aplican las ecuaciones de esfuerzo normal y esfuerzo cortante.

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{M * c}{I} \quad \dots (12)$$

$$\tau = \frac{V}{A} ; \quad \tau = \frac{T * c}{J} \quad \dots (13)$$

El valor calculado se debe comparar con el valor de resistencia mecánica del material que se ha seleccionado mediante un criterio, como el de Von Mises para el caso de cargas estáticas; mostrándolo mediante un factor de seguridad. En la figura 12 se puede observar la variación de la resistencia mecánica (tensión y fluencia) del acero AISI 304. Es posible observar, para este material en particular, que a la temperatura teórica (130 °C) a la que debe encontrarse el interior de la cámara de secado de motores, se encuentra en una zona donde no hay mucha diferencia en el comportamiento elástico de otras temperaturas ensayadas, considere que se infiere a partir de la premisa que usualmente en diseños conservadores, se usa la resistencia a la fluencia de los aceros, esta para el AISI 304 se encuentra entre el rango de 200 y 300 MPa.

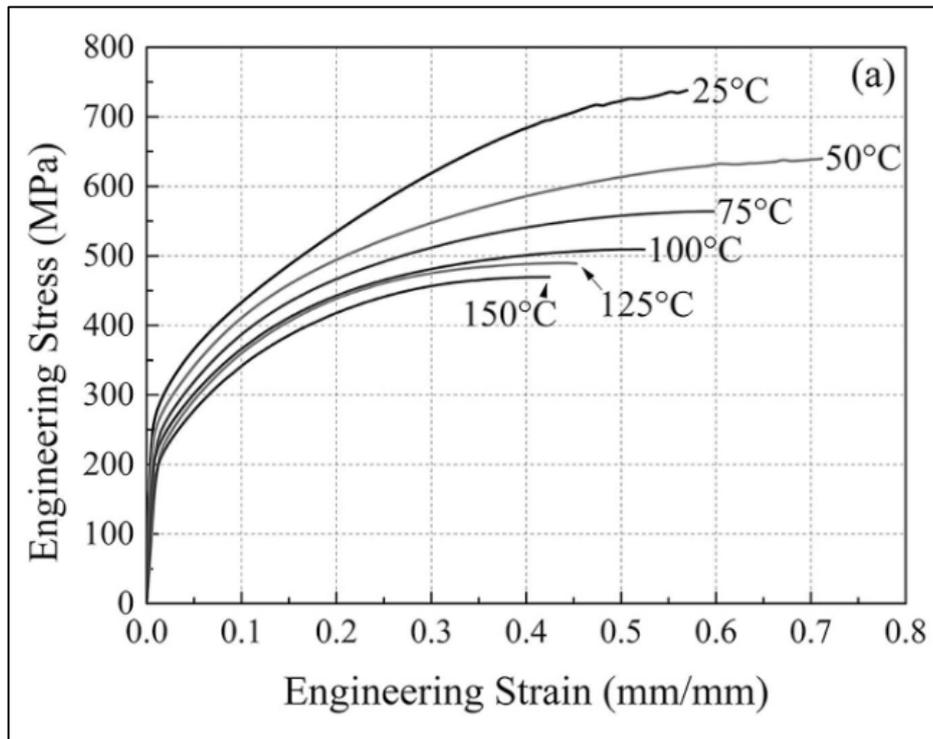


Figura 13. Variación de la deformación frente a la tensión aplicada en un ensayo de tracción del acero AISI 304 a diferentes temperaturas. (Corrêa Soares, Mendes Rodrigues, & de Arruda Santos, 2017)

Un punto importante al momento del diseño, para el criterio de Von Mises es la consideración de la resistencia a la fluencia S_y , para ello es necesario conocer como varía esta propiedad mecánica del material AISI 304, ampliamente usado en la industria por su conservación para ambientes corrosivos, expuestos a humedad. En la figura 14, se observa la curva de variación de S_y frente a la temperatura.

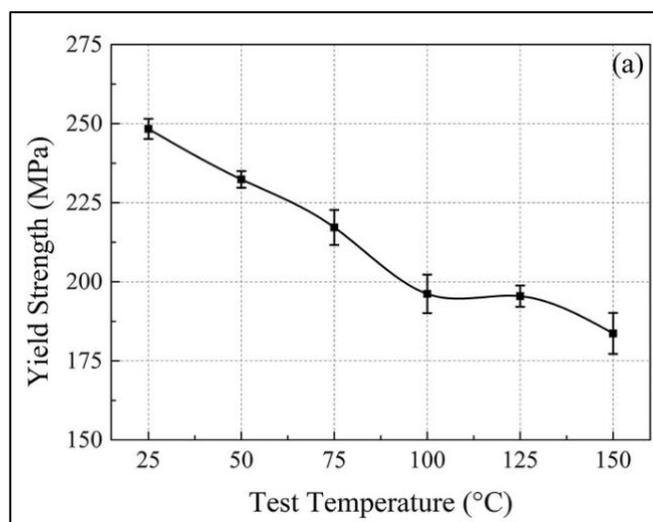


Figura 14. Resistencia a la fluencia en función de la temperatura del acero AISI 304. (Corrêa Soares, Mendes Rodrigues, & de Arruda Santos, 2017)

La temperatura teórica a la que se puede exponer el material según las referencias de los investigadores de los antecedentes de esta tesis, expone que el material AISI 304 disminuye hasta aproximadamente 180 MPa su resistencia a la fluencia, lo cual se debe considerar al momento de seleccionar los perfiles y espesores. (Corrêa Soares, Mendes Rodrigues, & de Arruda Santos, 2017)

La soldadura y el diseño de las uniones no permanentes, también se consideran en la etapa del cálculo de la estructura; en específico, la soldadura depende directamente del material base a soldar y de la resistencia del electrodo, por ello se realiza el cálculo de la soldadura para contar con las dimensiones correctas, además no sobre exponer el material base a un exceso de ataque de calor y que este se deforme. Para una soldadura correctamente ejecutada, se debe utilizar normas internacionales como la American Welding Society (AWS), según el material y lo que se debe soldar, entrega una serie de lineamientos para una soldadura de buena calidad. La AWS 5.18 muestra la clasificación de electrodos y sus propiedades. AWS 3.0 explica los términos y definiciones en soldadura. AWS D1.1 entrega los lineamientos para soldadura estructuras en acero al carbono y la D1.6 para soldadura de estructuras en acero inoxidable. Las normas permiten desarrollar o implementar la especificación del procedimiento de soldadura, el registro de calificación del procedimiento de soldadura y el registro de calificación del rendimiento del soldador. Para el cálculo de los esfuerzos en soldadura también se aplican los conocimientos de esfuerzo normal y cortante, por ejemplo, para una soldadura en V que se encontrará sometida a una tensión F , el esfuerzo normal se expresa con la ecuación 14. (Shigley, 2008)

$$\sigma = \frac{F}{h * l} \quad \dots (14)$$

Donde h es la garganta de la soldadura y l es la longitud. En la figura 15 se muestra una unión a tope típica para una soldadura en V con penetración completa, sometida a tensión. (Shigley, 2008)

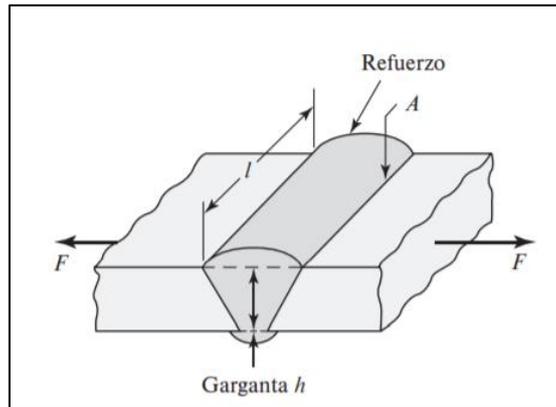


Figura 15. Unión a tope típica sometida a tensión. (Shigley, 2008)

El cálculo del esfuerzo cortante se realiza mediante la siguiente relación, muy similar a la de esfuerzo normal por tensión. Ver la figura 16 como referencia para el cálculo del esfuerzo cortante en cordón de soldadura en unión a tope típica.

$$\tau = \frac{F}{h * l} \quad \dots (15)$$

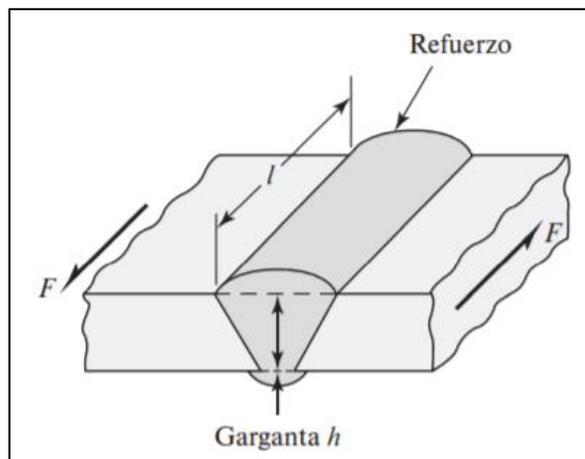


Figura 16. Unión a tope típica sometida a corte. (Shigley, 2008)

Una vez se dimensionan y seleccionan los materiales para un equipo o estructura de interés, se deben realizar los planos de fabricación para poder ejecutar el trabajo y materializar por ende el proyecto. Un producto terminado se debe presentar en un dibujo de conjunto donde cada elemento del producto también tenga un dibujo de detalle para propósitos de fabricación con precisión, esto se plantea en lo que se conoce como planos. El dibujo en ingeniería es necesario para una correcta comunicación entre el encargado del diseño y del técnico o ingeniero a cargo de la fabricación del producto. (Krar, Gill, & Smid, 2009)

Los planos deben presentar la geometría final del elemento a fabricar, espesores, acabado superficial, tolerancias, lista de materiales, peso, escala y unidades. En la actualidad se cuentan con diferentes softwares con los que se puede realizar dichos planos, por ejemplo: SolidWorks, Inventor y Autocad. Al igual que en la soldadura, para realizar los dibujos en los planos, se tienen normas con fines de uniformizar la manera en la que describimos un producto; es posible mencionar la norma ISO 5456 para el dibujo técnico. La norma DIN 16 y 17 también para el rotulado de los dibujos en planos.

La AWS estandariza la manera en cómo indicamos con precisión en un plano un elemento de soldadura. (Shigley, 2008) En el anexo 3 se presentan los diferentes tipos de uniones soldadas según ISO y AWS. Se menciona esto para tomar en consideración que los estándares de una sociedad a otra pueden variar. Por ejemplo, la simbología de soldadura de ISO y AWS suelen diferir en algunos puntos y se debe tener claro esto al momento del diseño de los planos. En la figura 16 se muestra la simbología según AWS

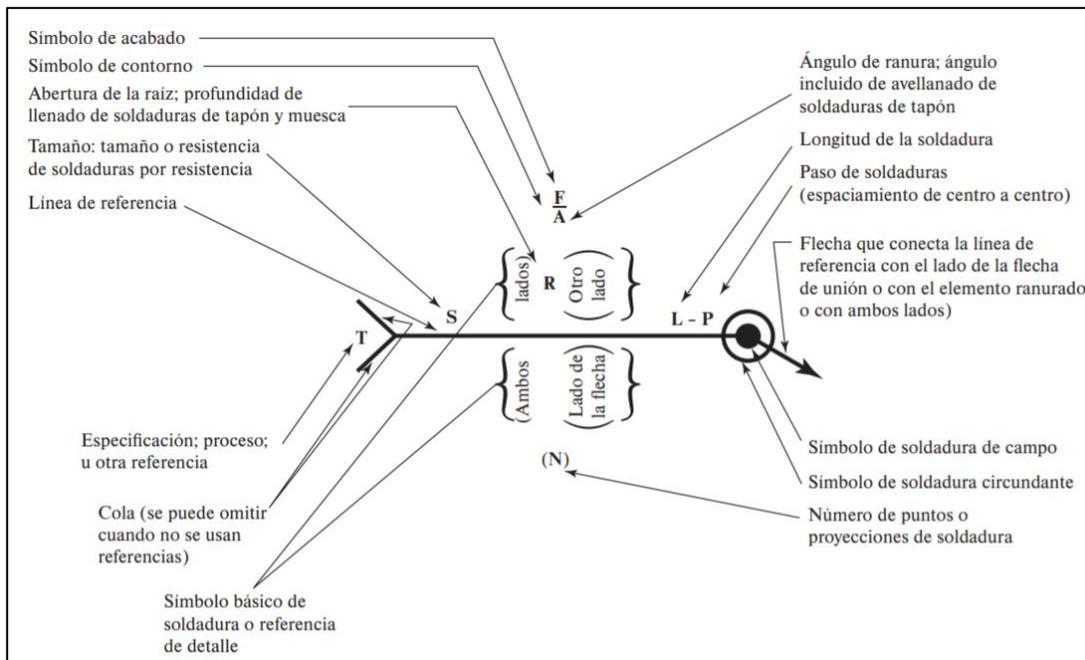


Figura 17. Simbología para soldadura según AWS. (Shigley, 2008)

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación: según la aplicación de sus resultados, esta investigación es del tipo aplicada. Porque se hace uso de las teorías existentes en energía, electricidad y estructuras para encontrar mejoras; de manera que se logre un diseño óptimo del secador y por ende aproveche mejor los recursos necesarios para su funcionamiento y sea seguro en operación.

Diseño de investigación: se adoptó un diseño experimental transversal, porque el proyecto se ejecuta y el investigador realiza las pruebas de funcionamiento, manipulando la variable temperatura para determinar cómo varía la resistencia de aislamiento de la bobina secada en el horno eléctrico optimizado.

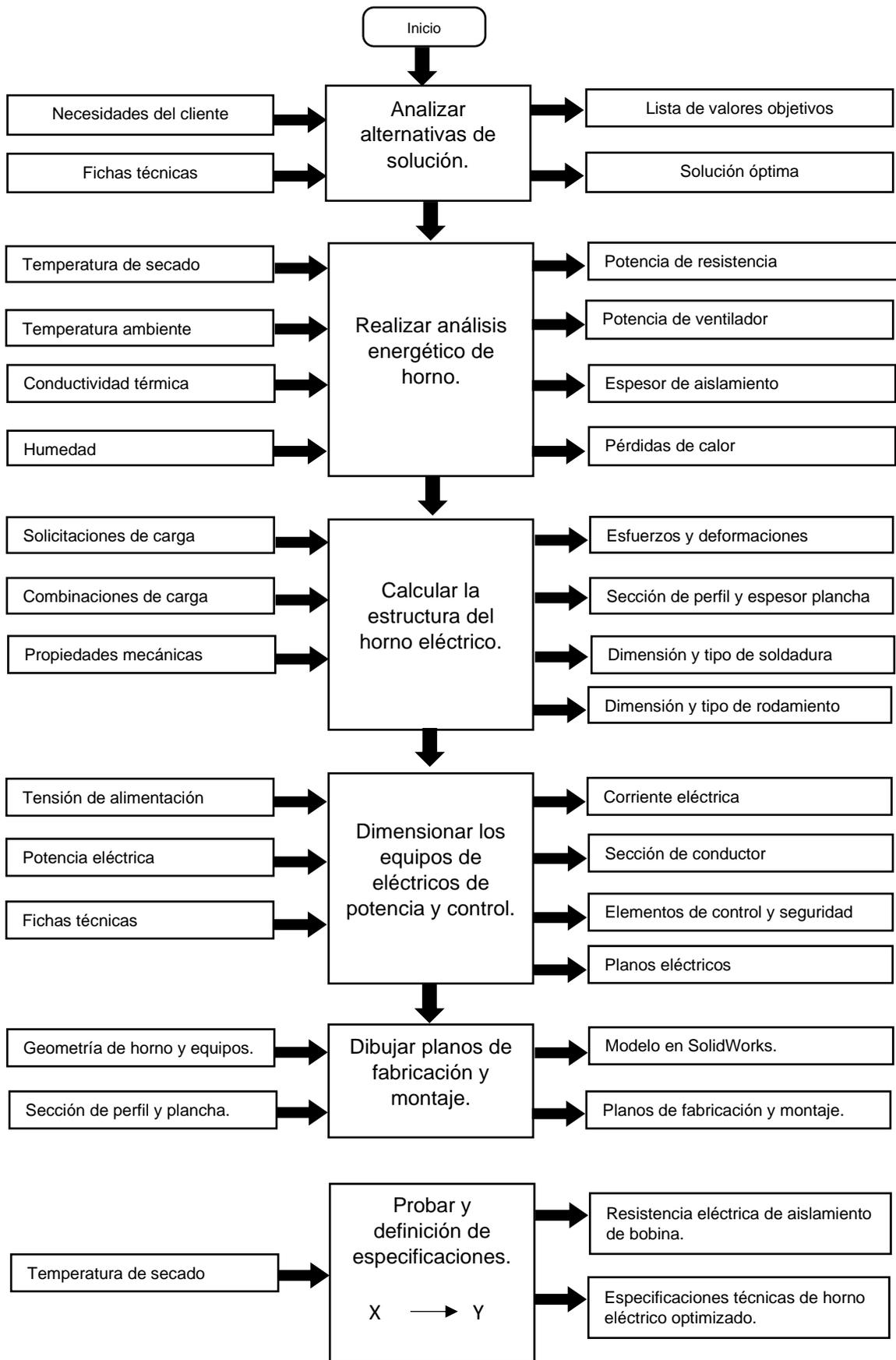


Figura 18. Diseño de investigación.

3.2. Variables y Operacionalización

3.2.1. Variables Dependientes

Diseño óptimo, resistencia de bobina, temperatura de secado, potencia consumida, Esfuerzo normal y cortante en la estructura, Costos de fabricación y operación.

3.2.2. Variables Independientes

Nivel de aislamiento de bobinas, Peso de la máquina eléctrica a secar.

Tabla 1.
Operacionalización de variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Escala de medición
Diseño óptimo	Proceso de refinar repetidamente un conjunto de criterios a menudo conflictivos para lograr el mejor compromiso. (Childs P. R., 2004)	Priorizar parámetros para optimizar el diseño.	Control de temperatura	°C	90 - 130 °C
			Energía perdida	W	< 5 %
Temperatura de secado (dependiente)	Es una propiedad intensiva que expresan el nivel térmico de un sistema (Cengel & Ghajar, 2011).	La diferencia de temperatura de dos cuerpos genera la transferencia de calor.	Temperatura ambiente	°C	< 200 °C
			Temperatura de secado		
Potencia eléctrica consumida (dependiente)	Es el trabajo eléctrico efectuado por unidad de tiempo (Cengel & Ghajar, 2011).	Es la energía consumida por unidad de tiempo para cambiar el estado de una carga.	Trabajo eléctrico por unidad de tiempo $P_e = WI$	Watts	< 20KW
			Trabajo de flecha por unidad de tiempo $P_m = 2\pi nT$		
Esfuerzos (dependiente)	Es la intensidad de las fuerzas distribuidas en una sección (Beer, Jhonston, Dewolft, & Mazurek, 2009).	Es la respuesta de un material frente a sollicitaciones de carga.	Esfuerzo normal	MPa	< 345 MPa
			Esfuerzo cortante		
			Resistencia a la fluencia		
Nivel de aislamiento de bobinas (independiente)	Es la resistencia al paso del flujo de electrones (ZEMANSKY, 2009).	Resistencia de aislamiento de bobina de una máquina eléctrica.	Resistencia de aislamiento.	GΩ	< 5.5 GΩ
Peso de la máquina eléctrica a secar (independiente)	Es la fuerza gravitacional que actúa sobre un cuerpo (Cengel & Ghajar, 2011).	Es el peso del equipo eléctrico de 300 HP que se ingresará en la cámara de secado.	Geometría	mm.	De razón
			Masa	Kg	< 1200 Kg

3.3. Población, muestra y muestreo

Población: Hornos eléctricos con control de temperatura para secado de bobinas de motores en Trujillo.

Muestra: 1 horno eléctrico con control de temperatura para secado de bobinas de motores de hasta 300 HP.

Muestreo: Aleatorio.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En esta investigación se utilizaron instrumentos para observación y análisis documental. En la tabla 2, se muestran las técnicas, instrumentos y materiales.

Tabla 2.
Técnica e instrumentos.

N°	Técnica	Instrumento	Materiales
1	Observación directa e indirecta	Registro de observación	Ficha de observación Megóhmetro. (Anexo 4) Cámara fotográfica
2	Análisis documental	Hoja de cálculo en Excel SolidWorks simulations Algoritmo de cálculo	Computadora Computadora Libros Calculadora

3.5. Procedimientos

Se aplicó la metodología de diseño para la optimización, con lo cual se pudo definir las métricas y los valores objetivos de la optimización en función de las necesidades del cliente y los valores de los hornos existentes. Se realizó la abstracción conceptual del horno eléctrico, mediante una caja negra y una descomposición del problema con la estructura de funciones. Se debió explorar tecnologías que soportaran cada función de la estructura planteada del horno eléctrico, de manera que se hicieron tablas de combinación para generar alternativas. Finalmente, en este paso, fue seleccionada la alternativa óptima.

Luego, se consideraron los parámetros mínimos de resistencia en bobinas y las temperaturas máximas a las que se deben realizar el secado, se realizaron los cálculos referentes a transferencia de calor para proyectar la temperatura externa del horno y determinar el espesor de aislamiento, para ello se usó el análisis documental y sus herramientas (hoja de cálculo en Excel y algoritmo de cálculo).

Se calculó la estructura haciendo uso del análisis documental y su herramienta SolidWorks y algoritmo de cálculo con libros y calculadora. Algunos de libros usados fueron: diseño en ingeniería mecánica de Shigley y mecánica de materiales de Beer. Con esta bibliografía también se calcularon y seleccionaron los rodamientos; del mismo modo se hizo con el dimensionamiento de la soldadura.

Se dimensionaron los equipos eléctricos con la información de las fichas técnicas y con los datos calculados en el análisis energético y la tensión de suministro de energía. Se dimensionaron los conductores eléctricos y los elementos de control y seguridad.

Se dibujaron los planos de fabricación con uso de SolidWorks y AutoCAD a partir de los resultados, considerando los estándares de dibujo en ingeniería.

Finalmente se realizó la prueba de funcionamiento, donde se manipularon la temperatura de secado para determinar su efecto en la resistencia de la bobina, la cual fue medida con un megóhmetro, asimismo, en cada prueba, se verificaba la temperatura de la superficie exterior del horno eléctrico de modo que se pruebe los resultados calculados en el análisis energético.

3.6. Métodos de análisis de Datos

Se realizó mediante análisis cuantitativo. Se realizó depuración de la información recopilada en la empresa Electromecánica Tesla y también se logró analizar el comportamiento de las variables mediante cálculo y hoja de cálculo y SolidWorks.

3.7. Aspectos éticos

En todas las etapas de la ejecución de esta tesis, se tomó en cuenta que el diseño del horno eléctrico sea amigable con el medio ambiente; además, como tesis aplicada buscó el beneficio social y la búsqueda de calidad, seguridad y ergonomía del personal que se involucró directamente con el resultado de la tesis.

IV. RESULTADOS

4.1. Análisis de alternativas de solución óptima de un horno eléctrico para secado de bobinas

Se requirió optimizar el funcionamiento de un horno eléctrico a partir del control de la temperatura en función del tiempo. Es decir, el nivel de aislamiento de una bobina de un motor eléctrico dependerá del secado dentro de los parámetros correctos a lo largo del tiempo que dure este proceso. En esta investigación, se adoptó la metodología del diseño para optimizar; debido a que es parte del proceso del diseño (Childs, 2004). La optimización se realizó considerando la metodología de diseño de productos de Ulrich y Eppinger.

4.1.1. Planeación del producto

Esta etapa no se abordó como el diseño de un producto para producción y venta, sino más bien, como la identificación de la necesidad de contar con un horno de secado de bobinas. Debe entenderse por etapa a una de las fases de la metodología de diseño aplicado a la optimización. Al no contar con un equipo existente en la empresa, la planeación no involucra mediciones en campo. El tiempo y los recursos necesarios para la optimización del diseño dependen directamente de la complejidad del producto que corresponda.

4.1.2. Desarrollo del concepto

El desarrollo del concepto es parte fundamental en la optimización del sistema, porque es donde se elige la combinación de tecnologías para cubrir cada etapa de la estructura de funciones del sistema del horno secador. Se da inicio con la identificación de las necesidades y con la puntuación de la importancia de cada una por parte de lo exigido por la empresa, que en este caso es electromecánica Tesla. Se describieron y calificaron 16 necesidades que se exigió para la optimización de su sistema de secado de bobinas de motores de hasta 300 HP. Se consideró una puntuación del 1 al 5, considerando 1 muy poco importante, 2 poco importante, 3 importante, 4 muy importante y 5 imprescindible. Como se observa, las necesidades imprescindibles en la optimización del diseño son: más espacio en la cámara de secado, control de temperatura y seguridad en operación del horno secador.

En la tabla 3, se muestran las necesidades que manifiestan la realización del estudio de optimización del diseño actual del horno de secado de bobinas.

Tabla 3.

Necesidades identificadas para optimizar el diseño actual del horno eléctrico secador de bobinas en la empresa Electromecánica Tesla.

N°	Necesidad del cliente		Importancia
1	Más espacio en la cámara de secado, para bobinas de 300 HP.	5	imprescindible
2	Controlar temperatura y tiempo de secado.	5	muy importante
3	Disminuir pérdidas de calor por las paredes del horno secador.	4	muy importante
4	Poder fabricarlo con las herramientas del área de metal-mecánica de la empresa.	3	importante
5	Permitir mantenimiento con herramientas sencillas.	2	poco importante
6	Seguridad en operación del horno secador.	5	imprescindible
7	Facilidad para alimentación y salida de carga a secar.	3	importante
8	Fácil e intuitiva configuración y operación.	3	importante
9	Señales de encendido, operación, apagado y emergencia.	4	muy importante
10	Accesible para inspección visual	2	poco importante
11	Estructura que soporte el peso propio y de la carga.	3	importante
12	Fácil fabricación.	3	importante
13	Facilidad de transporte.	2	poco importante
14	No contamine directa o indirectamente su operación.	3	importante
15	Tecnología de control de fácil programación y modificación.	4	importante
16	Costo de suministro, fabricación y montaje bajo.	2	poco importante

Una vez identificada la lista de necesidades se establecieron las especificaciones objetivo, según Ulrich y Eppinger, para optimizar el diseño actual en función a las 16 necesidades expuestas por el cliente. El método de Ulrich y Eppinger indican que es necesario dos pasos para determinar las especificaciones de un producto; estas son, las especificaciones objetivo y segundo, las especificaciones finales.

Tabla 4.

Lista de métricas para el horno eléctrico secador de bobinas en la empresa Electromecánica Tesla.

Métrica N°	Número de necesidad	Métrica	Importancia	Unidades
1	1,7	Área de la base exterior de la cámara de secado.	5	m
2	1,10,7	Altura exterior de la cámara de secado.	5	m
3	11,13	Peso del horno	3	
4	2,15	Error de control de temperatura de control	4	%
5	2,15	Rango de temperaturas de operación	4	°C
6	8,9,16	Tecnología de control de temperatura	4	-
7	3,14	Potencia eléctrica	4	W
8	3,14	Escape de calor	4	W
9	12, 16	Tiempo de producción de horno secador	3	Días
10	4,16	Costo de producción	3	\$
11	7	Tiempo de alimentación y retiro de la carga	2	tiempo
12	6	Protección eléctrica	4	-
13	5,10	Costo de mantenimiento	3	\$
14	10	Tiempo de mantenimiento	3	Horas
15	2, 14	Potencia de ventilador de recirculación	4	W
16	14,16	Fuente de energía	3	-
17	6	Seguridad de operación	5	-

Se verificaron que las 17 necesidades tienen métricas que buscan satisfacer dicha necesidad, para ello se traza una matriz para identificar el número de métricas por necesidad de la lista de especificaciones objetivo.

Tabla 5.

Matriz de relación de necesidades y métricas para la optimización del horno eléctrico secador de bobinas en la empresa Electromecánica Tesla.

NECESIDAD		MÉTRICA																	Métricas/ necesidad
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	Más espacio en la cámara de secado, para bobinas de 300 HP.	■	■																2
2	Controlar temperatura y tiempo de secado.				■	■											■		3
3	Disminuir pérdidas de calor por las paredes del horno secador.							■	■										2
4	Poder fabricarlo con las herramientas del área de metal-mecánica de la empresa.										■								1
5	Permitir mantenimiento con herramientas sencillas.													■					1
6	Seguridad en operación del horno secador.												■					■	2
7	Facilidad para alimentación y salida de carga a secar.	■	■									■							3
8	Facil e intuitiva configuración y operación.						■												1
9	Señales de encendido, operación, apagado y emergencia.						■												1
10	Accesible para inspección visual		■											■	■				3
11	Estructura que soporte el peso propio y de la carga.			■															1
12	Facil fabricación.									■									1
13	Facilidad de transporte.			■															1
14	No contamine directa o indirectamente su operación.							■	■							■	■		4
15	Tecnología de control de facil programación y modificación.				■	■													2
16	Costo de suministro, fabricación y montaje bajo.						■			■	■						■		4

Se procedió con la identificación de los valores de las métricas de 2 marcas de proveedores de hornos eléctricos para secado de bobinas de motores. La tarea fue recabar información para verificar las cantidades de las métricas de la competencia. Se encontraron 2 fabricantes de origen chino que ofrecen modelos con el espacio requerido para la capacidad máxima de 300 HP, estos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6.

Lista de proveedores de horno eléctrico y su origen.

N°	Descripción	Competencia 1	Competencia 2
1	Marca	YICHENG	Doing Machine
2	Modelo	YC-O1000	EI DR.-6
3	Origen	China	China

Los valores de las métricas de la competencia junto con los valores de las competencias, se muestran en la tabla 7.

Tabla 7.
Valores de métricas de la competencia.

Métrica N°	Número de necesidad	Métrica	Importancia	Unid.	Comp. 1	Comp. 2
1	1,7	Área de la base interior de la cámara de secado.	5	mxm	1.0 x 1.2	1.2 x 1.2
2	1,10,7	Altura interior de la cámara de secado.	5	m	1.3	1.0
3	11,13	Peso del horno	3	Tn	1.0	-
4	2,15	Error de control de temperatura de control	4	°C	+/- 3	+/- 2
5	2,15	Rango de temperaturas de operación	4	°C	< 200	< 200
6	8,9,16	Tecnología de control de temperatura	4	-	PLC	Controlador de temperatura AI708P+PT 100.
7	3,14	Potencia eléctrica	4	KW	12	15
8	3,14	Escape de calor	4	KW	N/I	0.75
9	12, 16	Tiempo de producción de horno secador	3	Días	30	45
10	4,16	Costo de producción aproximado	3	\$	45,000.00	50,000.00
11	7	Tiempo de alimentación y retiro de la carga	2	tiempo	N/I	N/I
12	6	Protección eléctrica	4	-	Anexo 6	Anexo 7
13	5,10	Costo de mantenimiento	3	\$	N/I	N/I
14	10	Tiempo de mantenimiento	3	Horas	N/I	N/I
15	2, 14	Potencia de ventilador de recirculación	4	KW	4.4	6
16	14,16	Fuente de energía	3	-	Eléctrico	Gas/eléctrico
17	6	Seguridad de operación	5	-	Anexo 6	-

Se procedió al planteamiento de los valores objetivos, estos son: el valor ideal y el valor marginalmente aceptablemente. El primero represente el valor óptimo y el último es el valor de la métrica que apenas cumple las expectativas. En la tabla 8 muestra los valores objetivos de cada métrica para optimizar el diseño actual.

Tabla 8.

Valores objetivos de la optimización del diseño del horno eléctrico secador de bobinas en la empresa Electromecánica Tesla.

Métrica N°	Número de necesidad	Métrica	Importancia	Unidades	Valor ideal	Valor marginal
1	1,7	Área de la base interior de la cámara de secado.	5	m x m	0.9 x 1.0	1.0 x 1.2
2	1,10,7	Altura interior de la cámara de secado.	5	m	1.0	1.3
3	11,13	Peso del horno	3	Tn	0.9	1.65
4	2,15	Error de control de temperatura de control	4	°C	+/- 2	+/- 3
5	2,15	Rango de temperaturas de operación	4	°C	< 200	< 180
6	8,9,16	Tecnología de control de temperatura	4	-	Controlador de temperatura AI708P+PT100	PLC
7	3,14	Potencia eléctrica	4	KW	12	21
8	3,14	Escape de calor	4	KW	0.65	0.75
9	12, 16	Tiempo de producción de horno secador	3	Días	30	45
10	4,16	Costo de producción aproximado	3	\$	35,000.00	45,000.00
11	7	Tiempo de alimentación y retiro de la carga	2	seg.	120	180
12	6	Protección eléctrica	4	-	Cortocircuito	Cortocircuito
13	5,10	Costo de mantenimiento	3	\$	bajo	medio
14	10	Tiempo de mantenimiento	3	Horas/mes	2	4
15	2, 14	Potencia de ventilador de recirculación	4	KW	3	4.4
16	14,16	Fuente de energía	3	-	Estable y continua.	Estable y continua.
17	6	Seguridad de operación	5	-	Señalización bajo norma	Señalización bajo norma

Esto se conoce como la lista de exigencias en el desarrollo del concepto, en función a esto se procedió a la ampliación del conocimiento del equipo a optimizar, mediante la abstracción del sistema como un bloque funcional conocido como black box con entradas y salidas de energía, materia y señal como indica Ulrich y Eppinger. En la figura 19 se muestra el black box del sistema.

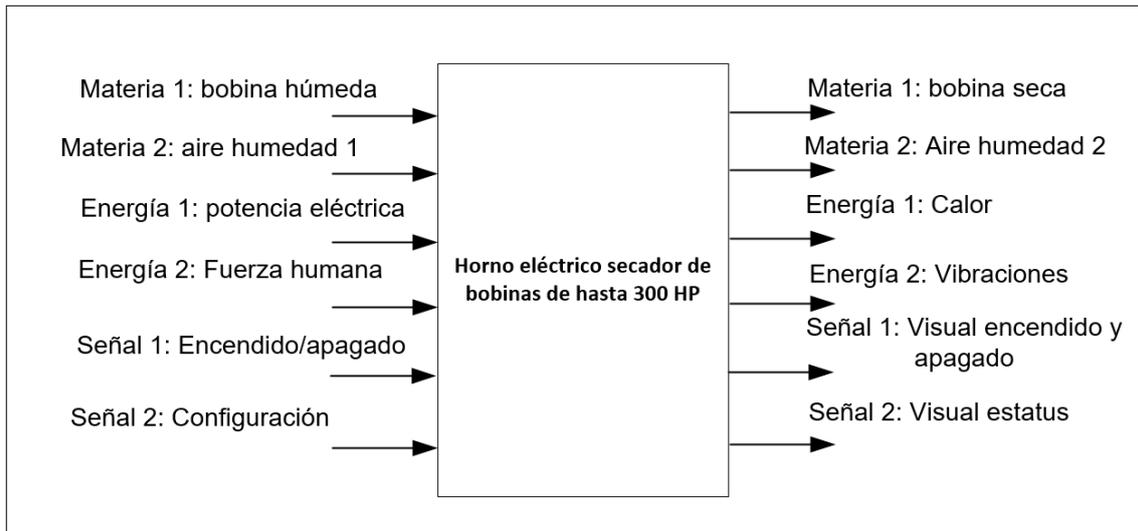


Figura 19. Black box de horno eléctrico secador de bobinas de hasta 300 HP.

Se describieron los flujos de ingreso:

- Materia: Bobina húmeda y aire con humedad 1. Es decir, en el sistema secador se ingresa la bobina con humedad y el aire para realizar el secado.
- Energía: Potencia térmica estable y continua durante el secado y la fuerza humana para algunas actividades previas y posteriores al proceso de secado.
- Señal: Encendido, apagado y configuración. Es necesario realizar el conocido setting del equipo para definir los parámetros de funcionamiento que dependen de la carga.

Se describieron los flujos de salida:

- Materia: Bobina húmeda y aire con humedad 2. Esto es, el sistema debe permitir la evaporación de la humedad mediante la transferencia de calor del aire caliente con humedad 1 hacia la bobina; de manera que el aire sale a menor temperatura y mayor humedad.
- Energía: Calor y vibraciones. Como en todo sistema, se encuentran pérdidas por calor y por vibraciones de los equipos mecánicos.
- Señal: Visual para encendido, apagado y el estatus del proceso de secado de la bobina.

También, se realizó la descomposición funcional para conocer las etapas o funciones para las que se buscan tecnologías para las alternativas de solución.

En la figura 20, se muestra la estructura de funciones del horno eléctrico secador de bobinas de hasta 300 HP.

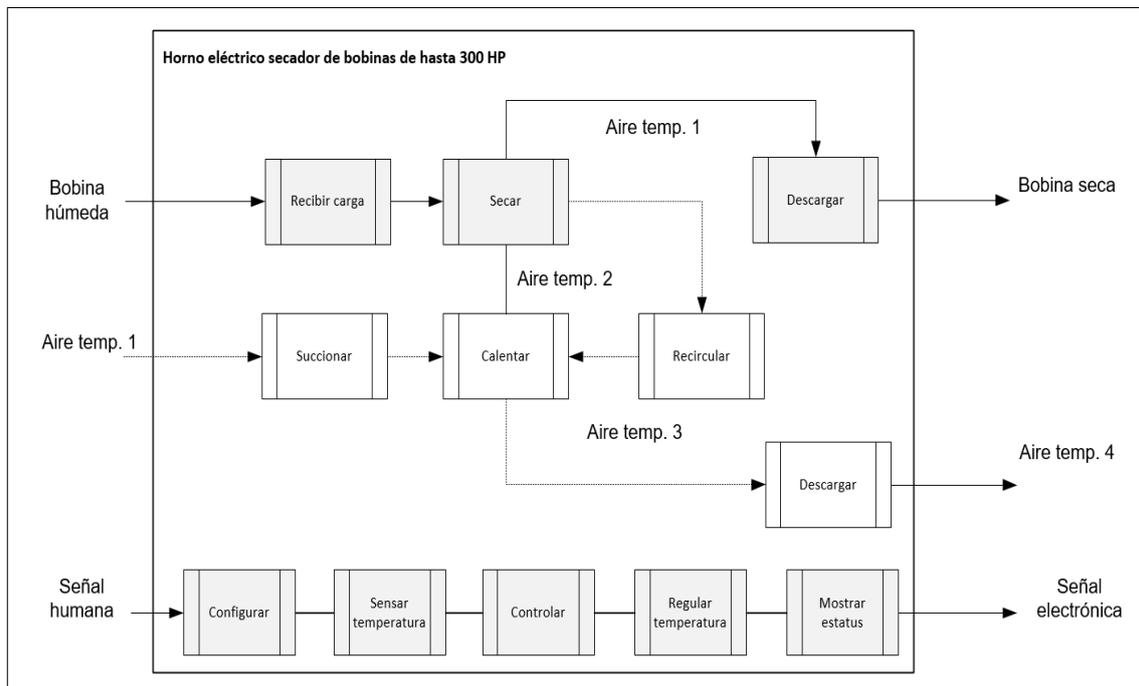
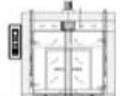
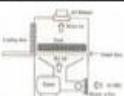
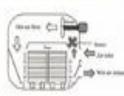


Figura 20. Estructura de funciones para optimizar el horno eléctrico secador de bobinas de hasta 300 HP.

Una vez definida la estructura de funciones, se procedió a explorar tecnologías como alternativas para optimizar cada función, todo ello en tablas de combinación para la estructura de la bobina, para el circuito del aire y para las señales. En la tabla 9, se muestra la tabla de combinación de la estructura de funciones de la bobina (materia 1). En la tabla 10, se muestra la tabla de combinación de la estructura de funciones del circuito de aire (materia 2) y finalmente en la tabla 11 se muestra la tabla de combinación de energía y señales.

Tabla 9.
Tabla de combinación de materia 1.

Materia 1				
Opción	Recibir	Manipular	Secar	Descargar
1	Riel y base móvil con puerta acoplada	Carga en movimiento con accionamiento mecánico	Secado de aire forzado por paredes con motor en techo	Acceso único de recepción y descarga
				
2	Estructura independiente con ruedas	Carga en movimiento sobre un eje vertical con accionamiento mecánico	Secado de aire forzado por base	Por puerta adicional en la misma dirección de recepción
				
3	Riel y base móvil	Sin movimiento	Secado de aire forzado por paredes con motor en pared	Acceso único de recepción y descarga
				

En el proceso de exploración de tecnologías, se identificó una función adicional, esta es la manipulación de la bobina en el interior de la cámara de secado.

Tabla 10.
Tabla de combinación de materia 2.

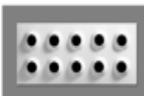
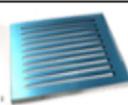
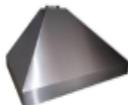
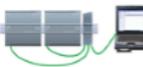
Materia 2				
Opción	Succionar	Calentar	Ventilar	Descargar
1	Damper	Resistencia con aleta radial	Ventilador axial	Torebas
				
2	Campana con deflectores	Resistencia sin aletas	Ventilador axial	Deflectores
				
3	Campana de succión	Resistencia con aletas continuas	Ventilador centrifugo	Damper
				

Tabla 11.
Tabla de combinación de energía y señal.

Opción	Energía y señal				
	Configurar	Sensar	Controlar	Regular	Mostrar status
1	Usuario remoto desde computadora	Infrarojo	Circuito integrado programable	On/off automatico de resistencias	Monitoreo remoto desde computadora
					
2	Usuario remoto desde celular	RTD	PLC	Variador de frecuencia de motor de ventilador	Monitoreo inalámbrico
					
3	Usuario con tablero in situ	Termopar	Manual	On/off manual de resistencias	Display numerico
					
4	Usuario con tablero independiente	Termistor	Controlador de temperatura compacto	On/off automatico de resistencias	Pantalla HMI touch
					

Las estructuras de funciones de materia 1 y 2, se combinaron para definir 3 conceptos de solución, para ello se debe considerar el color de las líneas en la tabla 9 y 10. Los conceptos de solución se plasmaron en bosquejos hechos a mano para representar la idea de cómo combinar las tecnologías y posteriormente evaluarlas.

En el caso de la estructura de funciones de señal y energía, no se ha considerado combinarla con la estructura de funciones de materia, debido a que es tecnología de control y puede adaptarse para cualquiera de las estructuras de funciones de materia. Debe aclararse que esto no está indicado en la metodología de Ulrich para el diseño de productos, la decisión de apartar ambas estructuras en la generación y evaluación de conceptos, fue de los autores de esta investigación.

Las alternativas de solución se nombraron como MA, MB y MC para el caso de la materia y para la estructura de funciones de señal y energía se colocó SA, SB, SC y SD. A continuación, se describen y se presentan los bosquejos de cada una de estas alternativas de solución como parte del desarrollo del concepto de un horno secador de bobinas de motores eléctricos.

La alternativa de solución MA, representada en la tabla de combinación por la línea color morado, consiste en recibir la carga mediante un carrito con riel, que hace de base y puerta; esto tiene la ventaja que no se deberá disponer de algún sistema

para el pivoteo de la puerta, además cuando se retira el motor, no se expondrá directamente al operario a la temperatura del interior de la cámara. La desventaja de esta tecnología que, si se desea trasladar la carga a otra zona de la planta, será necesario otro medio de transporte. La manipulación de la carga se considera rotatoria con accionamiento mecánico que se puede adecuar a la base móvil con puerta. La tecnología de secado es por alimentación de aire a cámara por las paredes y succionado por el techo. El aire se descarga mediante dámper automático y se succiona por campana, esto permite un mejor control de aire y gases. El calentamiento del aire se propone resistencia eléctrica con aletas térmicas para aumentar el área de transferencia de calor y se tenga una mayor velocidad de calentamiento del aire. El ventilador se consideró centrífugo de succión por techo con ducto de descarga bidireccional del aire por las paredes laterales. Finalmente, la descarga o salida de la carga se realiza por la misma puerta. En la figura 21, se muestra el bosquejo de la alternativa de solución MA.

La alternativa de solución MB es la que se encuentra indicada con color celeste. En este concepto la carga se acerca mediante una base móvil externa, es decir el secador debería contar con una base estática. No manipula la carga en el interior. Se realiza el secado mediante aire forzado con motor instalado en la parte inferior de la pared, pero con el ducto de succión por la base, se puede inferir que la corriente de aire estará a favor de la dirección de la caída de los residuos del barnizado. La succión se realiza mediante dámper con un ventilador axial con descarga mediante toberas con modificación de dirección de flujo. Se propone una resistencia eléctrica con aletas térmicas, pero de menor superficie que en el concepto MA. Finalmente, la entrega es por otra puerta, dando la ventaja de una producción en serie, si bien es cierto esto depende de la cantidad de servicios de secado tendrá que realizar el horno. En la figura 22, se muestra el concepto de la alternativa MB.

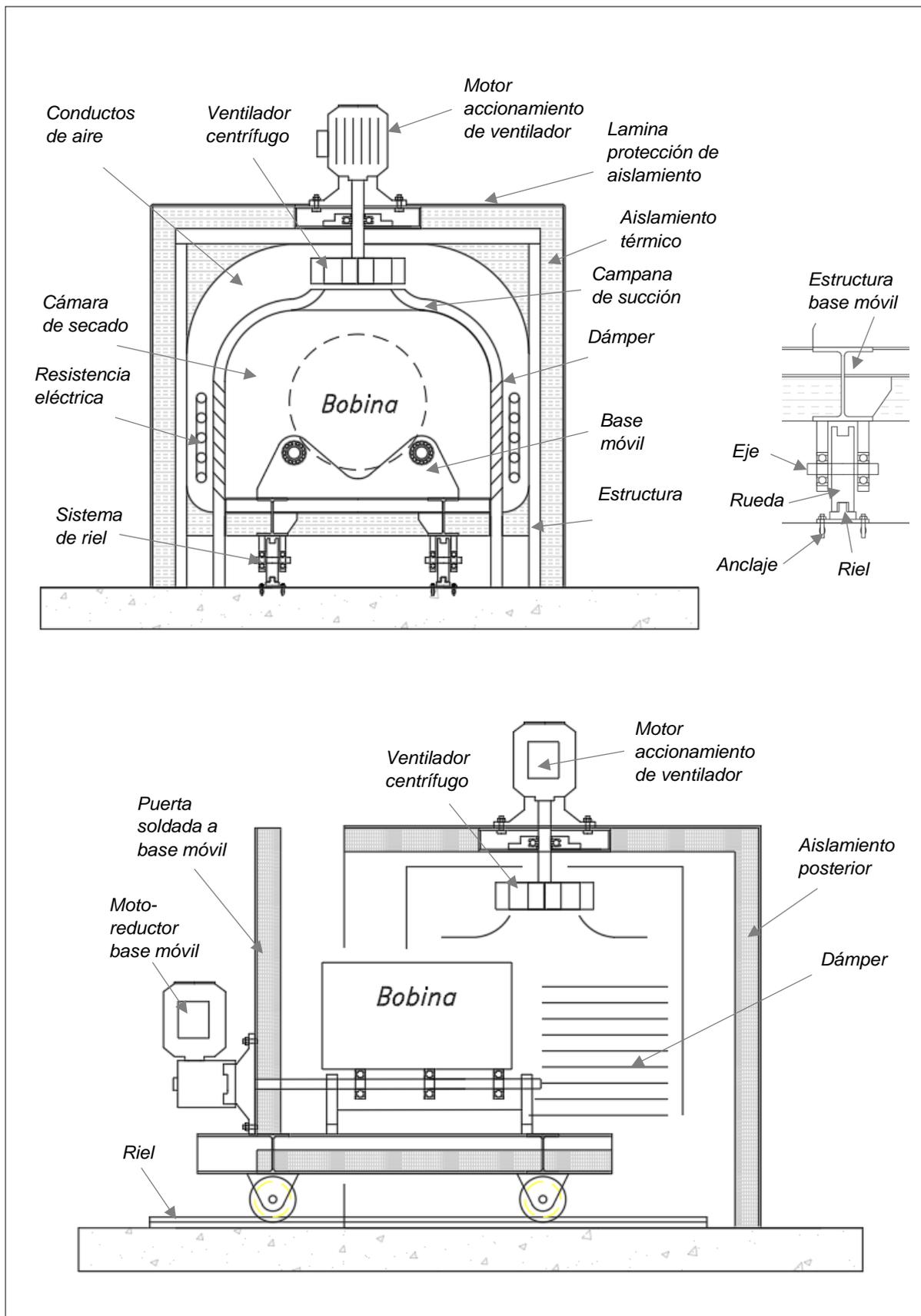


Figura 21. Bosquejo de alternativa de solución MA.

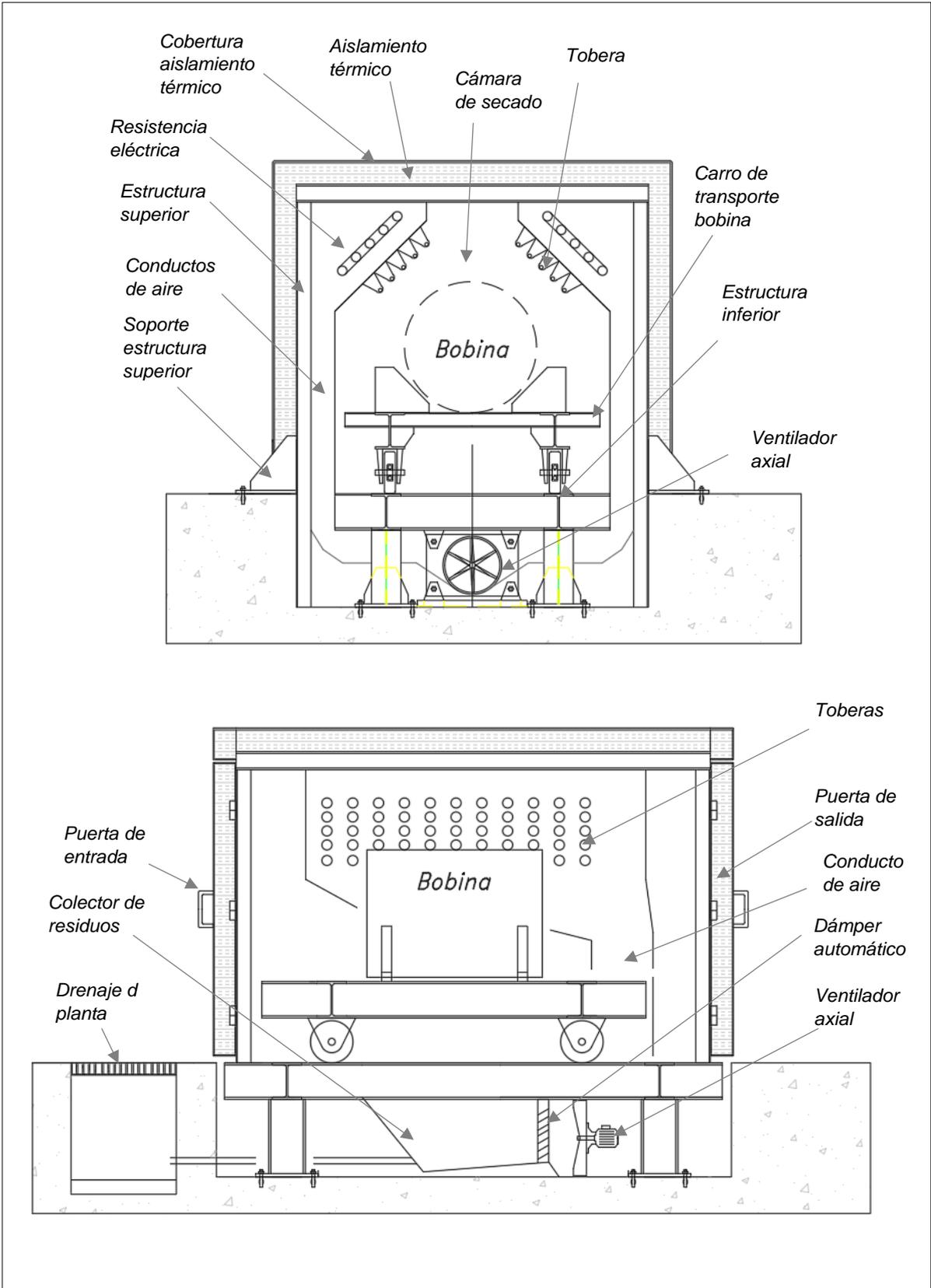


Figura 22. Bosquejo de alternativa de solución MB.

La alternativa de solución MC, es la que se une mediante las flechas color rojo. En este concepto de solución se consideró la recepción de la carga mediante una base móvil, pero a diferencia del concepto MA, la puerta es independientes de la base. La manipulación de la carga se consideró como giratoria alrededor de un eje vertical, este concepto similar al concepto MA, busca lograr que todas las superficies se expongan a la corriente de aire, por ello que ambos se considera movimiento de la carga. Por la inercia de la carga, la manipulación de la carga se considera con accionamiento mecánico. El secado se realizaría con ventilador por la parte superior de la pared y con la resistencia ubicada en la succión, no en la descarga como en los conceptos anteriores. La succión se realiza mediante campana con deflectores estáticos. El concepto MC a punta a hacer un diseño económico, por lo cual se considera una resistencia eléctrica sin aletas térmicas, ventilador de flujo axial y rejilla o deflectores estáticos en la descarga de aire. La salida de la bobina es por la misma puerta de recepción. En la figura 23, se muestra el concepto MC del horno secador.

Los conceptos de solución de la estructura de funciones de señal y energía se realizaron sin gráfica, debido a que la matriz de combinación expresa con claridad cada alternativa de solución; esta también está indicado en la metodología de diseño de Ulrich.

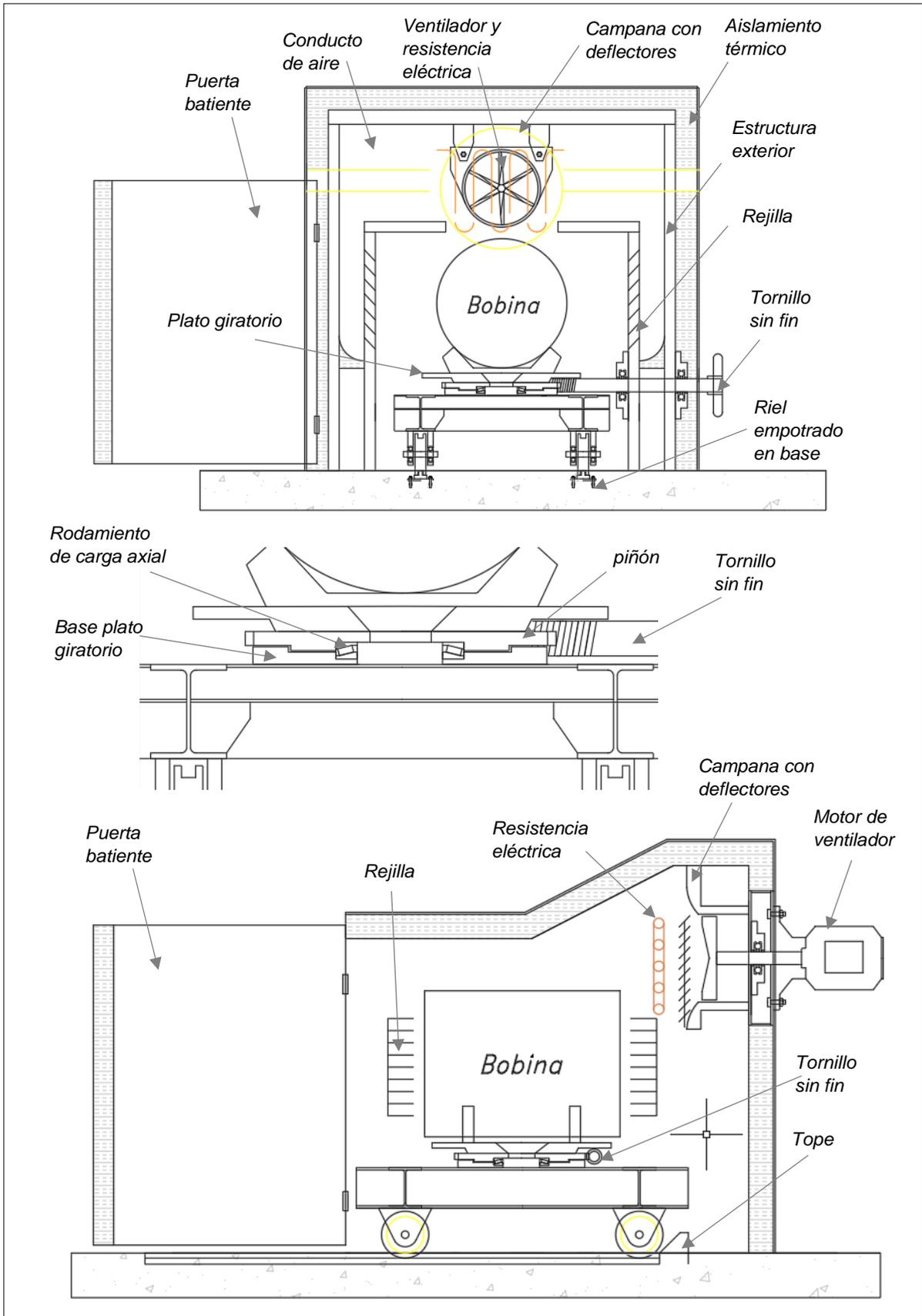


Figura 23. Bosquejo de alternativa de solución MC.

4.1.3. Evaluación de conceptos

Debido a que solo se propusieron como máximo 3 conceptos por estructura, entonces, no se realizó el filtrado de conceptos que indica la metodología de Pugh, citado por Ulrich. Se plantearon los criterios de selección en función de la lista de necesidades de la tabla 3 considerando la importancia de cada necesidad. Cada criterio debe cubrir como mínimo una de las necesidades. La calificación se realizó desde el 1 al 5, para referirse a muy poco y demasiado respectivamente. En la tabla 12, se muestra la matriz de selección del concepto de solución óptimo.

Tabla 12.
Matriz de selección de conceptos de la parte mecánica.

Criterios de selección	Peso	Conceptos					
		A		B		C	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Facilidad de fabricación	18%	3	0.54	2	0.36	3	0.54
Facilidad de instalación	11%	2	0.23	2	0.23	3	0.34
Facilidad de operación	26%	4	1.05	3	0.79	3	0.79
Facilidad de mantenimiento	7%	2	0.13	2	0.13	3	0.20
Bajo consumo de energía	11%	2	0.23	3	0.34	4	0.46
Seguridad en operación	23%	3	0.69	3	0.69	3	0.69
Facilidad de reubicación en planta	3%	2	0.07	4	0.13	3	0.10
	100%		2.93		2.67		3.11

En la tabla 12 se obtuvo que el concepto de solución MC presenta mayor valor total de su evaluación ponderada; por ello en función a este concepto, se realizó la evaluación de las alternativas de control.

4.2. Análisis energético de horno eléctrico

El estudio de optimización desde el punto de vista energético es aprovechar el recurso de energía dando las condiciones de secado adecuadas. Se menciona esto último, haciendo referencia a la temperatura y tiempo de secado indicada por el fabricante. Sin embargo, es natural el planteamiento de la pregunta, al margen de los conceptos evaluados en la sección anterior, que medio de secado producirá un aislamiento de la bobina en valores aceptables.

El propósito del estudio energético es determinar las temperaturas en función del tiempo y el consumo de energía en el proceso en un tiempo determinado. Esto hace que la atención se dirija al estudio en estado transitorio. Asimismo, se plantean 2 casos de estudio, el primero es considerando un horno con resistencias en las paredes con transferencia de calor por convección natural y por radiación; el segundo es con transferencia de calor por convección forzada y radiación. En la figura 24 se muestra los parámetros del estudio por convección natural por ambos lados y en la figura 25 se muestra para el caso de convección forzada interior.

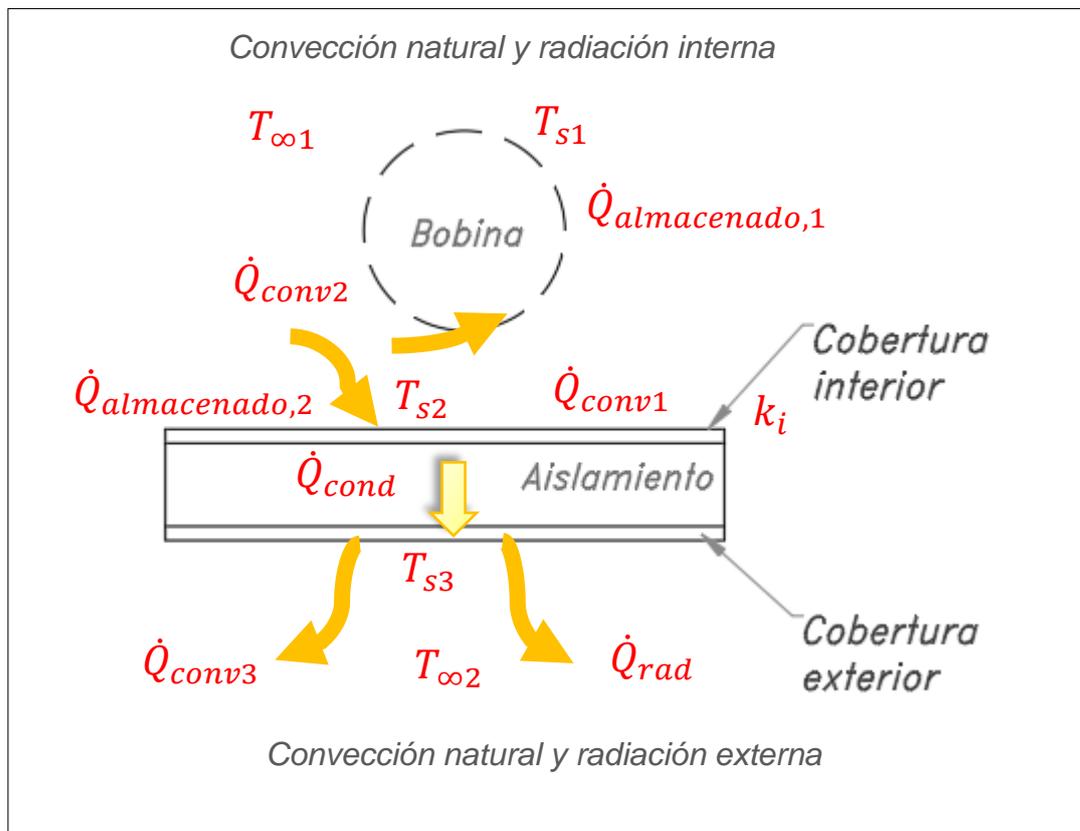


Figura 24. Parámetros de estudio de transferencia de calor en horno con secado por convección natural y radiación.

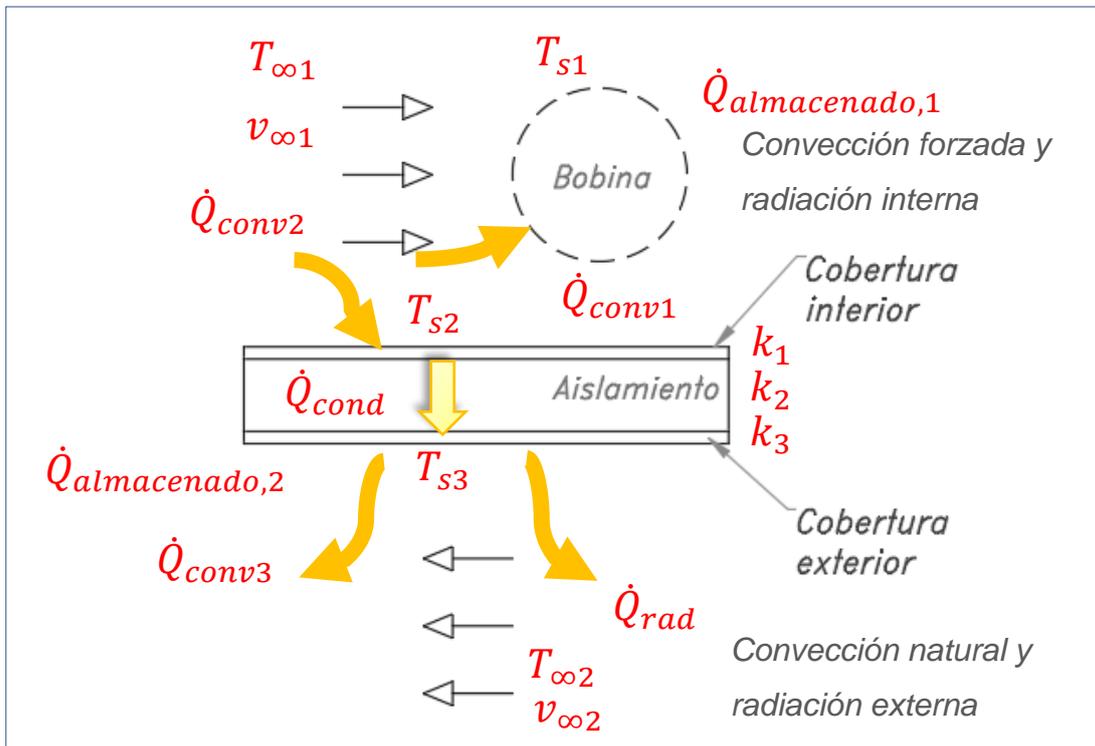


Figura 25. Parámetros de estudio de transferencia de calor en horno de secado por convección forzada y radiación.

El estudio de los mecanismos se realizó por separado. El punto de partida se consideró el dato conocido de la temperatura máxima en el interior de la cámara requerida. La temperatura junto con el tiempo de estancia en el interior de la cámara de secado se encuentra en las indicaciones del proveedor del barniz. La velocidad del aire en el interior de la cámara se iteró con distintos valores para observar la variación de los parámetros del esquema de la figura 24.

El análisis energético consideró el almacenamiento de energía en la bobina, las paredes y la estructura a través del régimen de transferencia transitorio hasta lograr un proceso estacionario. Se encuentran más cuerpos involucrados, sin embargo, asumirlos cero, no genera un error significativo en el cálculo. El balance queda de la siguiente manera.

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{almacenado} + \dot{Q}_{perdido} \quad \dots (16)$$

Donde, \dot{Q}_{total} , es la energía total requerida, $\dot{Q}_{almacenado}$, es la energía almacenada en los cuerpos de la cámara de secado y $\dot{Q}_{perdido}$, es la energía transmitida al exterior (pérdida). En la figura 25, se muestra el diagrama de Zankey del flujo de energía en el sistema.

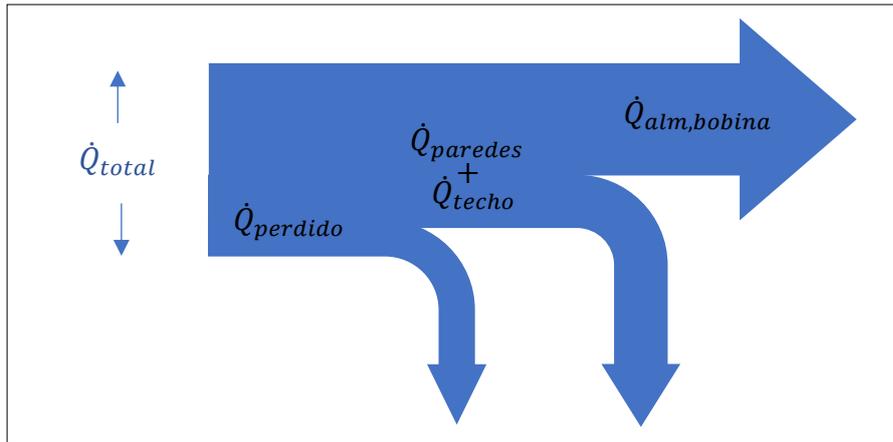


Figura 26. Diagrama de Zankey del flujo de energía en la cámara de secado.

4.2.1. Análisis de energía almacenada

Se detalla el cálculo de energía para el horno de secado por convección forzada, para el caso de convección natural, se adjuntan los resultados en una tabla. La energía almacenada se da en el régimen transitorio del proceso de secado y se calculó por separado, como se muestra en la ecuación 17.

$$\dot{Q}_{almacenado} = \dot{Q}_{alm,bobina} + \dot{Q}_{alm,paredes} + \dot{Q}_{alm,techo} \quad \dots (17)$$

Se buscó calcular la energía almacenada en la bobina mediante la idealización de la bobina como un sistema concentrado, para lo cual se considera la geometría idealizada mostrada en la figura 26. Se calculó el número de Biot para determinar si es posible realizar dicha idealización para simplificar el análisis. El número de Biot, es la razón de oposición interna de un cuerpo frente al mecanismo de conducción; para esto fue necesario calcular la longitud característica. El área de la superficie idealizada de la bobina, se calculó considerando una bobina de 500 mm de diámetro y 700 mm de longitud. Se realizó un programa en MATLAB para determinar las propiedades del aire a la temperatura de película.

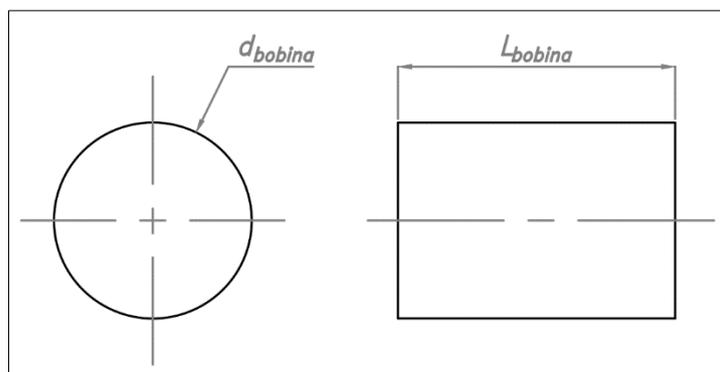


Figura 27. Idealización de bobina de motor para el modelo de cálculo propuesto.

- Temperatura de película.

$$T_{pelicula} = \frac{T_{\infty} + T_{bobina}}{2} = \frac{200 + 30}{2} = 115 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \dots (18)$$

- Área de superficie cilíndrica de la bobina idealizada.

$$A_{desarrollada} = \pi * d_{bobina} * L_{bobina} = \pi * 0.50 * 0.70 = 1.10 \text{ m}^2 \quad \dots (19)$$

- Volumen de bobina idealizada.

$$Vol_{bobina} = \frac{\pi}{4} * d_{bobina}^2 * L_{bobina} = \frac{\pi}{4} * 0.50^2 * 0.70 = 0.137 \text{ m}^3 \quad \dots (20)$$

- Longitud característica

$$L_c = \frac{Vol_{bobina}}{A_{desarrollada}} = \frac{0.137}{1.10} = 0.125 \text{ m} \quad \dots (21)$$

- La conductividad térmica del cobre a temperatura de película

$$k_{cobre,115^\circ\text{C}} = \frac{388 - 200}{400 - 200} * (393 - 413) + 413 = 394.20 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$$

- Coeficiente de transferencia convectivo aproximado considerando velocidad de flujo igual 15 m/s (Carabogdan, 1986).

$$h_{conv} = 11.6 + 6.96\sqrt{V_{\infty}^*} = 11.6 + 6.96 * \sqrt{15} = 38.56 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{C}} \quad \dots (23)$$

- Número de Biot.

$$Bi = \frac{h * L_c}{k_{bobina}} = \frac{38.56 * 0.125}{394.20} = 0.012 \leq 0.1 \quad \dots (24)$$

Se cumplió la condición para considerar la bobina idealizada como un sistema concentrado.

- Calor específico a presión constante del cobre a temperatura de película.

$$C_{p_{cobre}} = \frac{388 - 200}{400 - 200} * (397 - 356) + 356 = 394.54 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} \quad \dots (25)$$

- Inverso de la constante de tiempo

$$b = \frac{h * A_{desarrollada}}{\rho_{bobina} * Vol_{bobina} * C_{p_{bobina}}} = \frac{38.56 * 1.10}{8960 * 0.137 * 394.54} = 0.000088 \quad \dots (26)$$

- La temperatura de la superficie en función del tiempo de la superficie de la bobina

$$T(t) = e^{-bt} * (T_i - T_\infty) + T_\infty \quad \dots (27)$$

$$T(t) = e^{-0.000088 * 3600 * 2} * (30 - 200) + 200 = 109.51 \text{ }^\circ\text{C}$$

- La energía requerida para elevar hasta 109.51 °C la bobina modelada

$$Q_{carga} = m * c_p * (T(t) - T_0) = 1231.50 * 394.54 * (109.51 - 30) = 38\,632\,001.56 \text{ J}$$

- La potencia consumida por la carga desde t=0 s hasta t=7200 s

$$\dot{Q}_{carga} = \frac{Q_{carga}}{t} = \frac{38\,632\,001.56}{7200} = 5365.56 \text{ W} \quad \dots (28)$$

El consumo de energía por el aumento de la energía interna de la bobina idealizada como un cuerpo cilíndrico concentrado, es igual a 5365.56 KW. Sin embargo, la velocidad se iteró como 15 m/s con lo cual se determinó el coeficiente de transferencia de calor por convección mediante una relación empírica de Carabogdan. Por este motivo, se realizó el recálculo de la velocidad del aire mediante la determinación de los números adimensionales de Reynolds y Nusselt. Considerando las propiedades del aire a la temperatura de película igual a 115°C (ecuación 18).

- Número de Nusselt o coeficiente adimensional de convección

$$Nu = \frac{h_{conv} * d_{bobina}}{k_{aire}} = \frac{38.56 * 0.500}{0.0320} = 602.50 \quad \dots (29)$$

- Número de Reynolds se calculó considerando la tabla adjunta en anexo 8.

$$Nu = C * Re^n * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \dots (30)$$

Donde los parámetros C y n dependen del número de Reynolds, por este motivo, esta sección es iterativa de manera que se encuentre el valor del Reynolds que satisfaga el número de Nusselt calculado. Se puede realizar de dos maneras, una es considerando temporalmente la velocidad asumida en la ecuación 23 y la otra opción es iterar con los valores extremos de Reynolds 40000 y 400000. Para este valor el coeficiente C y el exponente n, adoptan los valores 0.027 y 0.805

respectivamente. El asterisco en los números adimensionales indica que son valores iterados. El número de Prandtl Pr, es una propiedad del aire a la temperatura de película.

$$Nu^* = 0.027 * Re^{*0.805} * Pr^{\frac{1}{3}} = 0.027 * 40000^{0.805} * 0.7083^{\frac{1}{3}} = 121.93$$

$$Nu^{**} = 0.027 * Re^{**0.805} * Pr^{\frac{1}{3}} = 0.027 * 400000^{0.805} * 0.7083^{\frac{1}{3}} = 778.21$$

$$Nu^* = 121.93 < Nu = 602.50 < Nu^{**} = 778.21$$

Esto indicó que el Reynolds para el número de Nusselt calculado está dentro del rango y por lo tanto se deben usar los coeficientes 0.027 y 0.805. Entonces, el número de Reynolds del flujo de aire, es:

$$Re = \left(\frac{Nu}{0.027 * Pr^{\frac{1}{3}}} \right)^{\left(\frac{1}{0.805} \right)} = \left(\frac{602.50}{0.027 * 0.7083^{\frac{1}{3}}} \right)^{\left(\frac{1}{0.805} \right)} = 291\,072.44 \quad \dots (31)$$

- La velocidad del aire que produciría el coeficiente de transferencia de calor por convección calculado en la ecuación 23, es:

$$V_{\infty} = \frac{Re * \nu_{aire}}{d_{bobina}} = \frac{291\,072.44 * 2.468 * 10^{-5}}{0.50} = 14.37 \frac{m}{s} \quad \dots (32)$$

También se calculó la transferencia de calor a la bobina por medio de la ecuación de enfriamiento de Newton. Este método da un valor aproximado de la potencia transferida a la carga en la cámara de secado.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_{desarrollada}(T_{\infty} - T_s) = 38.56 * 1.1 * (200 - 30) = 7210.70 \text{ W}$$

Para obtener el valor total de la potencia consumida por la carga mediante este método alternativo, se multiplicó por la longitud de la bobina.

$$\dot{Q}^*_{carga} = \dot{Q}_{conv} * L = 7210.70 * 0.7 = 5047.50 \text{ W}$$

Se realizó un programa en MATLAB para el cálculo del número de Nusselt, Reynolds, velocidad y las propiedades del aire a la temperatura de película. El programa da los resultados para los métodos.

=====

PROGRAMA PARA CÁLCULO DE POTENCIA CONSUMIDA POR LA CARGA EN EL INTERIOR DEL HORNO SECADOR PARA BOBINAS DE HASTA 300 HP.

=====

INGRESO DE DATOS PARA CALCULO DE VELOCIDAD DE FLUJO DE AIRE

Ingresar diámetro de bobina (mm): 500
 Ingresar longitud de bobina (mm): 700
 Ingresar velocidad de flujo de aire (m/s): 15
 Ingresar temperatura superficial inicial (°C): 30
 Ingresar temperatura del aire de secado (°C): 200

PROPIEDADES DEL AIRE A TEMPERATURA DE PELÍCULA

Densidad (Kg/m ³)	Calor esp. (J/Kg*K)	Cond. Term. (W/m*K)	Visc. Cine. *10 ⁻⁵ (m ² /s)	Núm. Prandl (adimensional)
0.9097	1010.50	0.03200	2.4680	0.7083

"Se puede considerar como un sistema concentrado"

*Nota: Número de Reynolds dentro del rango 40000 < Re < 400000

POTENCIA CONSUMIDA POR LA CARGA POR ANALISIS DE SISTEMAS CONCENTRADOS

Potencia carga (W)	Vel. aire iterada(m/s)	Coef. conv. (W/m ² *°C)	Inverso de const. tiempo	Temperatura T(2 horas)
5351.30	15.00	38.56	0.00009	109.30

POTENCIA CONSUMIDA POR LA CARGA POR ECUACIÓN DE ENFRIAMIENTO DE NEWTON

Núm Nusselt	Núm Reynolds	Velocidad Rec (m/s)	Potencia conv (W)	Potencia carga* (W)
602.44	291043.10	14.37	7207.06	5044.95

Figura 28, Resultados de programa en MATLAB para el cálculo de la velocidad, número de Reynolds y Nusselt en el proceso convectivo en la cámara.

Se comprueba que el valor obtenido de potencia consumida por la carga, es menor que la que se calcula en régimen transitorio como sistema concentrado. Asimismo, el uso de la ecuación de Carabogdan, da un valor muy cercano de la velocidad del flujo de aire para alcanzar el coeficiente de transferencia de calor por convección.

En el programa se obtuvieron curvas para realizar cálculos gráficos de la velocidad y coeficiente en función de la temperatura y potencia.

En la figura 28 se muestra la curva de coeficiente convectivo por diámetro vs longitud. Como se puede apreciar, se buscó hacer que los parámetros sean independientes del diámetro para que se superpongan y se probó la curva con 5 diámetros y la curva es la misma.

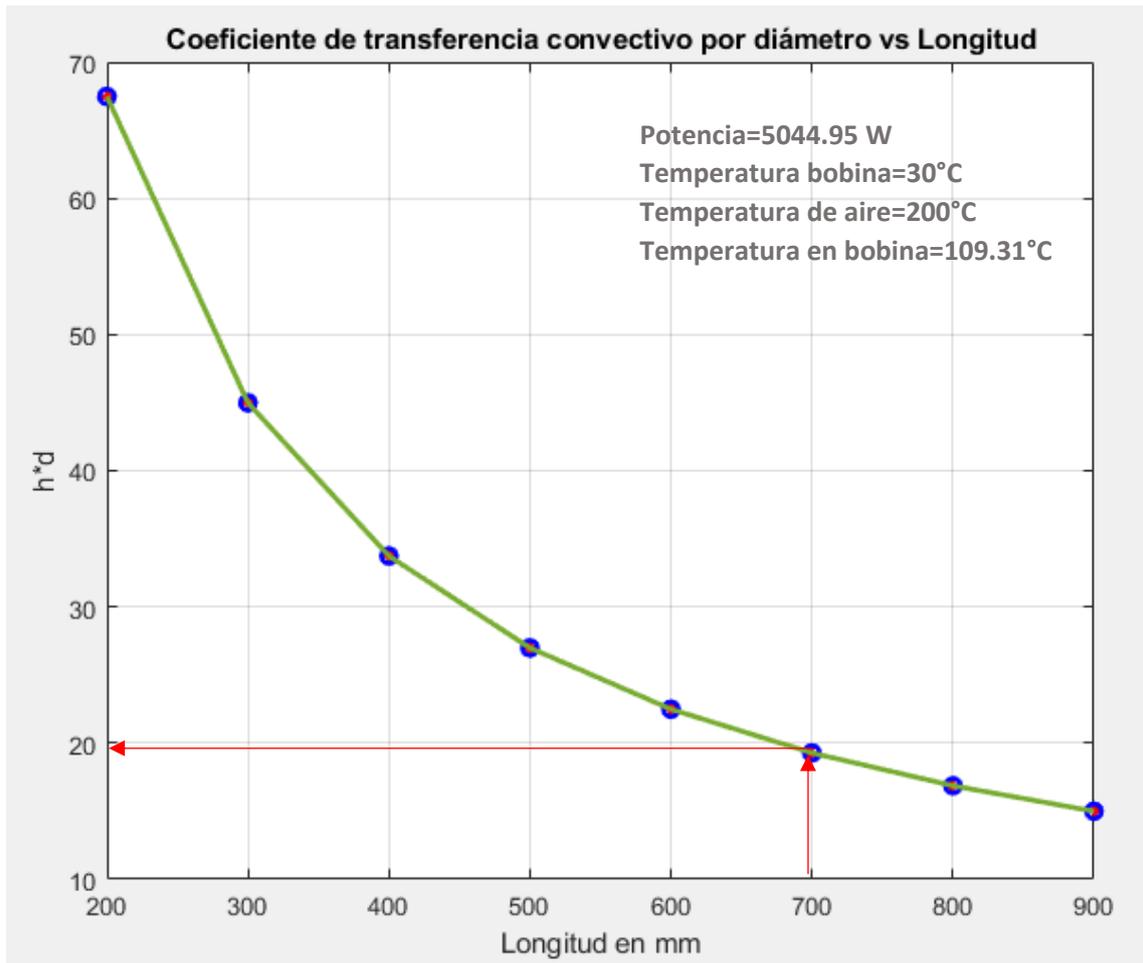


Figura 29. Curva coeficiente de transferencia por diámetro vs longitud, para una potencia de 5044.95 W, temperatura inicial de bobina de 30°C y del aire 200°C.

Con la longitud se puede encontrar la relación coeficiente por diámetro en la figura 28, luego se puede hallar el producto velocidad por diámetro en la gráfica 29.

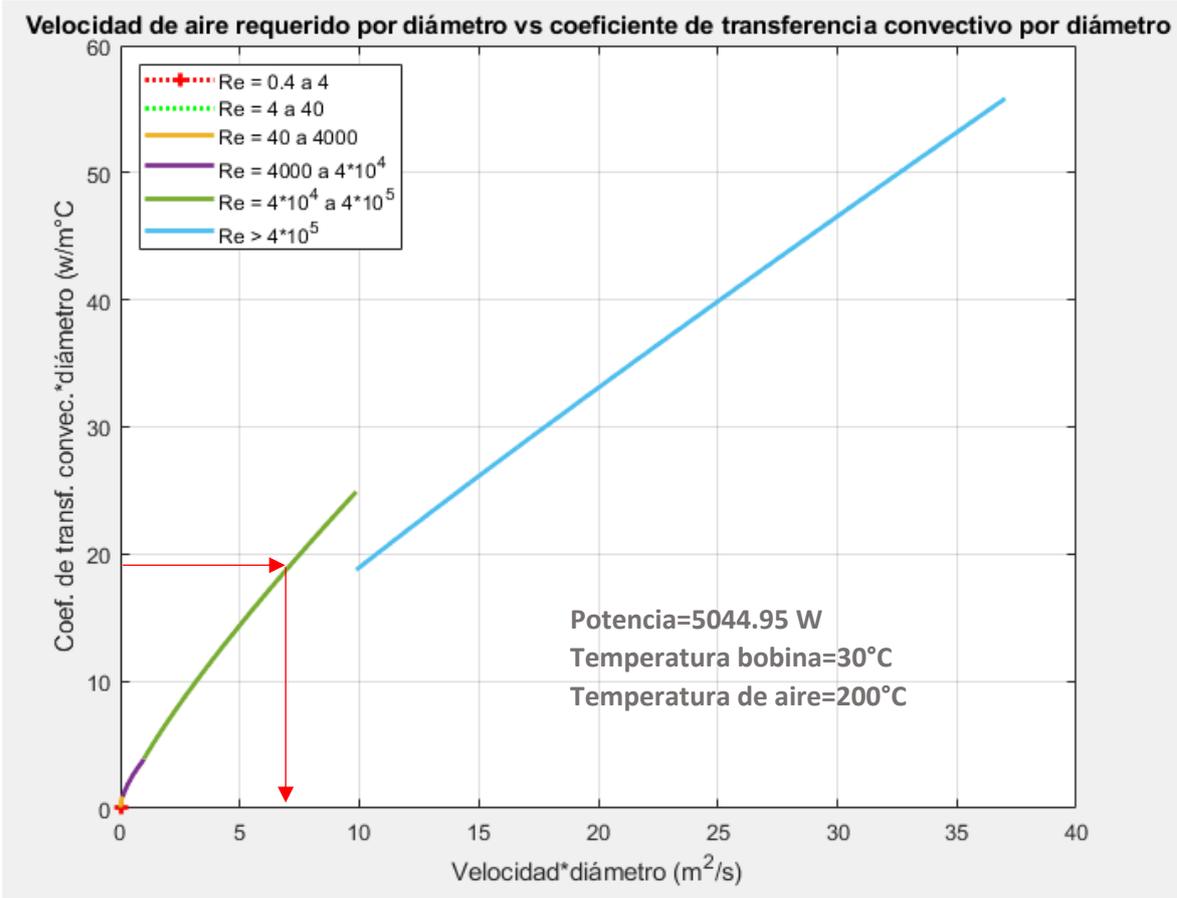


Figura 30. Curva coeficiente de transferencia por diámetro vs velocidad por diámetro potencia de 5044.95 W, temperatura inicial bobina de 30°C y aire 200°C.

Se aclara que las curvas dependen de 3 parámetros, de la potencia térmica requerida y de las temperaturas. Como se puede observar en la figura 28, según la longitud de la bobina que se ingresará se tendrá un valor de $h_{conv} * d$. En este caso para la longitud de 700 mm, se tiene un valor en el eje vertical, de 19.28. Con este valor se ingresa en la figura 29 y se ubica el valor del coeficiente por diámetro y se traza una horizontal; donde cruza con la curva y se inicia una recta vertical de manera que se proporciona la velocidad por diámetro igual a 7.4. Estos valores expresados en función del diámetro, se pueden fácilmente hallar dividiendo por el diámetro de la bobina a secar en la cámara del horno, en este caso es 500 mm.

$$h_{conv} = \frac{19}{0.5} = 38 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$V_{\infty} = \frac{7.4}{0.5} = 14.80 \frac{m}{s}$$

Como se puede observar el error es mínimo y se puede obtener los resultados de manera rápida para cualquier longitud y diámetro de bobina. También, se realizó una gráfica para obtener la temperatura aproximada de la superficie de la bobina idealizada en función del producto, coeficiente por diámetro.

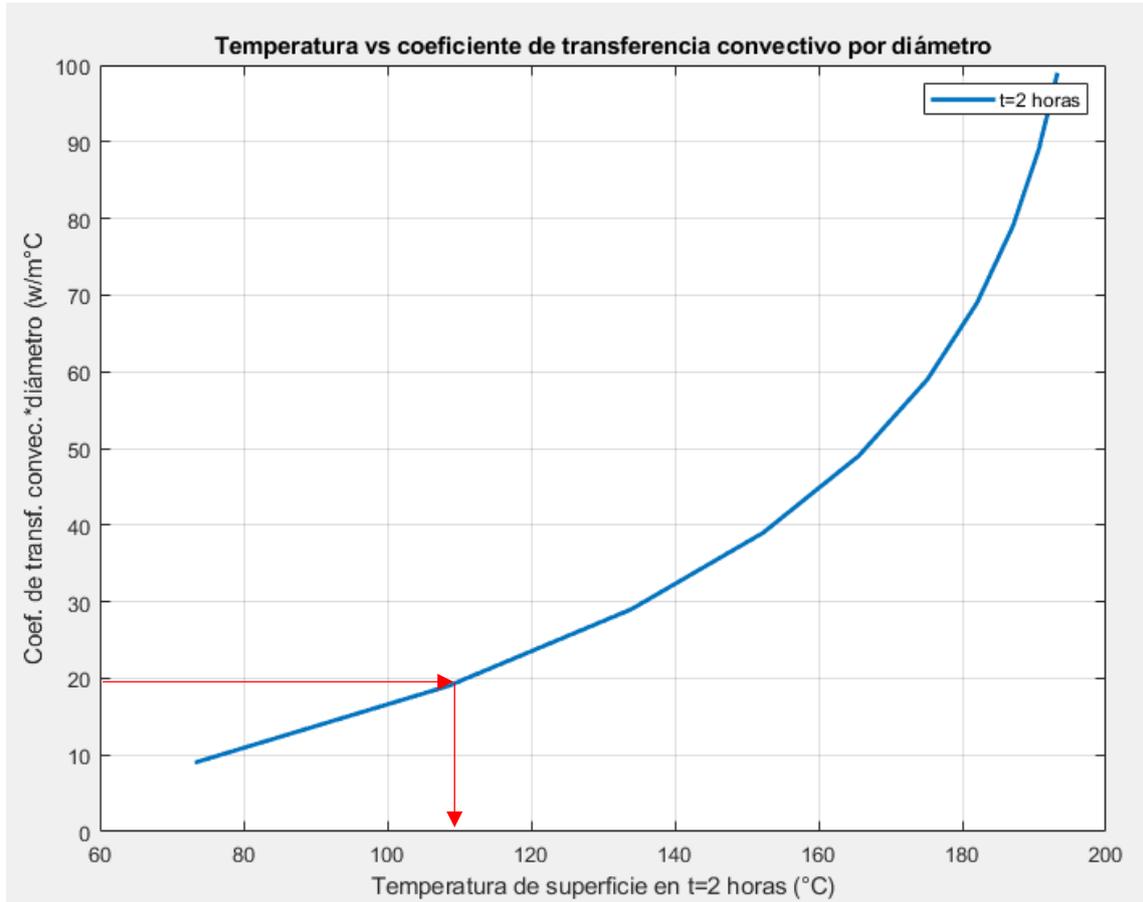


Figura 31. Curva coeficiente de transferencia por diámetro vs temperatura de superficie para potencia de 5044.95 W, temperatura inicial de 30°C y aire 200°C.

Como se observa en la figura, la relación coeficiente por diámetro igual a 19, da una temperatura aproximada de 110°C, con lo cual se comprueba los resultados obtenidos en el cálculo.

$$h * d = 19, \text{ entonces } T(t = 2 \text{ horas}) = 110 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En las figuras 31,32 y 33, se adjuntan las curvas para una potencia de 6.5 KW, temperatura de aire 200 °C, temperatura inicial de superficie igual a 30 °C. Como se observa la curva de la figura 31 se ha trasladado hacia arriba en comparación a la figura 28.

- Potencia térmica 6.5 KW, temperatura de aire 200 °C y de bobina 30 °C.

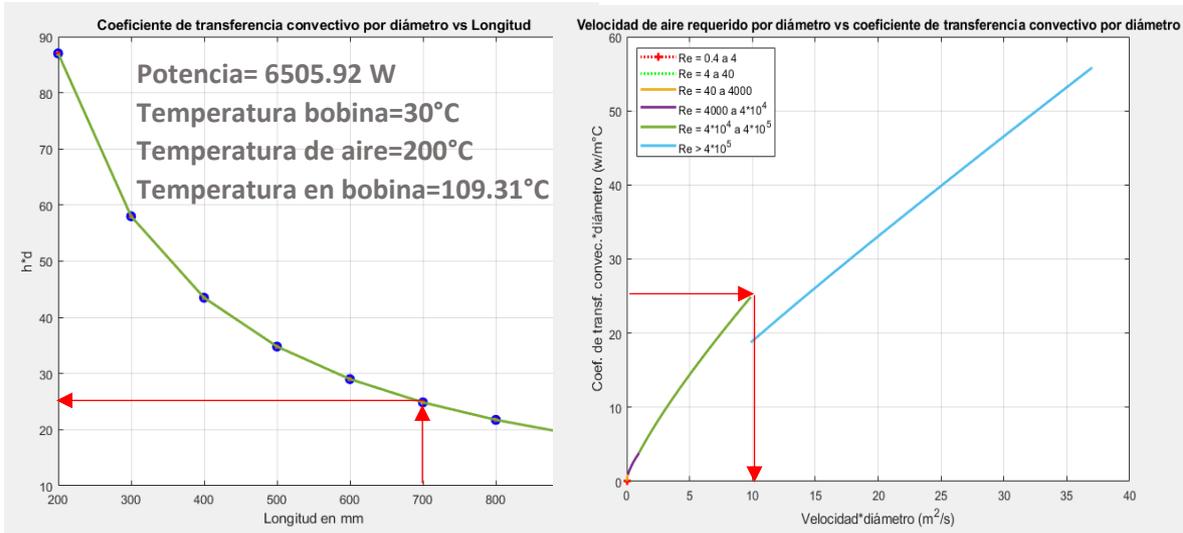


Figura 32. Curvas de coeficiente y velocidad potencia de 6505.92 W, temperatura inicial bobina de 30°C y aire 200°C.

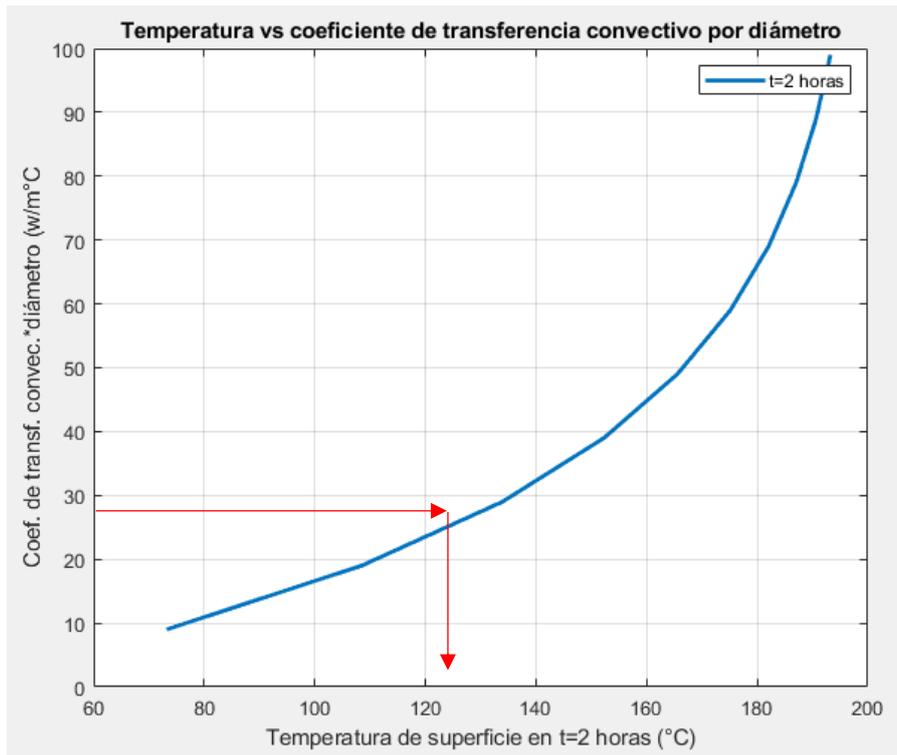


Figura 33. Curva coeficiente de transferencia por diámetro vs temperatura de superficie para potencia de 6505.92 W, temperatura inicial de 30°C y aire 200°C.

De estos gráficos se pudo observar que, para una bobina con las mismas dimensiones, la misma temperatura de aire, en el mismo tiempo transcurrido de secado, al aumentar la resistencia también se incrementa la temperatura de

superficie de la bobina, esto a pesar de parecer obvio, permite identificar la temperatura aproximada a la que se expone la superficie de bobinado. Si se tuviera una potencia mayor para consumo en la carga mayor a lo proyectado, se deberá aumentar la velocidad del flujo de aire para evitar un sobrecalentamiento de la bobina. Por ello, excederse en la selección de la resistencia eléctrica, producirá un mayor consumo de energía para el accionamiento del ventilador, ya que deberá contar con un mayor flujo volumétrico, para que el flujo satisfaga las condiciones de velocidad de aire.

En la figura 33 y 34 se muestran las curvas de temperatura vs tiempo de la bobina y el aire, considerando análisis como sistema concentrado, se muestra en la figura

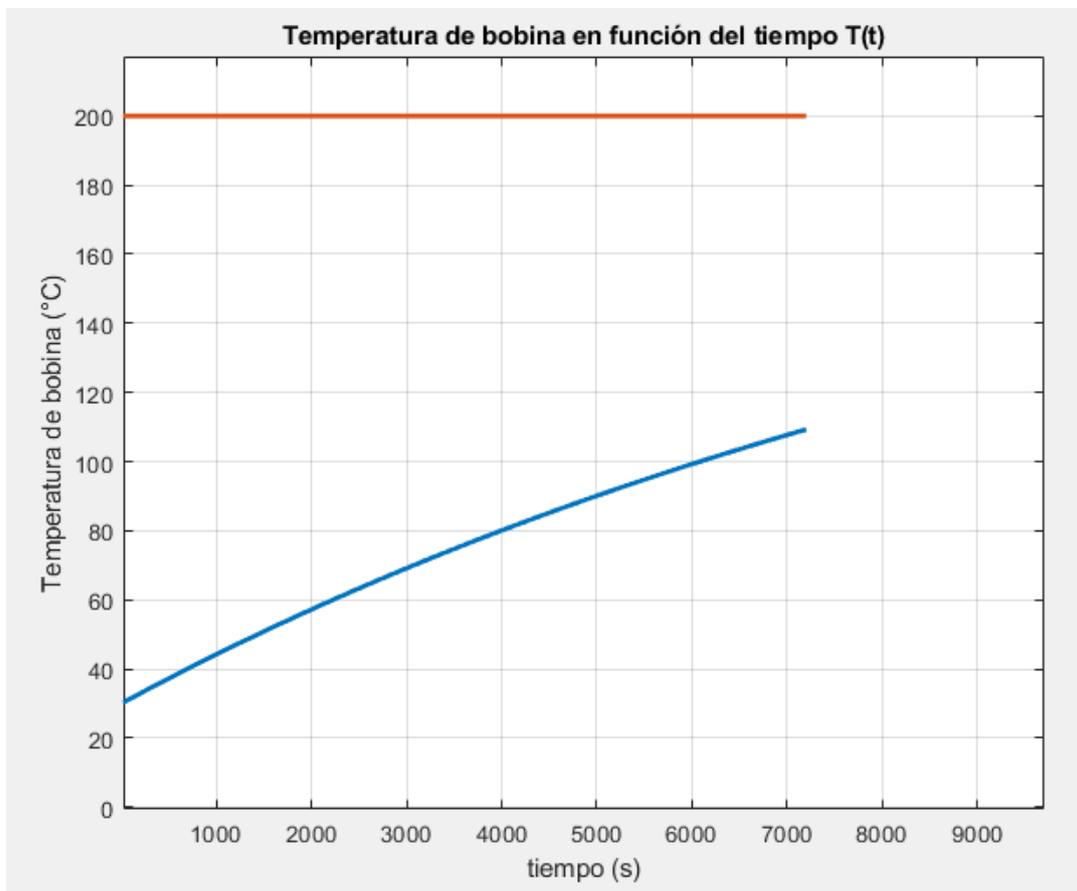


Figura 34. Temperatura en función del tiempo para una bobina de 700 mm de largo, 500 mm de diámetro, potencia consumida 5044.95 W, temperatura inicial 30 °C, temperatura de aire de 200°C en un tiempo de secado de 2 horas.

En el gráfico 33 se evidencia que la temperatura de la bobina con las dimensiones especificadas, en las 2 horas, no se mantiene constante; observándose una

temperatura máxima de 110°C. El programa permite aproximar los valores de la temperatura de la superficie de la bobina en función del tiempo.

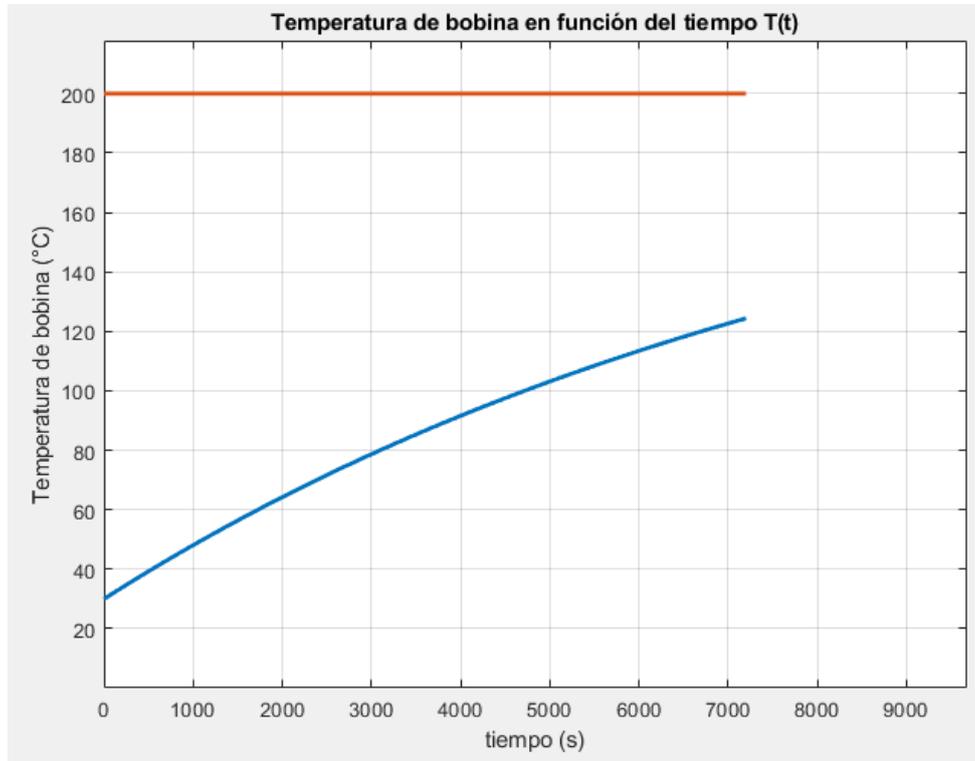


Figura 35. Temperatura en función del tiempo para una bobina de 700 mm de largo, 500 mm de diámetro, potencia consumida 6505.92 W, temperatura inicial 30 °C, temperatura de aire de 200°C en un tiempo de secado de 2 horas.

La temperatura final de la bobina luego de 2 horas es de aproximadamente 125°C.

Se consideró un espesor de cobertura interior de 1/16", espesor de aislamiento de 6 cm y espesor de cobertura exterior de 1/8". La imagen 36 muestra las dimensiones que se consideraron para el cálculo.

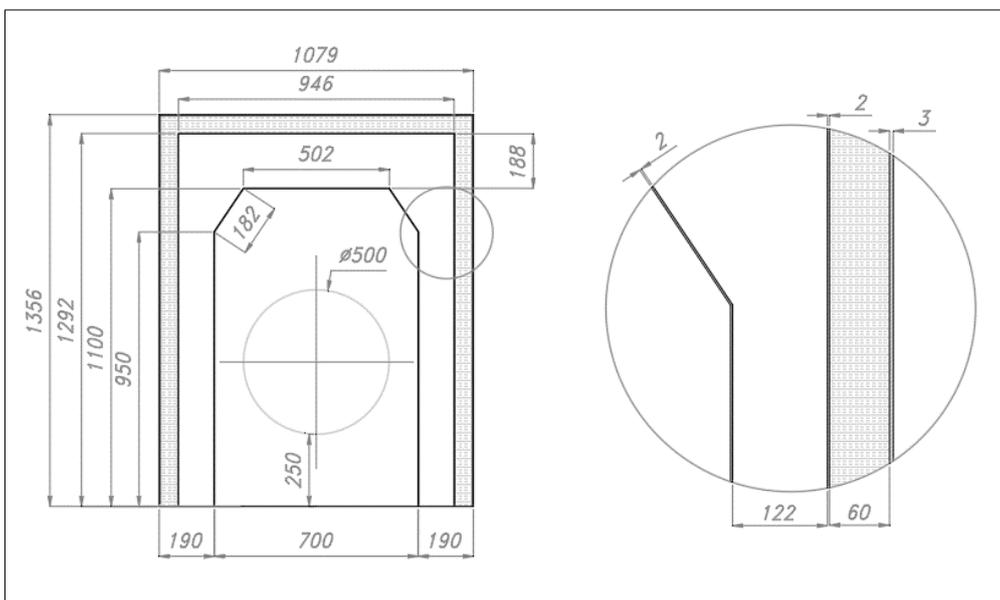


Figura 36. Dimensiones para bobina con diámetro máximo de 500 mm.

La cobertura interior que da forma al ducto almacena energía durante el proceso, la cual se calculó mediante análisis de sistemas concentrados.

- Número de Biot

$$Bi = \frac{h * L}{k_{pl1}} = \frac{38.56 * 0.0016}{16.3} = 0.004 \quad \dots (33)$$

- Área de cobertura interior

$$A_{pl1} = 2.77 * 0.9 = 2.49 \text{ m}^2 \quad \dots (34)$$

- Volumen de cobertura interior

$$Vol_{pl1} = A_{pl1} * th_{pl1} = 2.58 * 0.0016 = 0.0041 \text{ m}^3 \quad \dots (35)$$

- Inverso de la constante de tiempo

$$b = \frac{h * A_{pl1}}{\rho_{acero} * Vol_{pl1} * C_{p_{acero}}} = \frac{38.56 * 2.49}{7850 * 0.004 * 502} = 0.0061 \quad \dots (36)$$

- La temperatura de la superficie en función del tiempo de la cobertura que da forma al ducto

$$T(t) = e^{-bt} * (T_i - T_{\infty}) + T_{\infty} \quad \dots (37)$$

$$T(t) = e^{-0.0061 * 2 * 3600} * (30 - 200) + 200 = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Tiempo en alcanzar 200 °C de la plancha 1.

$$t_{200^\circ\text{C}} = 60 \text{ min}$$

- Energía consumida en almacenamiento

$$Q_{pl1} = \rho_{acero} * Vol_{pl1} * C_{p_{acero}} * (T_i - T_f) \quad \dots (38)$$

$$Q_{pl1} = 7850 * 0.0041 * 502 * (30 - 200) = -2\,746\,667.90 \text{ J}$$

- Potencia consumida en almacenamiento para alcanzar 200°C en la superficie de la plancha 1.

$$\dot{Q}_{pl1} = \frac{Q_{pl1}}{t_{200^{\circ}C}} = \frac{2\,746\,667.90}{60 * 60} = -742\, W \quad \dots (39)$$

La cobertura interior que cubre el aislamiento también almacena energía durante el proceso, la cual se calculó mediante análisis de sistemas concentrados, aunque no está bañada por ambos lados por un fluido de coeficiente de transferencia de calor estable, se consideró así por el espesor que es un valor muy bajo.

- Flujo volumétrico requerido para mover el aire a la velocidad requerida para generar el Reynolds y en consecuencia el número adimensional de transferencia de Calor. Considerar la figura 36.

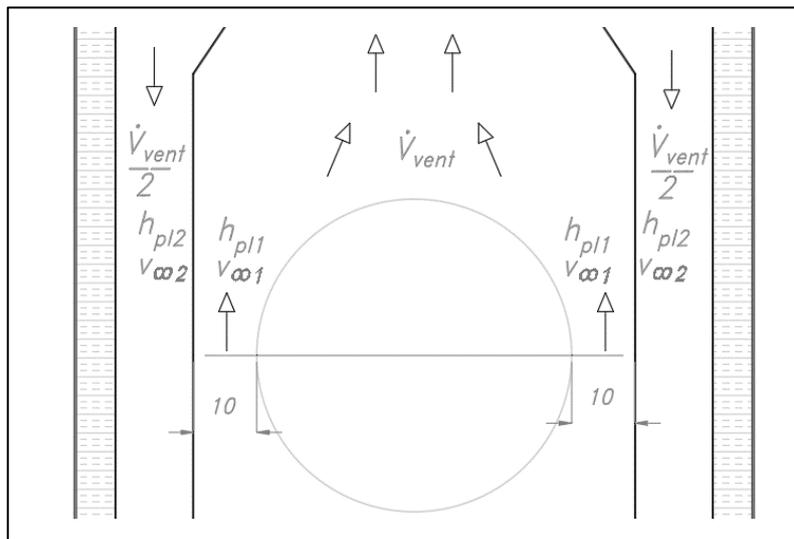


Figura 37. Flujo de aire alrededor de bobina para determinar caudal proporcionado por el ventilador centrífugo.

$$\dot{V}_{ventilador} = V_{\infty} A_1 = 14.8 * (0.1 + 0.1) * 0.7 = 2.07 \frac{m^3}{s} \quad \dots (40)$$

- Velocidad del aire

$$V_{\infty} = \frac{\dot{V}_{ventilador}}{2A_{sc-ducto}} = \frac{2.07}{2 * 0.122 * 0.7} = 12.12 \frac{m}{s} \quad \dots (41)$$

- Número de Reynolds

$$Re = \frac{V_{\infty} * L}{\nu_{aire}} = \frac{12.12 * 1.292}{2.4680 * 10^{-5}} = 634\,482.98 \quad \dots (42)$$

- Número de Nusselt

$$Nu = 0.0308 * Re^{0.8} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \dots (43)$$

$$Nu = 0.0308 * 634\,482.98^{0.8} * 0.7083^{\frac{1}{3}} = 1203.81$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección

$$h_{pl2} = \frac{Nu * k}{L} = \frac{1203.81 * 0.032}{1.292} = 29.82 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad \dots (44)$$

- Número de Biot

$$Bi = \frac{h * th_{pl2}}{k_{pl2}} = \frac{29.82 * 0.0016}{50.2} = 0.001 \leq 0.1 \quad \dots (45)$$

- Área de cobertura interior

$$A_{pl2} = \sum (Longitud) * espesor = 3.53 * 0.7 = 2.47 m^2 \quad \dots (46)$$

- Volumen de cobertura interior

$$Vol_{pl2} = A_{pl2} * th_{pl2} = 2.47 * 0.0016 = 0.004 m^3 \quad \dots (47)$$

- Inverso de la constante de tiempo

$$b = \frac{h * A_{pl2}}{\rho_{acero} * Vol_{pl2} * C_{p_{acero}}} = \frac{29.82 * 2.47}{7850 * 0.004 * 502} = 0.0047 \quad \dots (48)$$

- La temperatura de la superficie en función del tiempo de la superficie de la bobina

$$T(t) = e^{-bt} * (T_i - T_\infty) + T_\infty$$

$$T(t) = e^{-0.0047 * 2 * 3600} * (30 - 200) + 200 = 200 \text{ } ^\circ C \quad \dots (49)$$

- Tiempo en alcanzar 200 °C de la plancha 1.

$$t_{200^\circ C} = 78 \text{ min}$$

- Energía consumida en almacenamiento

$$Q_{pl2} = \rho_{acero} * Vol_{pl2} * C_{p_{acero}} * (T_i - T_f) \quad \dots (50)$$

$$Q_{pl2} = 7850 * 0.004 * 502 * (30 - 200) = -2\,679\,676.00 \text{ J}$$

- Potencia consumida en almacenamiento para alcanzar 200°C en la superficie de la plancha 2.

$$\dot{Q}_{pl2} = \frac{Q_{pl2}}{t_{200^\circ C}} = \frac{2\,679\,676.00}{78 * 60} = -572.58 \text{ W} \quad \dots (51)$$

La energía almacenada en el aislamiento térmico, no fue posible calcularla por análisis de sistemas concentrados, debido a que el aislamiento no se encuentra bañada por ambos lados por el mismo fluido a la misma temperatura y coeficiente de transferencia de calor igual. Por este motivo, la energía que almacena el aislamiento y el gradiente de temperatura se analizan por diferencias finitas con el criterio de e

plana. En la

finitas.

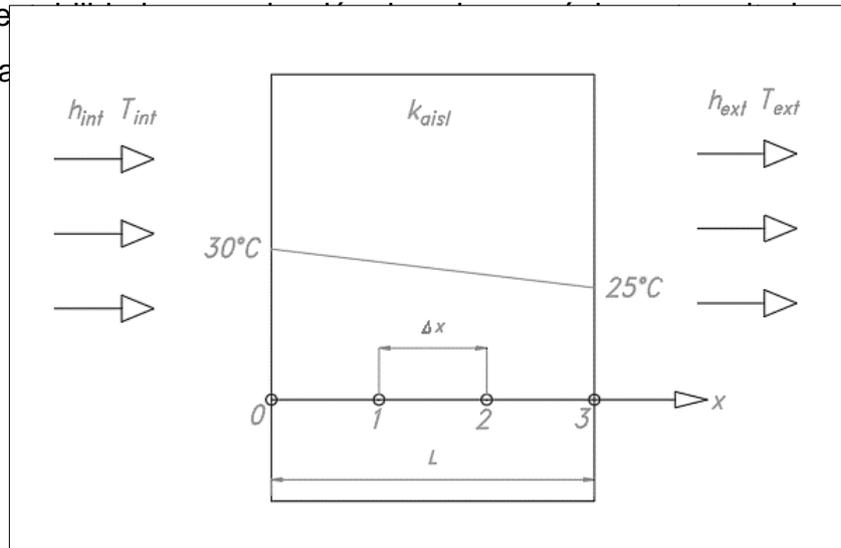


Figura 38. Conducción unidimensional en pared aislante bañada por aire a diferente temperatura por ambos lados.

Se simplificó el problema considerando lo siguiente:

- Las coberturas interior y exterior de plancha de acero no se incluyen en esta parte del cálculo, debido a la gran diferencia en la conductividad térmica.
- Los coeficientes de transferencia de calor por convección se consideran estables en el tiempo, al igual que la temperatura del aire en ambos lados.
- La conductividad térmica, densidad y calor específico del aislamiento se considera uniforme en todo el espesor y constante en el tiempo.

Se calculó la temperatura de los nodos en función del tiempo para el tiempo del proceso de secado hasta ahora estudiado, igual a 2 horas. El Coeficiente de transferencia de calor por convección interior se consideró el coeficiente del ducto de aire.

$$h_{int} = h_{pl2} = 29.82 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección exterior se analizó como convección natural sobre placa vertical, considerando la aceleración de la gravedad g , igual a 9.81 m/s^2 , la viscosidad dinámica se considera a la temperatura de película en estado estacionario, es decir cuando la superficie de la pared se encuentre a $40 \text{ } ^\circ C$.

- Temperatura de película exterior

$$T_p = \frac{T_0 + T_3}{2} = \frac{40 + 25}{2} = 32.5 \text{ } ^\circ C \quad \dots (51)$$

- Coeficiente de expansión volumétrica

$$\beta = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{32.5} = 0.031 \text{ } ^\circ C^{-1} \quad \dots (52)$$

- Número de Grashof

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} = \frac{9.81 * 0.031 * (40 - 25) * 1.302^3}{(1.6315 * 10^{-6})^2} = 3.78 * 10^{12} \quad \dots (53)$$

- Número de Prandtl a temperatura del aire

$$Pr_{32.5 \text{ } ^\circ C} = \frac{32.5 - 30}{35 - 30} (0.7268 - 0.7282) + 0.7282 = 0.7275 \quad \dots (54)$$

- Número de Rayleigh

$$Ra_L = Gr_L Pr = 3.78 * 10^{12} = 2.75 * 10^{12} \quad \dots (55)$$

- Número de Nusselt exterior del secador

$$Nu = 0.1Ra_L^{1/3} = 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} = 1544.07 \quad \dots (56)$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección natural en el exterior del secador

$$h_{ext} = \frac{Nuk}{L_c} = \frac{1544.07 * 0.04}{1.292} = 47.80 \frac{W}{m^2 \cdot C} \quad \dots (57)$$

Una vez que se obtuvieron los coeficientes de transferencia de calor por convección interior y exterior, se procedió a realizar el análisis por método explícito.

- Espaciamiento nodal

$$\Delta x = \frac{L}{M - 1} = \frac{60}{4 - 1} = 20 \text{ mm} \quad \dots (58)$$

- Difusividad térmica

$$\alpha = \frac{k_{aisl}}{\rho_{aisl} * C_{p_{aisl}}} = \frac{0.04}{200 * 1300} = 0.154 * 10^{-6} \quad \dots (59)$$

- Formulación explícita de las diferencias finitas en los nodos interiores

$$T_1^{i+1} = \tau(T_0^i + T_2^i) + (1 - 2\tau)T_1^i \quad \dots (60)$$

$$T_2^{i+1} = \tau(T_1^i + T_3^i) + (1 - 2\tau)T_2^i \quad \dots (61)$$

- Formulación explícita de las diferencias finitas en el nodo 0

$$T_0^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{int}\Delta x}{k}\right)T_0^i + 2\tau T_1^i + 2\tau \frac{h_{int}\Delta x}{k}T_{int} \quad \dots (62)$$

$$T_0^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{29.82 * 0.02}{0.04}\right)T_0^i + 2\tau T_1^i + 2\tau \frac{29.82 * 0.02}{0.04} * 200$$

$$T_0^{i+1} = (1 - 31.82\tau)T_0^i + \tau(2T_1^i + 5964)$$

- Formulación explícita de las diferencias finitas en el nodo 3

$$T_3^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{ext}\Delta x}{k}\right)T_3^i + 2\tau T_2^i + 2\tau \frac{h_{ext}\Delta x}{k}T_{ext} \quad \dots (63)$$

$$T_3^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{47.44 * 0.02}{0.04}\right)T_3^i + 2\tau T_2^i + 2\tau \frac{47.44 * 0.02}{0.04} * 25$$

$$T_3^{i+1} = (1 - 47.44\tau)T_3^i + \tau(2T_2^i + 1186)$$

- Límite superior del intervalo de tiempo mediante el criterio de estabilidad

$$1 - 47.44\tau \geq 0 \quad \dots (64)$$

$$\tau = \frac{\alpha * \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{47.44} \quad \dots (65)$$

$$\Delta t \leq \frac{0.02^2}{47.44 * 0.154 * 10^{-6}} = 54.75 \text{ s}; \text{ se itera con } \Delta t = 30 \text{ s} \quad \dots (66)$$

- Número adimensional de malla de Fourier

$$\tau = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} = \frac{0.154 * 10^{-6} * 30}{0.020^2} = 0.01155 \quad \dots (67)$$

- Condición inicial

$$T_0^0 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}; T_1^0 = 28.33 \text{ } ^\circ\text{C}; T_2^0 = 26.66 \text{ } ^\circ\text{C}; T_3^0 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Iteración 1

Para nodo 0

$$T_0^{i+1} = (1 - 31.82\tau)T_0^i + \tau(2T_1^i + 5964)$$

$$T_0^1 = 0.6325T_0^0 + 0.01155(2T_1^0 + 5964)$$

$$T_0^1 = 0.6325 * 30 + 0.01155(2 * 28.33 + 5964) = 88.51 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 1

$$T_1^{i+1} = \tau(T_0^i + T_2^i) + (1 - 2\tau)T_1^i$$

$$T_1^1 = 0.01155(T_0^0 + T_2^0) + 0.9769T_1^0$$

$$T_1^1 = 0.01155(30 + 26.66) + 0.9769 * 28.33 = 28.33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 2

$$T_2^1 = 0.01155(T_1^0 + T_3^0) + 0.9769T_2^0$$

$$T_2^1 = 0.01155(28.33 + 25) + 0.9769 * 26.66 = 26.66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 3

$$T_3^1 = 0.4521T_3^0 + 0.01155(2T_2^0 + 1186)$$

$$T_3^1 = 0.4521 * 25 + 0.01155(2 * 26.66 + 1186) = 25.62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Iteración 2

Para nodo 0

$$T_0^2 = 0.6325T_0^1 + 0.01155(2T_1^1 + 5964)$$

$$T_0^2 = 0.6325 * 88.51 + 0.01155(2 * 28.33 + 5964) = 125.52 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 1

$$T_1^2 = 0.01155(T_0^1 + T_2^1) + 0.9769T_1^1$$

$$T_1^2 = 0.01155(88.51 + 26.66) + 0.9769 * 28.33 = 29.01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 2

$$T_2^2 = 0.01155(T_1^1 + T_3^1) + 0.9769T_2^1$$

$$T_2^2 = 0.01155(28.33 + 25.62) + 0.9769 * 26.66 = 26.67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 3

$$T_3^1 = 0.4521T_3^1 + 0.01155(2T_2^1 + 1186)$$

$$T_3^1 = 0.4521 * 25.62 + 0.01155(2 * 26.66 + 1186) = 25.90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De este modo se debe realizar el cálculo sucesivo un total de 240 veces, ya que el intervalo para cumplir el criterio de estabilidad se consideró de 30 segundos y el funcionamiento considerado para el equipo es de 2 horas. Se realizó un programa en MATLAB para resolver las ecuaciones de las diferencias finitas. Los resultados de este cálculo se muestran en la figura 38.

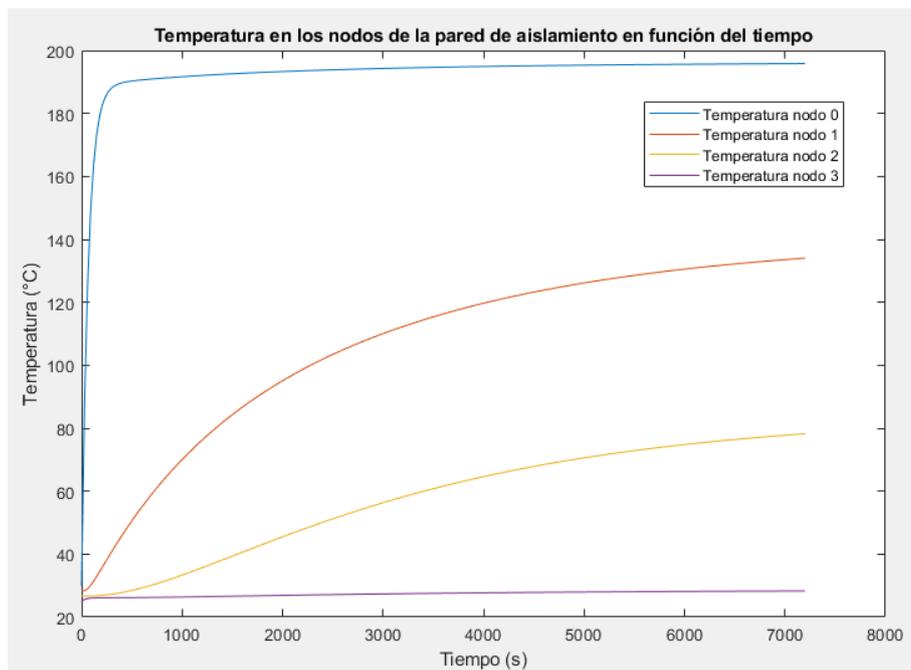


Figura 39. Gráfica de la temperatura en función del tiempo como resultado de 240 cálculos por cada 30 segundos de intervalo considerado según el criterio de estabilidad para el método explícito.

El cálculo de la energía acumulada en el aislamiento se realizó considerando la temperatura mayor de los nodos interiores, para este caso el nodo 1 ($x_1=20$ mm) cercano a la cobertura interior, es el que tendrá mayor temperatura pasado 2 horas.

- Temperatura final promedio entre el nodo 1 y 2, a 2 horas de funcionamiento.

$$T_{1-2}^{t=2h} = 132.60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Energía almacenada en aislamiento térmico

$$Q_{aisl} = \rho_{aisl} * Vol_{aisl} * C_{p_{aisl}} * (T_f - T_i) \quad \dots (68)$$

$$Q_{aisl} = 200 * 0.070 * 1300 * (132.60 - 28.33) = -1\ 897\ 714 \text{ J}$$

- La potencia consumida en almacenamiento para alcanzar 132.6°C desde 28.33°C en el aislamiento térmico de lana mineral, durante las 2 horas de funcionamiento.

$$\dot{Q}_{aisl} = \frac{Q_{aisl}}{t_{81^\circ\text{C}}} = \frac{1\ 897\ 714}{2 * 3600} = 263.57 \text{ W} \quad \dots (69)$$

El horno secador cuenta con 3 paredes y 1 puerta que igualmente se modela como pared, por ello el valor total de pérdidas en las paredes es igual a 1054.29 W.

El cálculo de la energía almacenada en el aislamiento del techo se calculó de igual forma que para las paredes inclinadas, sin embargo, el coeficiente de transferencia de calor varía debido a la convección natural la cual se analiza diferente que para la placa horizontal.

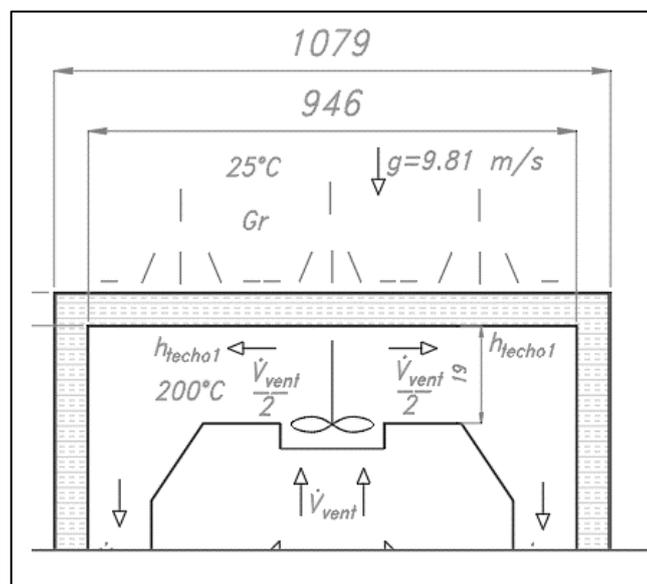


Figura 40. Parámetros para calcular la energía almacenada en el techo.

El Coeficiente de transferencia de calor por convección interior en la parte superior del secador varia por la mayor cantidad de espacio.

- Velocidad del aire en ducto de 19 x 60 cm

$$V_{\infty} = \frac{\dot{V}_{ventilador}}{2A_{techo}} = \frac{2.07}{2 * 0.188 * 0.6} = 9.18 \frac{m}{s} \quad \dots (70)$$

- Número de Reynolds en ducto del techo

$$Re = \frac{V_{\infty} * L}{\nu_{aire}} = \frac{9.18 * 0.6}{2.4680 * 10^{-5}} = 223\ 176.66 \quad \dots (71)$$

- Número de Nusselt en ducto del techo

$$Nu = 0.0308 * Re^{0.8} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \dots (72)$$

$$Nu = 0.0308 * 223176.66^{0.8} * 0.7083^{\frac{1}{3}} = 521.85$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección en techo

$$h_{int,conv} = \frac{Nu * k}{L} = \frac{521.85 * 0.032}{0.6} = 27.83 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \quad \dots (73)$$

En el interior por el lado del techo, a diferencia de las paredes, se encuentra expuesta a radiación. El efecto de la radiación se incluyó en un coeficiente combinado de transferencia de calor convección – radiación. Se consideró la temperatura superficial de la resistencia igual a 1000 °C, entonces el coeficiente de transferencia de calor por radiación en el techo.

$$h_{int,rad} = \varepsilon \sigma (T_s + T_{alred})(T_s^2 + T_{alred}^2) \quad \dots (74)$$

$$h_{int,rad} = 0.2764 * 5.67 * 10^{-8} * (1273 + 373) * (1273^2 + 373^2) = 50.46 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

- El coeficiente combinado de transferencia de calor convección radiación en el interior del secador en el techo.

$$h_{techo1} = h_{int,conv} + h_{int,rad} = 27.83 + 50.46 = 78.29 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \quad \dots (76)$$

El coeficiente de transferencia de calor para la parte exterior del techo se calculó como convección natural sobre placa horizontal, considerando la aceleración de la gravedad g , igual a 9.81 m/s^2 , la viscosidad dinámica se considera a la temperatura de película en estado estacionario, es decir cuando la superficie de la pared se encuentre a $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Temperatura de película exterior en el techo

$$T_p = \frac{T_0 + T_4}{2} = \frac{40 + 25}{2} = 32.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad \dots (77)$$

- Coeficiente de expansión volumétrica

$$\beta = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{32.5} = 0.031 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad \dots (78)$$

- Longitud característica para convección natural en techo

$$L_c = \frac{A_{ext}}{p} = \frac{0.946 * 0.900}{0.946 * 2 + 0.900 * 2} = 0.231 \text{ m} \quad \dots (79)$$

- Número de Grashof

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} = \frac{9.81 * 0.031 * (40 - 25) * 0.231^3}{(1.6315 * 10^{-6})^2} = 2.11 * 10^{10} \quad \dots (80)$$

- Número de Prandtl a temperatura del aire

$$Pr_{32.5 \text{ }^\circ\text{C}} = \frac{32.5 - 30}{35 - 30} (0.7268 - 0.7282) + 0.7282 = 0.7275 \quad \dots (81)$$

- Número de Rayleigh

$$Ra_L = Gr_L Pr = 2.11 * 10^{10} * 0.7275 = 1.54 * 10^{10} \quad \dots (82)$$

- Número de Nusselt exterior del secador

$$Nu = 0.27 Ra_L^{1/4} = 0.27 * (1.54 * 10^{10})^{1/4} = 95.04$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección natural en el exterior del secador

$$h_{ext,techo} = \frac{Nuk}{L_c} = \frac{95.04 * 0.04}{0.231} = 16.45 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

Una vez que se obtuvieron los coeficientes de transferencia de calor por convección interior y exterior, se procedió a realizar el análisis por método explícito.

- Espaciamiento nodal

$$\Delta x = \frac{L}{M - 1} = \frac{100}{4 - 1} = 25 \text{ mm}$$

- Difusividad térmica

$$\alpha = \frac{k_{aisl}}{\rho_{aisl} * C p_{aisl}} = \frac{0.04}{200 * 1300} = 0.154 * 10^{-6}$$

- Formulación explícita de las diferencias finitas en los nodos interiores

$$T_1^{i+1} = \tau(T_0^i + T_2^i) + (1 - 2\tau)T_1^i$$

$$T_2^{i+1} = \tau(T_1^i + T_3^i) + (1 - 2\tau)T_2^i$$

$$T_3^{i+1} = \tau(T_2^i + T_4^i) + (1 - 2\tau)T_3^i$$

- Formulación explícita de las diferencias finitas en el nodo 0

$$T_0^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{int}\Delta x}{k}\right) T_0^i + 2\tau T_1^i + 2\tau \frac{h_{int}\Delta x}{k} T_{int}$$

$$T_0^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{78.29 * 0.025}{0.04}\right) T_0^i + 2\tau T_1^i + 2\tau \frac{78.29 * 0.025}{0.04} * 200$$

$$T_0^{i+1} = (1 - 99.86\tau)T_0^i + \tau(2T_1^i + 19572.5)$$

- Formulación explícita de las diferencias finitas en el nodo 3

$$T_4^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{ext}\Delta x}{k}\right) T_4^i + 2\tau T_3^i + 2\tau \frac{h_{ext}\Delta x}{k} T_{ext}$$

$$T_4^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{16.45 * 0.025}{0.04}\right) T_4^i + 2\tau T_3^i + 2\tau \frac{16.45 * 0.025}{0.04} * 25$$

$$T_4^{i+1} = (1 - 22.56\tau)T_4^i + \tau(2T_3^i + 514.06)$$

- Límite superior del intervalo de tiempo mediante el criterio de estabilidad

$$1 - 99.86\tau \geq 0$$

$$\tau = \frac{\alpha * \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{99.86}$$

$$\Delta t \leq \frac{0.025^2}{99.86 * 0.154 * 10^{-6}} = 40.64 \text{ s}; \text{ se itera con } \Delta t = 30 \text{ s}$$

- Número adimensional de malla de Fourier

$$\tau = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} = \frac{0.154 * 10^{-6} * 30}{0.025^2} = 0.0074$$

- Condición inicial

$$T_0^0 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}; T_1^0 = 28.75 \text{ } ^\circ\text{C}; T_2^0 = 27.50 \text{ } ^\circ\text{C}; T_3^0 = 26.25 \text{ } ^\circ\text{C}; T_4^0 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Iteración 1

Para nodo 0

$$T_0^{i+1} = (1 - 99.86\tau)T_0^i + \tau(2T_1^i + 19572.5)$$

$$T_0^1 = 0.2610T_0^0 + 0.0074(2T_1^0 + 19572.5)$$

$$T_0^1 = 0.2610 * 30 + 0.0074(2 * 28.75 + 19572.5) = 153.09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 1

$$T_1^{i+1} = \tau(T_0^i + T_2^i) + (1 - 2\tau)T_1^i$$

$$T_1^1 = 0.0074(T_0^0 + T_2^0) + 0.9852T_1^0$$

$$T_1^1 = 0.0074(30 + 27.50) + 0.9852 * 28.75 = 28.75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 2

$$T_2^1 = 0.0074(T_1^0 + T_3^0) + 0.9852T_2^0$$

$$T_2^1 = 0.0074(28.75 + 26.25) + 0.9852 * 27.50 = 27.50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 3

$$T_3^1 = 0.0074(T_2^0 + T_4^0) + 0.9852T_3^0$$

$$T_3^1 = 0.0074(27.50 + 25) + 0.9852 * 26.25 = 26.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 4

$$T_4^1 = 0.8331T_4^0 + 0.0074(2T_3^0 + 514.06)$$

$$T_4^1 = 0.8331 * 25 + 0.0074(2 * 26.25 + 514.06) = 25.02 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Iteración 2

Para nodo 0

$$T_0^2 = 0.2610T_0^1 + 0.0074(2T_1^1 + 19572.5)$$

$$T_0^2 = 0.2610 * 153.09 + 0.0074(2 * 28.75 + 19572.5) = 185.22 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 1

$$T_1^2 = 0.0074(T_0^1 + T_2^1) + 0.9852T_1^1$$

$$T_1^2 = 0.0074(153.09 + 27.50) + 0.9852 * 28.75 = 29.66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 2

$$T_2^2 = 0.0074(T_1^1 + T_3^1) + 0.9852T_2^1$$

$$T_2^2 = 0.0074(28.75 + 26.25) + 0.9852 * 27.50 = 27.50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 3

$$T_3^2 = 0.0074(T_2^1 + T_4^1) + 0.9852T_3^1$$

$$T_3^2 = 0.0074(27.50 + 25) + 0.9852 * 26.25 = 26.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para nodo 4

$$T_4^2 = 0.8331T_4^1 + 0.0074(2T_3^1 + 514.06)$$

$$T_4^2 = 0.8331 * 25.02 + 0.0074(2 * 26.25 + 514.06) = 25.04 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Luego de 240 iteraciones en MATLAB se obtuvo la temperatura en función del tiempo para los 5 nodos. Los resultados de este cálculo se muestran en la figura 38.

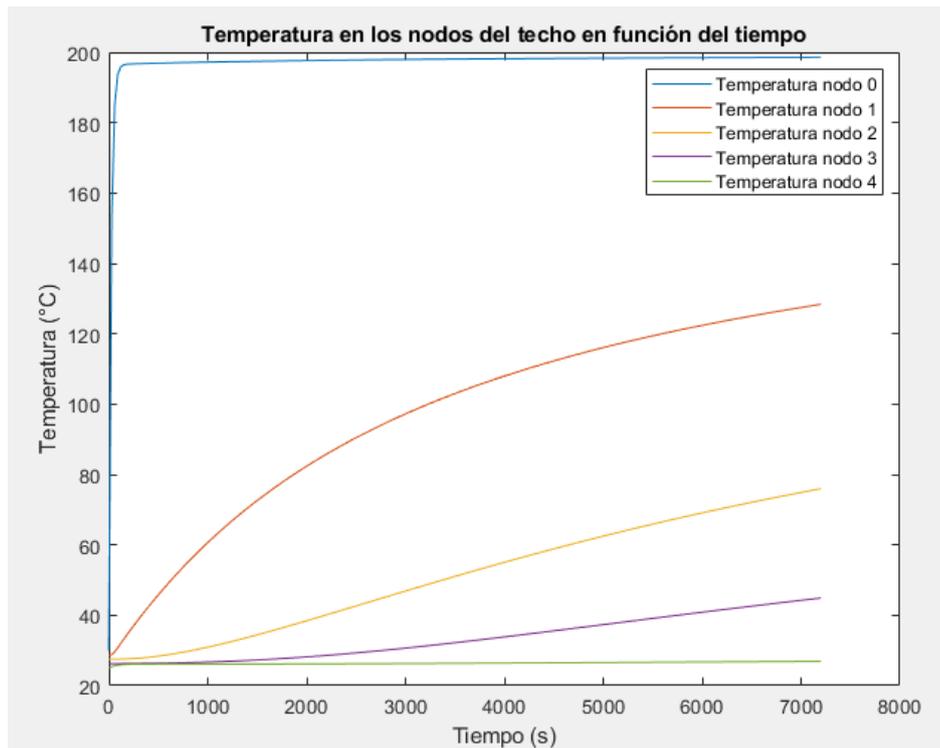


Figura 41. Gráfica de la temperatura de los nodos del techo en función del tiempo como resultado de 240 cálculos por cada 30 segundos de intervalo considerado según el criterio de estabilidad para el método explícito.

Para calcular la energía acumulada en el aislamiento se consideró la temperatura mayor de los nodos interiores, para este caso el nodo 1 ($x_1=20$ mm) cercano a la cobertura interior, es el que tendrá mayor temperatura pasado 2 horas.

- Temperatura final del nodo 2, a 2 horas de funcionamiento.

$$T_2^{t=2h} = 75.96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Energía almacenada en aislamiento térmico

$$Q_{aisl} = \rho_{aisl} * Vol_{aisl} * C_{p_{aisl}} * (T_f - T_i)$$

$$Q_{aisl} = 200 * 0.097 * 1300 * (75.96 - 28.75) = -1\ 190\ 636.20 \text{ J}$$

- La potencia consumida en almacenamiento para alcanzar 132.6°C desde 28.33°C en el aislamiento térmico de lana mineral, durante las 2 horas de funcionamiento.

$$\dot{Q}_{aisl} = \frac{Q_{aisl}}{t_{81^\circ\text{C}}} = \frac{1\ 190\ 636.20}{2 * 3600} = 165.37 \text{ W}$$

En la tabla 13 se muestran los resultados de energía almacenada para secado por convección natural y convección forzada para un proceso de 2 horas con una bobina modelada como un cilindro de 500 mm de diámetro por 700 mm de largo.

Tabla 13

Energía almacenada para secado de bobina de 500 mm de diámetro en 2 horas.

N°	Parámetro	Unidad	Convección	
			Natural	Forzada
1	Diámetro de la bobina	mm	500	500
2	Longitud de la bobina	mm	700	700
3	Temperatura inicial de superficie de bobina.	°C	30	30
4	Temperatura de aire en el interior del horno	°C	200	200
5	Temperatura inicial del techo del horno	°C	25	25
6	Temperatura inicial de las paredes del horno	°C	25	25
7	Tiempo de proceso	horas	2	2
8	Temperatura final de superficie de bobina	°C	99.5	* 112.54
9	Temperatura final del techo del horno	°C	29.29	26.88
10	Temperatura final de las paredes del horno	°C	29.29	28.29
11	Energía almacenada por la carga en 2 horas	W	1958.35	5365.56
12	Espesor de aislamiento de techo	mm	60	100
13	Energía almacenada en el techo en 2 horas	W	389.45	165.37
14	Espesor de aislamiento de pared	mm	60	60
15	Energía almacenada por las paredes en 2 horas	W	1808.68	2368.87
16	Energía almacenada total	W	3905.62	7899.80

* Es la temperatura recalculada considerando radiación

La energía almacenada total en el secador para una duración de secado de 2 horas, es aproximadamente:

$$\dot{Q}_{almacenado} = \dot{Q}_{alm,bobina} + \dot{Q}_{alm,paredes} + \dot{Q}_{alm,techo}$$

$$\dot{Q}_{almacenado} = 5365.56 + (572.58 + 742 + 1054.29) + 165.37$$

$$\dot{Q}_{almacenado} = 7899.80 \text{ W}$$

4.2.2. Cálculo de energía perdida por las paredes y el techo

Se calculan las pérdidas desde el horno hacia el medio ambiente, considerando un coeficiente combinado de transferencia de calor convección radiación. Ver la figura 41 donde se muestran los parámetros para el cálculo en el exterior de la cámara de secado.

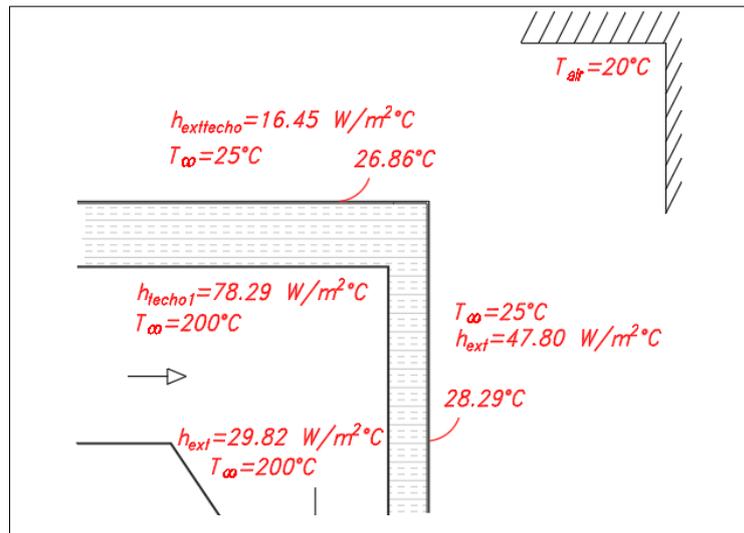


Figura 42. Esquema con parámetros para el cálculo de pérdidas por convección y radiación, tanto en pared como en techo.

- Coeficiente de transferencia de calor combinado pared

$$h_{\text{pared,rad}} = \varepsilon\sigma(T_s + T_{\text{alred}})(T_s^2 + T_{\text{alred}}^2)$$

$$h_{\text{pared,rad}} = 0.17 * 5.67 * 10^{-8} * (301.44 + 293.15) * (301.44^2 + 293.15^2)$$

$$h_{\text{pared,rad}} = 1.01 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$$

$$h_{\text{combpared}} = h_{\text{ext}} + h_{\text{pared,rad}} = 47.80 + 1.01 = 48.81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$$

- Coeficiente de transferencia de calor combinado techo

$$h_{\text{techo,rad}} = \varepsilon\sigma(T_s + T_{\text{alred}})(T_s^2 + T_{\text{alred}}^2)$$

$$h_{\text{techo,rad}} = 0.17 * 5.67 * 10^{-8} * (300.01 + 293.15) * (300.01^2 + 293.15^2)$$

$$h_{\text{techo,rad}} = 1.01 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$$

$$h_{\text{combtecho}} = h_{\text{exttecho}} + h_{\text{techo,rad}} = 16.45 + 1.01 = 17.46 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$$

- Flujo de energía perdida en la pared

$$\dot{Q}_{perdpared} = h_{combpared} * A_{pared} * (T_s - T_{\infty})$$

$$\dot{Q}_{perdpared} = 48.81 * 5.69 * (28.29 - 25) = 828.62 W$$

- Flujo de energía perdida en el techo

$$\dot{Q}_{perdtecho} = h_{combtecho} * A_{techo} * (T_s - T_{\infty})$$

$$\dot{Q}_{perdtecho} = 17.46 * 1.1 * (26.86 - 25) = 35.72 W$$

- Flujo de calor perdido al medio ambiente por radiación y convección

$$\dot{Q}_{perdido} = \dot{Q}_{perdpared} + \dot{Q}_{perdtecho}$$

$$\dot{Q}_{perdido} = 828.62 + 35.72 = 864.34 W$$

4.2.3. Cálculo de energía total requerida

La energía térmica total requerida en el horno secador de bobinas de hasta 300 hp, es la suma de la energía almacenada en paredes, techo y carga; así como el calor perdido.

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{almacenado} + \dot{Q}_{perdido}$$

$$\dot{Q}_{total} = 7899.80 + 864.34 = 8764.14 W$$

En la tabla 14 se muestra la energía perdida y total requerida para cada caso.

Tabla 14.

Energía total para secado con convección natural y forzada.

N°	Parámetro	Unidad	Convección	
			Natural	Forzada
1	Energía perdida en la pared por unidad de tiempo	W	1191.46	828.62
2	Energía perdida por el techo por unidad de tiempo	W	82.39	35.72
3	Energía total perdida por unidad de tiempo	W	1273.85	864.34
4	Energía total requerida	W	5179.47	8764.14

4.3. Optimización de la estructura del horno eléctrico

Se realiza el diseño de la estructura por el método de esfuerzos admisibles ASD citada en la norma técnica peruana E.020, E.030 y E.090. La investigación contempla la optimización de la estructura en lo que concierne a reducción de peso. Primero se adapta los requerimientos de la norma al planteamiento de las cargas y sus combinaciones, luego se calcularon las reacciones y finalmente se modeló y optimizó la estructura en SolidWorks.

4.3.1. Cargas

4.3.1.1. Carga muerta

Está constituida por la carga de la estructura, la cobertura, el aislamiento y de dispositivos montados en la estructura. La carga muerta se considera por separado, por un lado, el peso propio del elemento horizontal, peso de los elementos verticales y finalmente la carga muerta de los equipos y accesorios. Ver la figura 43 para identificar los elementos.

$$W_{AB} = 9.89 \text{ Kg}; W_{CD} = 9.89 \text{ Kg}; W_{BC} = 7.87 \text{ Kg}; w_e = 100 \text{ Kg/m}$$

4.3.1.2. Carga viva

Se considera la carga distribuida mínima indicado por la norma, esto es igual a 100 Kg/m^2 . No se considera carga viva móvil.

4.3.1.3. Carga de viento

El cálculo térmico se ha considerado como convección natural externa, sin embargo, se diseñará la estructura para una posible exposición a viento. Debido a que no se trata de una estructura con una altura donde se pueda a exponer a vientos con velocidades altas, se asume el valor mínimo de 75 Km/h.

$$P_{h,varlovento} = 0.005CV_h^2 = 0.005 * 0.8 * 75^2 = 22.50 \text{ Kg/m}^2$$
$$P_{h,sotavento} = 0.005CV_h^2 = -0.005 * 0.6 * 75^2 = -16.88 \text{ Kg/m}^2$$

4.3.1.4. Carga por sismo

Se aplicó el método fuerzas estáticas equivalentes; asimismo, considerando el factor Z de la zona 4 y el factor de uso para edificaciones comunes.

$$Z = 0.4 ; U = 1$$

Periodo fundamental de vibración de la estructura no arriostrada, es:

$$T = \frac{h_n}{C_t} = \frac{1.356}{35} = 0.039 \text{ s}$$

Considerando un suelo intermedio, el periodo que define la plataforma del factor C

$$T_p = 0.6 \text{ s}$$

Al cumplirse la condición:

$$T = 0.039 < T_p = 0.6$$

Entonces, según la norma el factor de amplificación sísmica es:

$$C = 2.5$$

El factor de suelo S

$$S_2 = 1.05$$

Coefficiente básico de reducción

$$R_0 = 8$$

Factor de irregularidad en altura

$$I_a = 0.75$$

Factor de irregularidad en planta

$$I_p = 0.75$$

Coefficiente de reducción de las fuerzas sísmicas

$$R = R_0 I_a I_p = 8 * 0.75 * 0.75 = 4.50$$

Relación C/R

$$\frac{C}{R} = \frac{2.50}{4.50} = 0.56 \geq 0.11$$

Fuerza cortante horizontal

$$V = \frac{ZUCS}{R} P = \frac{0.4 * 1 * 2.5 * 1.05}{0.56} * 631.92 = 1184.85 \text{ Kg}$$

4.3.1.5. Carga por efecto térmico

El cambio de longitud por el cambio de temperatura en la viga superior se calcula como deformación lineal.

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = 12 * 10^{-6} * 1.079 * (78 - 25) = 0.00069 \text{ m}$$

Deformación unitaria de la viga superior

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{0.00069}{1.079} = 0.00064$$

Por la ley de Hooke, se tiene que el esfuerzo térmico, es:

$$\sigma = E\varepsilon = 200 * 10^9 * 0.00064 = 128 \text{ MPa}$$

El resumen de las cargas se muestra en la tabla 13

Tabla 15.

Resumen de cargas totales en la estructura del secador a optimizar.

Ítem	Tipo de carga	Descripción	Cantidad	Unidad
1	Carga muerta, D			Kg
	1.1	Estructura soporte	126.33	Kg
	1.2	Plancha cobertura 1	156.72	Kg
	1.3	Plancha cobertura 2	75.92	Kg
	1.4	Plancha cobertura 3	35.42	Kg
	1.5	Aislamiento	81.53	Kg
	1.6	Ventilador	150.00	Kg
	1.7	Resistencias	6.00	Kg
	1.8	Otros (5%)	31.60	Kg
2	Carga viva, L			
	2.1	Distribuida	100	Kg/m ²
3	Carga viento, W			
	3.1	Barlovento	22.5	Kg/m ²
	3.2	Sotavento	-16.88	Kg/m ²
4	Carga sismo, E			
	4.1	Cortante horizontal	1184.85	Kg
5	Carga térmica			
	5.1	Esfuerzo por carga térmica en viga	13.05*10 ⁶	Kg/m ²

4.3.2. Combinaciones de carga

La resistencia de la estructura se determinó considerando las combinaciones de carga para el método ASD, según norma E.090. La estructura es simétrica. En la figura 42 se muestra el marco simplificado del secador de bobinas, con los extremos inferiores empotrados. Se debe analizar con la teoría de pórticos y para fines prácticos tanto en construcción como en el cálculo, se considera secciones iguales en los 3 elementos del marco, entonces AB, BC y CD tienen el mismo segundo momento de inercia I . Se calculan 3 combinaciones.

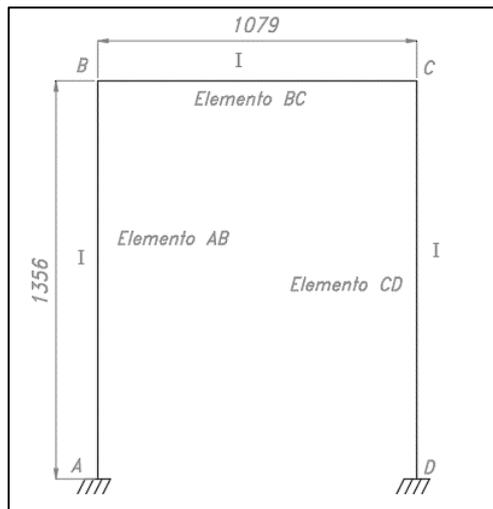


Figura 43. Marco simplificado de la estructura

- Combinación de carga 1, D

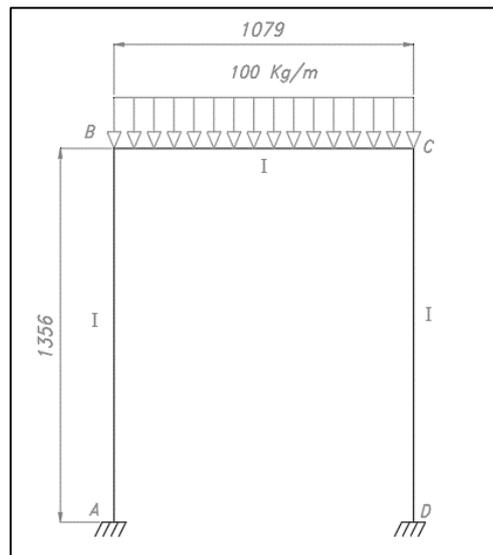


Figura 44. Combinación de carga 1, D.

- Combinación de carga 2, D + L

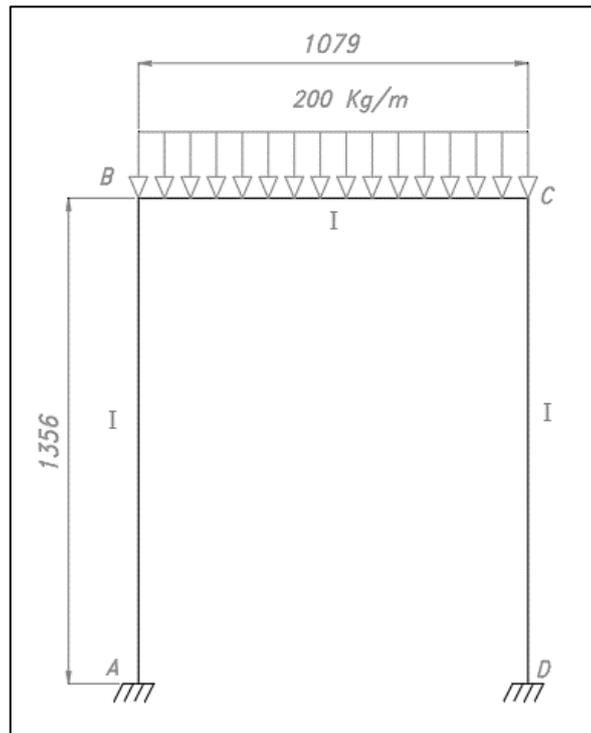


Figura 45. Combinación de carga 2, D+L.

- Combinación de carga 3, D + E

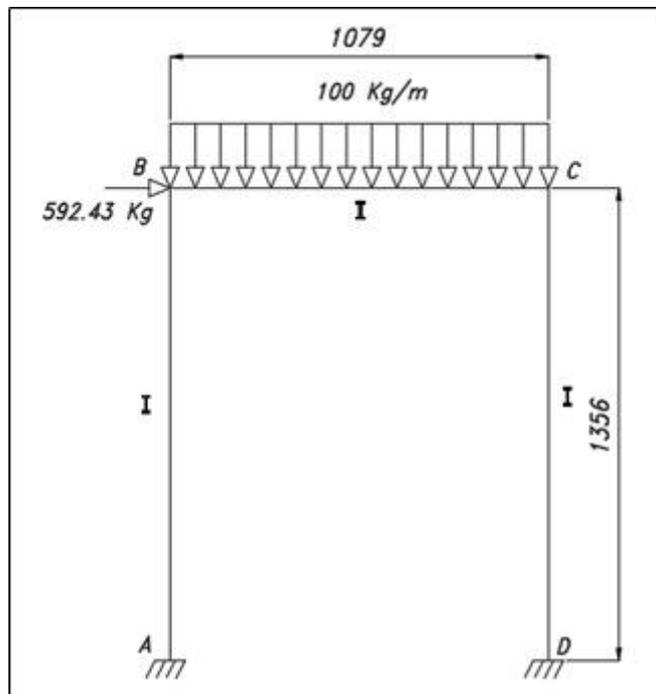


Figura 46. Combinación de carga 2, D+L.

4.3.3. Cálculo de momentos y fuerzas cortantes

La combinación 1 y 2 se analizan mediante el método de análisis del desplazamiento para un marco con uniones sin desplazamientos.

- La carga muerta para el elemento BC

$$w = w_e + w_{BC} = 100 + 7.292 = 107.292 \frac{Kg}{m}$$

- Carga muerta para los elementos AB y CD

$$W_{CD} = 9.89 Kg; W_{AB} = 9.89 Kg$$

- Momento del extremo fijo, FEM

$$(FEM)_{BC} = -\frac{wl_{BC}^2}{12} = -\frac{107.292 * 1.079^2}{12} = -9.65 Kg * m$$

$$(FEM)_{CB} = \frac{wl_{BC}^2}{12} = \frac{107.292 * 1.079^2}{12} = 9.65 Kg * m$$

- Desplazamiento angular del claro

$$\theta_A = \theta_D = 0$$

- Rotación de la cuerda

$$\Psi_{AB} = \Psi_{BC} = \Psi_{CD} = 0$$

- Rigidez de las uniones

$$k_{AB} = \frac{I}{L_{AB}} = \frac{I}{1.356}$$

$$k_{BC} = \frac{I}{L_{BC}} = \frac{I}{1.079}$$

$$k_{CD} = \frac{I}{L_{CD}} = \frac{I}{1.356}$$

- Momentos internos, aplicando la ecuación de pendiente deflexión

$$M_N = 2Ek(2\theta_N + \theta_F - 3\Psi) + (FEM)_N$$

$$M_{AB} = 2E \frac{I}{1.356} (2 * 0 + \theta_B - 3 * 0) + 0$$

$$M_{AB} = 1.475EI\theta_B$$

$$M_{BA} = 2E \frac{I}{1.356} (2 * \theta_B + 0 - 3 * 0) + 0$$

$$M_{BA} = 2.950EI\theta_B$$

$$M_{BC} = 2E \frac{I}{1.079} (2 * \theta_B + \theta_C - 3 * 0) - 9.65$$

$$M_{BC} = 3.707EI\theta_B + 1.854EI\theta_C - 9.65$$

$$M_{CB} = 2E \frac{I}{1.079} (2 * \theta_C + \theta_B - 3 * 0) + 9.65$$

$$M_{CB} = 3.707EI\theta_C + 1.854EI\theta_B + 9.65$$

$$M_{CD} = 2E \frac{I}{1.356} (2 * \theta_C + 0 - 3 * 0) + 0$$

$$M_{CD} = 2.950EI\theta_C$$

$$M_{DC} = 2E \frac{I}{1.356} (2 * 0 + \theta_C - 3 * 0) + 0$$

$$M_{DC} = 1.475EI\theta_C$$

- Ecuaciones de equilibrio

$$M_{BA} + M_{BC} = 0$$

$$2.950EI\theta_B + 3.707EI\theta_B + 1.854\theta_C - 9.65 = 0$$

$$6.657EI\theta_B + 1.854EI\theta_C = 9.65$$

$$M_{CB} + M_{CD} = 0$$

$$3.707EI\theta_C + 1.854\theta_B + 9.65 + 2.950EI\theta_C = 0$$

$$6.657EI\theta_C + 1.854EI\theta_B = -9.65$$

Resolviendo,

$$\theta_B = -\theta_C = \frac{2.01}{EI}$$

Los momentos serían:

$$M_{AB} = 1.475EI \frac{2.01}{EI} = 2.96 \text{ Kg} * m$$

$$M_{BA} = 2.950EI \frac{2.01}{EI} = 5.92 \text{ Kg} * m$$

$$M_{BC} = 3.707EI \frac{2.01}{EI} - 1.854EI \frac{2.01}{EI} - 9.65 = -5.92 \text{ Kg} * m$$

$$M_{CB} = -3.707EI \frac{2.01}{EI} + 1.854EI \frac{2.01}{EI} + 9.65 = 5.92 \text{ Kg} * m$$

$$M_{CD} = -2.950EI \frac{2.01}{EI} = -5.92 \text{ Kg} * m$$

$$M_{DC} = -1.475EI \frac{2.05}{EI} = -2.96 \text{ Kg} * m$$

- Reacciones en sujeciones A y D.

$$A_y = D_y = \frac{100 * 1.079 + 9.89 * 2}{2} = 63.84 \text{ Kg}$$

- Las fuerzas cortantes en el elemento BC, es:

$$V_{BC} = \frac{M_{BC} - M_{CB}}{l_{BC}} - \frac{l_{BC} w_e}{2} = \frac{5.92 - 5.92}{1.079} - \frac{100 * 1.079}{2} = -53.95 \text{ Kg}$$

- La fuerza cortante a lo largo de la viga V(x), es:

$$V_{BC}(x) = V_{BC} + w * x$$

$$V_{BC} \left(x = \frac{l}{4} \right) = -53.95 + 100 * \frac{1.079}{4} = -26.98 \text{ Kg}$$

$$V_{BC} \left(x = \frac{l}{2} \right) = -53.95 + 100 * \frac{1.079}{4} = 0 \text{ Kg}$$

$$V_{BC}(x = l) = -53.95 + 100 * 1.079 = 53.95 \text{ Kg}$$

- El momento a lo largo del elemento BC M(x), es:

$$M_{BC}(x) = M_{BC} + V_{BC}x + \frac{1}{2}wx^2$$

$$M_{BC} \left(x = \frac{l}{4} \right) = 5.92 - 53.95 * \frac{1.079}{4} + \frac{1}{2} * 100 * \left(\frac{1.079}{4} \right)^2 = -4.99 \text{ Kg} * m$$

$$M_{BC} \left(x = \frac{l}{2} \right) = 5.92 - 53.95 * \frac{1.079}{2} + \frac{1}{2} 100 * \left(\frac{1.079}{2} \right)^2 = -8.63 \text{ Kg} * m$$

$$M_{BC}(x = l) = 5.92 - 53.95 * 1.079 + \frac{1}{2} 100 * (1.079)^2 = 5.92 \text{ Kg} * m$$

Se muestra el diagrama de momentos flectores del marco en la combinación de carga 1, ver figura 46.

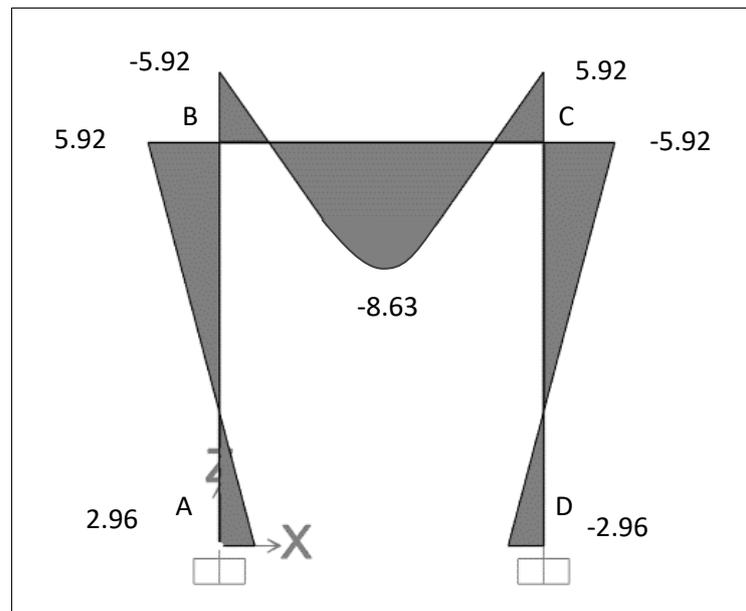


Figura 47. Diagrama momentos flectores en el marco, combinación 1.

- Las fuerzas cortantes en los elementos AB y DC

$$V_{AB} = \frac{M_{BA} - M_{AB}}{l_{AB}} = \frac{5.92 - (-2.96)}{1.356} = 6.55 \text{ Kg}$$

$$V_{CD} = \frac{M_{CD} - M_{DC}}{l_{CD}} = \frac{-5.92 - 2.96}{1.356} = -6.55 \text{ Kg}$$

- Las reacciones en las sujeciones empotradas A y D

$$A_x = V_{AB} = -6.55 \text{ Kg}$$

$$D_x = V_{CD} = 6.55 \text{ Kg}$$

En la figura 47 se muestra el diagrama de fuerza cortante en los 3 elementos del marco para la combinación 1.

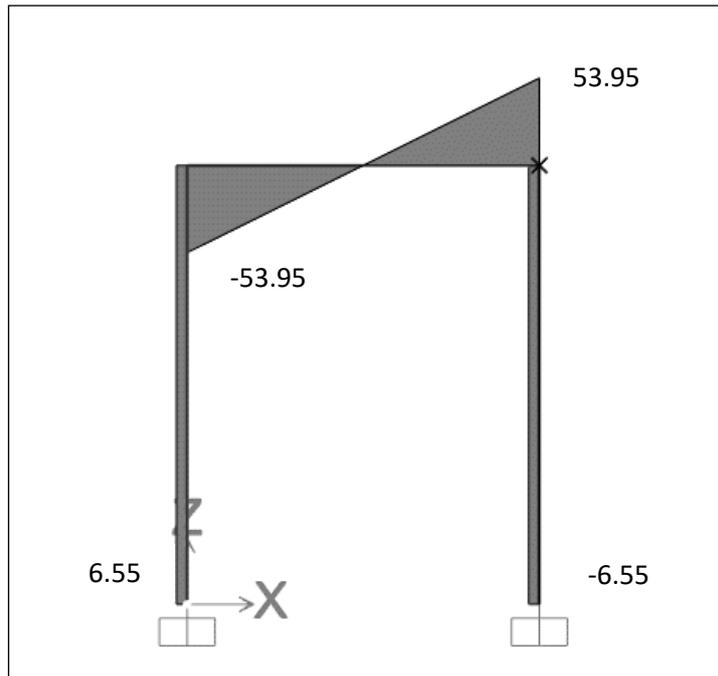


Figura 48. Diagrama de fuerza cortante en el marco, combinación 1.

Se simuló la combinación de carga en SAP2000 y los valores obtenidos son correctos. La combinación 2, se realizó el cálculo y se obtuvieron los momentos en el marco que se muestra en la figura 48.

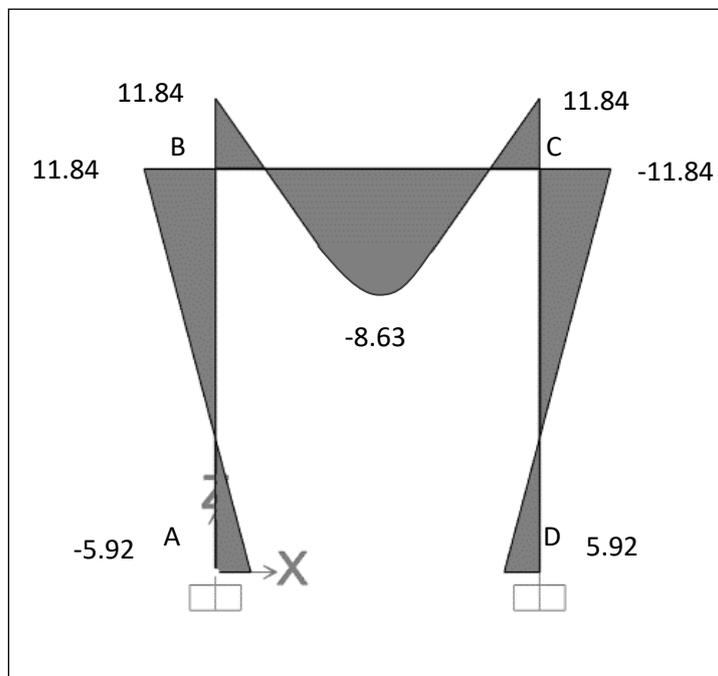


Figura 49, Diagrama de fuerza cortante en el marco, combinación 2.

En la figura 49, se muestra el diagrama de fuerza cortante del marco para la combinación de carga 2.

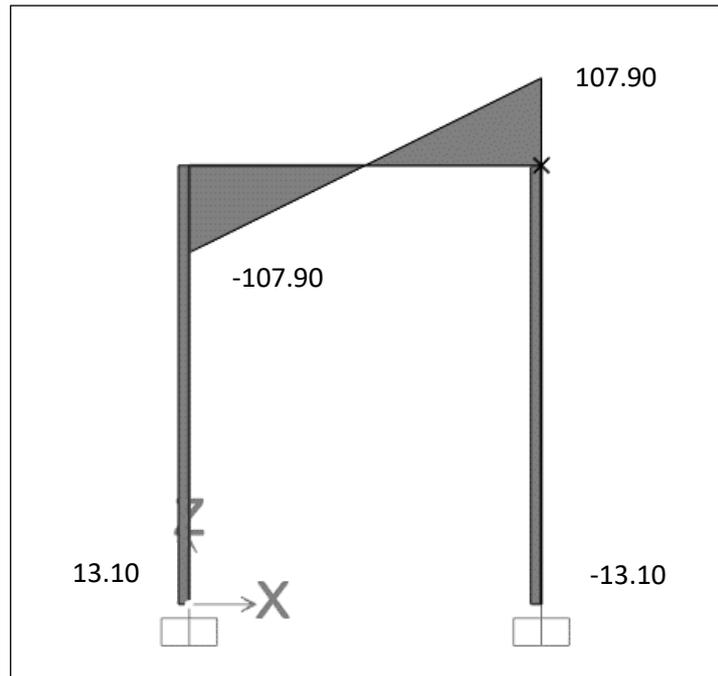


Figura 50, Diagrama de fuerza cortante en el marco, combinación 2.

Como se puede observar la combinación 2, para las condiciones de carga consideradas, tienen el doble del valor para el momento y el cortante.

La combinación de carga 3, que considera el sismo y la carga muerta, se analiza igualmente con las ecuaciones de pendiente-deflexión, pero en este caso con los puntos con desplazamiento. Se evaluaron por separado las cargas, las que generan desplazamiento en el eje x y las que solo generan rotación sin desplazamiento, como el factor de carga para ambos casos es de 1, entonces solo se evaluará la estructura bajo la carga de sismo y se sumaran los resultados de la carga muerta evaluada en la combinación 1.

$$\psi_{AB} = \frac{\Delta}{L_{AB}} = \frac{\Delta}{1.356}$$

$$\psi_{DC} = \frac{\Delta}{L_{DC}} = \frac{\Delta}{1.356}$$

- El ángulo de giro de la cuerda de los elementos AB y DC son iguales:

$$\psi_{AB} = \psi_{DC} = \psi$$

- Aplicando la ecuación de pendiente – deflexión a cada nodo, se obtuvo:

$$M_N = 2Ek(2\theta_N + \theta_F - 3\Psi) + (FEM)_N$$

$$M_{AB} = 2E \frac{I}{1.356} (2 * 0 + \theta_B - 3 * \psi) + 0$$

$$M_{AB} = EI(1.475\theta_B - 4.43\psi)$$

$$M_{BA} = 2E \frac{I}{1.356} (2 * \theta_B + 0 - 3 * \psi) + 0$$

$$M_{BA} = EI(2.950\theta_B - 4.43\psi)$$

$$M_{BC} = 2E \frac{I}{1.079} (2 * \theta_B + \theta_C - 3 * 0) - 0$$

$$M_{BC} = EI(3.707\theta_B + 1.854\theta_C)$$

$$M_{CB} = 2E \frac{I}{1.079} (2 * \theta_C + \theta_B - 3 * 0) + 0$$

$$M_{CB} = EI(3.707\theta_C + 1.854\theta_B)$$

$$M_{CD} = 2E \frac{I}{1.356} (2 * \theta_C + 0 - 3 * \psi) + 0$$

$$M_{CD} = EI(2.950\theta_C - 4.43\psi)$$

$$M_{DC} = 2E \frac{I}{1.356} (2 * 0 + \theta_C - 3 * \psi) + 0$$

$$M_{DC} = EI(1.475\theta_C - 4.43\psi)$$

- Ecuaciones de equilibrio

$$M_{BA} + M_{BC} = 0$$

$$M_{CB} + M_{CD} = 0$$

- Sumatoria de fuerzas en x considerando el marco completo

$$\sum F_x = 0$$

$$V_{sismo} - V_A - V_D = 0$$

$$\frac{1184.85}{2} - V_A - V_D = 0$$

- Relacionando las fuerzas y los momentos por elemento con equilibrio de momentos respecto a uno de los extremos

$$\sum M_B = 0$$

$$V_A = -\frac{M_{AB} + M_{BA}}{L_{AB}} = -\frac{M_{AB} + M_{BA}}{1.356}$$

$$\sum M_C = 0$$

$$V_D = -\frac{M_{DC} + M_{CD}}{L_{CD}} = -\frac{M_{DC} + M_{CD}}{1.356}$$

Por lo tanto, se tiene

$$\frac{1184.85}{2} - \left(-\frac{M_{AB} + M_{BA}}{1.356}\right) - \left(-\frac{M_{DC} + M_{CD}}{1.356}\right) = 0$$

$$592.425 + \frac{M_{AB} + M_{BA}}{1.356} + \frac{M_{DC} + M_{CD}}{1.356} = 0$$

Reemplazando los momentos en las ecuaciones de equilibrio, quedó:

- Momentos en nodo B

$$EI(2.950\theta_B - 4.43\psi) + EI(3.707\theta_B + 1.854\theta_C) = 0$$

$$6.657\theta_B + 1.854\theta_C - 4.43\psi = 0$$

- Momentos en nodo C

$$EI(3.707\theta_C + 1.854\theta_B) + EI(2.950\theta_C - 4.43\psi) = 0$$

$$1.854\theta_B + 6.657\theta_C - 4.43\psi = 0$$

- Momentos en marco

$$4.425\theta_B + 4.425\theta_C - 17.72\psi = -\frac{805.698}{EI}$$

Resolviendo, por reducción

$$\left\{ \begin{array}{l} 6.657\theta_B + 1.854\theta_C - 4.43\psi = 0 \\ 1.854\theta_B + 6.657\theta_C - 4.43\psi = 0 \\ 4.425\theta_B + 4.425\theta_C - 17.72\psi = -\frac{805.698}{EI} \end{array} \right\}$$

Para el miembro 1 y 2

$$\begin{cases} -6.657\theta_B - 1.854\theta_C + 4.43\psi = 0 \\ 1.854\theta_B + 6.657\theta_C - 4.43\psi = 0 \end{cases}$$
$$-4.803\theta_B + 4.803\theta_C = 0$$

Para el miembro 2 y 3

$$\begin{cases} -7.416\theta_B - 26.628\theta_C + 17.72\psi = 0 \\ 4.425\theta_B + 4.425\theta_C - 17.72\psi = -\frac{805.698}{EI} \end{cases}$$
$$2.991\theta_B + 22.203\theta_C = \frac{805.698}{EI}$$

Resolviendo los dos resultados

$$\begin{cases} -2.991\theta_B + 2.991\theta_C = 0 \\ 2.991\theta_B + 22.203\theta_C = \frac{805.698}{EI} \end{cases}$$
$$25.194\theta_C = \frac{805.698}{EI}$$

Rotación del nodo C

$$\theta_C = \frac{31.98}{EI}$$

Rotación del nodo B

$$\theta_B = \frac{31.98}{EI}$$

La rotación de la cuerda del elemento AB y CD

$$6.657 \frac{31.98}{EI} + 1.854 \frac{31.98}{EI} - 4.43\psi = 0$$
$$\psi = \frac{61.44}{EI}$$

Reemplazando en las relaciones resultantes de las ecuaciones pendiente – deflexión.

$$M_{AB} = EI \left(1.475 \frac{31.98}{EI} - 4.43 \frac{61.44}{EI} \right) = -225.01 \text{ Kg} * m$$

$$M_{BA} = EI \left(2.950 \frac{31.98}{EI} - 4.43 \frac{61.44}{EI} \right) = -177.84 \text{ Kg} * m$$

$$M_{BC} = EI \left(3.707 \frac{31.98}{EI} + 1.854 \frac{31.98}{EI} \right) = 177.84 \text{ Kg} * m$$

$$M_{CB} = EI \left(3.707 \frac{31.98}{EI} + 1.854 \frac{31.98}{EI} \right) = 177.84 \text{ Kg} * m$$

$$M_{CD} = EI \left(2.950 \frac{31.98}{EI} - 4.43 \frac{61.44}{EI} \right) = -177.84 \text{ Kg} * m$$

$$M_{DC} = EI \left(1.475 \frac{31.98}{EI} - 4.43 \frac{61.44}{EI} \right) = -225.01 \text{ Kg} * m$$

El diagrama de momentos internos por la carga por sismo aplicada al marco, se muestran en la figura 50, los resultados varían en +/- 1 Kg*m comparados con los resultados del SAP2000.

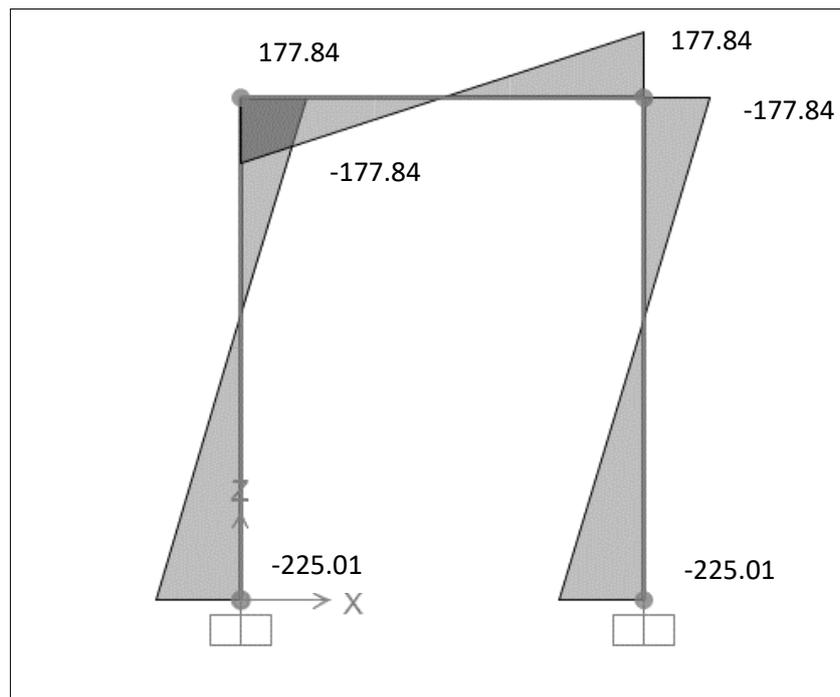


Figura 51. Diagrama de momento flector en el marco, sismo.

La fuerza cortante por sismo en los elementos del marco, son:

$$V_{AB} = \frac{M_{AB} - M_{BC}}{l_{AB}} = \frac{177.84 - (-225.01)}{1.356} = 297.09 \text{ Kg}$$

$$V_{BC} = \frac{M_{CB} - M_{AB}}{l_{BC}} = \frac{177.84 - (-177.84)}{1.079} - \frac{7.702 * 1.079}{2} = 325.70 \text{ Kg}$$

$$V_{CD} = \frac{M_{CD} - M_{DC}}{l_{CD}} = \frac{-225.01 - (177.84)}{1.356} = -297.09 \text{ Kg}$$

El diagrama de fuerza cortante por sismo, se muestra en la figura 51.

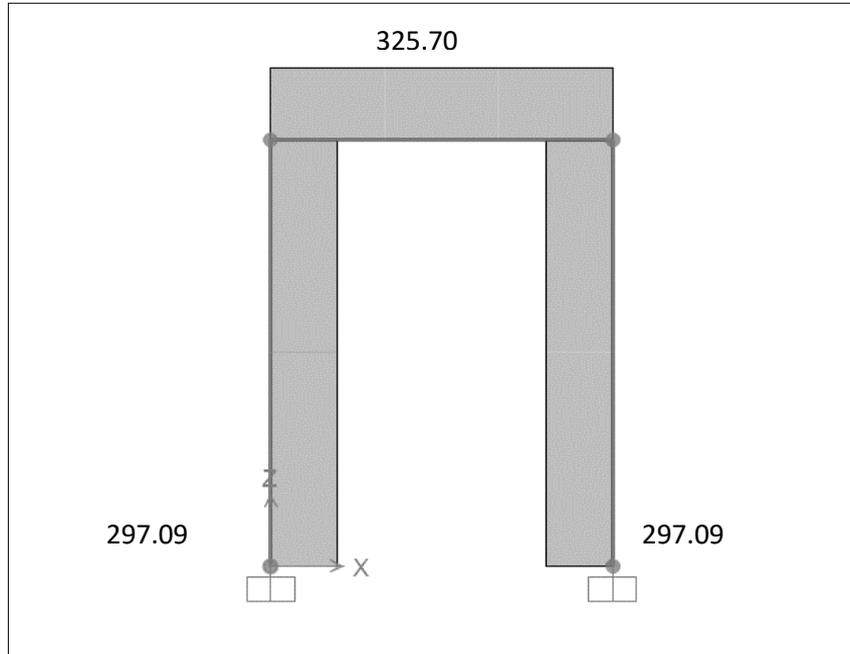


Figura 52. Diagrama de fuerza cortante en el marco, sismo.

Las reacciones en las sujeciones empotradas A y B, deben equilibrar los cortantes en los elementos del marco.

$$A_x = D_x = 297.09 \text{ Kg}$$

$$A_y = D_y = 325.70 \text{ Kg}$$

Los resultados de carga muerta y sismo se suman según la combinación de carga 3 y se realiza un diagrama de momentos modificado.

- Momentos resultantes de la combinación de carga 3

$$M_{AB} = -225.01 + 2.96 = -222.05 \text{ Kg} * m$$

$$M_{BA} = -177.84 + 5.92 = -171.92 \text{ Kg} * m$$

$$M_{BC} = 177.84 - 5.92 = 171.92 \text{ Kg} * m$$

$$M_{CB} = 177.84 + 5.92 = 183.76 \text{ Kg} * m$$

$$M_{CD} = -177.84 - 5.92 = -183.76 \text{ Kg} * m$$

$$M_{DC} = -225.01 - 2.96 = -183.76 \text{ Kg} * m$$

El diagrama de momento flector para la combinación 3 se muestra en la figura 52.

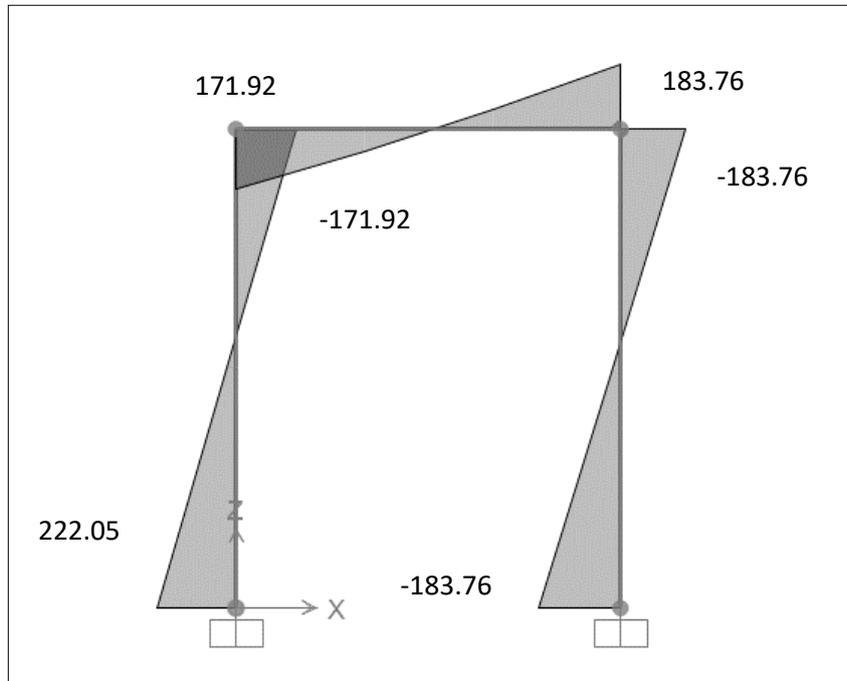


Figura 53. Diagrama de momento flector en el marco, combinación de carga 3.

Se procedió a simular en SAP2000 la combinación de carga 3 y se puede observar una variación de +/- 2 Kg con los resultados de SAP2000.

4.3.4. Criterio de fluencia por flexión según norma técnica peruana E.090

Debido a que las cargas para las cuales se diseña la estructura del horno, son en mayor magnitud momentos flectores y fuerzas cortantes. El peso considerado en los cálculos anteriores se realizó considerando ángulo de 3x3x1/4", sin embargo, al modelarlo en SolidWorks la sección de este perfil no resiste las solicitaciones de carga calculadas. Por este motivo, se considera cambiar la sección a un canal U4x5.4 fabricado en acero ASTM A992.

- Relación de ancho – espesor

$$\frac{b}{t} = \frac{40.132 \text{ mm}}{7.5184 \text{ mm}} = 5.3378 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{F_y}} = \frac{170}{\sqrt{345.31}} = 9.1484$$

Entonces la sección es compacta y por ende no es esbelta

- Longitud mínima no arriostrada

$$L_c = 200 * \frac{b}{\sqrt{F_y}} = 200 * \frac{40.132}{\sqrt{345.31}} = 432 \text{ mm}$$

$$L_c < L_b$$

- Replanteo del diagrama de fuerza cortante considerando el peso del canal U4x5.4 ASTM A992.

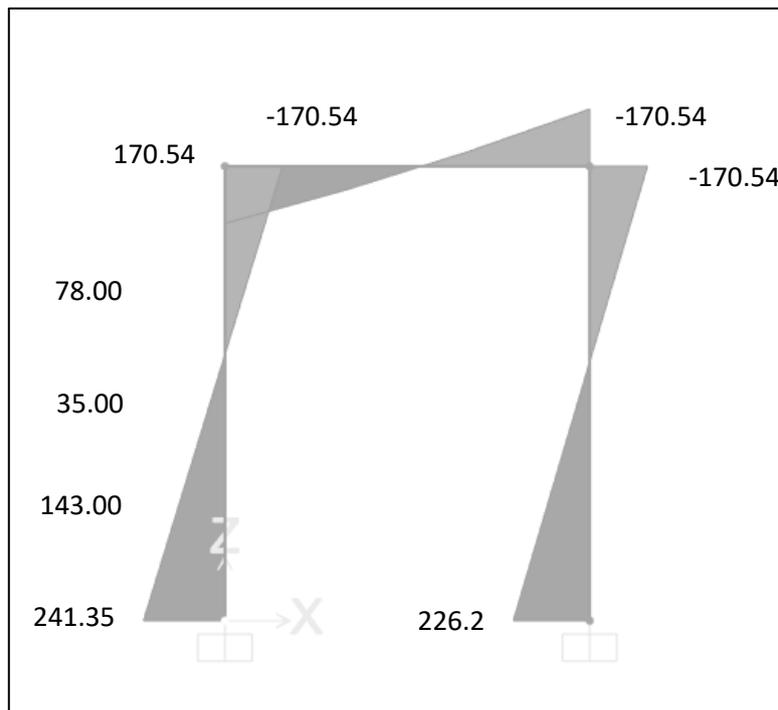


Figura 54. Diagrama de momento flector recalculado para la sección U4x5.4.

- Valor absoluto del máximo momento en el elemento 1.

$$M_{m\acute{a}x} = 0.241 T * m$$

- Valor absoluto del momento en primer cuarto del elemento 1.

$$M_A = 0.143 T * m$$

- Valor absoluto del momento en el centro del elemento 1.

$$M_B = 0.035 T * m$$

- Valor absoluto del momento en el tercer cuarto del elemento 1.

$$M_C = 0.078 T * m$$

- Factor de modificación por pandeo lateral torsional para diagrama de momento no uniforme.

$$C_b = \frac{12.5M_{m\acute{a}x}}{2.5M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$$

$$C_b = \frac{12.5 * 0.222}{2.5 * 0.222 + 3 * 0.143 + 4 * 0.035 + 3 * 0.078} = 2.04$$

- Según la sección compacta y con la longitud de no arriostamiento calculada, la relación para determinar si el perfil soporta las cargas es como indica la norma E.090 en la sección 6.1.2.1c. en el anexo 9 se muestra una tabla donde en función de las características de la sección se indica el criterio de aceptación.

$$F_b = \frac{83 * 10^3 * C_b}{\left(\frac{l_b}{A_{sección}}\right)} = \frac{83 * 10^3 * 2.04}{\left(\frac{1.079}{1.56 * 0.0254^2}\right)} = 157.94 \text{ MPa}$$

- Criterio de fluencia, considerando el acero ASTM A992 con una resistencia a la fluencia de 345.31 MPa.

$$F_b < 0.6F_y = 0.6 * 345.31 = 207.186$$

Por lo tanto, el canal U4x5.4 fabricado en ASTM A992, cumple el criterio de fluencia por flexión.

4.3.5. Criterio de fluencia por corte según norma técnica peruana E.090

Como las cargas de corte también son considerablemente altas, se procedió a verificar por diseño por corte.

- Relación altura espesor de alma para determinar el valor de Fv

$$\frac{h}{t_w} = \frac{101.6}{4.572} = 22.22 \leq \frac{1000}{\sqrt{F_y}} = \frac{1000}{\sqrt{345.31}} = 53.81$$

- La máxima fuerza cortante recalculada considerando el peso de la sección U4x5.4, es:

$$V_{CB} = 371.58 * 9.81 = 3645.20 \text{ N}$$

- Esfuerzo cortante por carga cortante

$$F_v = \frac{V_{CB}}{A_{sección}} = \frac{3645.20}{1.56 * 0.0254^2} = 3.62 \text{ MPa}$$

$$3.62 \text{ MPa} < 0.40 * F_y = 0.40 * 345.31 = 138.124 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, el canal U4x5.4 fabricado en ASTM A992, cumple el criterio de fluencia por corte de la sección 6.2.2.2. método ASD.

4.3.6. Optimización de la sección de la estructura en SolidWorks

Se procedió a modelar en SolidWorks el marco analizado, por dos motivos, primero para corroborar los diagramas de momentos y los esfuerzos; y segundo, para optimizar la estructura mediante estudio de diseño.

- Modelo geométrico de marco en SolidWorks

El marco se calculó considerando ángulo de 3x3x1/4" A36 y posteriormente al aplicar el criterio de diseño ASD se optó por perfil U4x5.4 A992. En esta etapa se modela en SolidWorks el marco para determinar si el perfil es óptimo o si se puede considerar un canal de menor dimensión o de mayor en caso se requiera un factor de seguridad mayor.

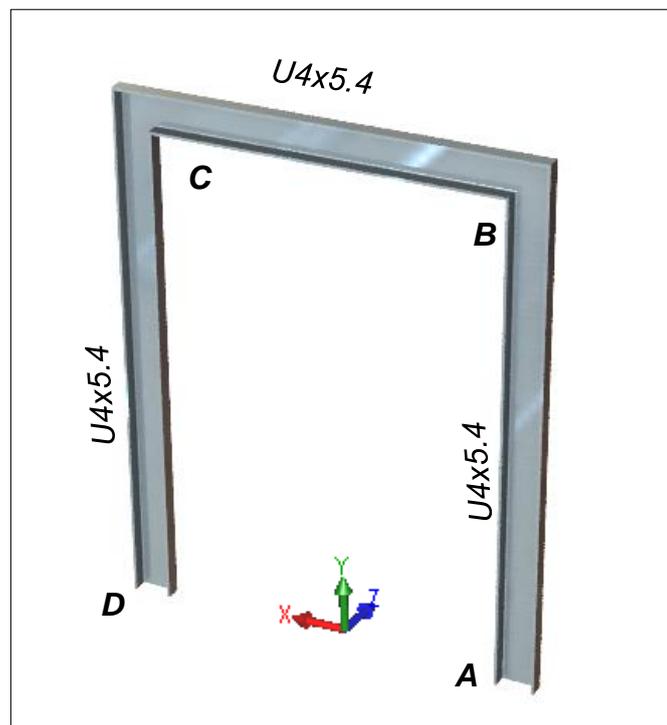


Figura 55. Modelo marco en SolidWorks.

El modelo considera los perfiles U con el alma paralela al plano xy de manera que el eje mayor de la sección de los elementos verticales coincida con la línea de acción de la fuerza cortante por sismo.

- Parámetros de sección del modelo en SolidWorks

Se considera un canal U americano para la sección transversal de los elementos. Cada dimensión de la sección representará una variable a optimizar. En la figura 55 se muestra las dimensiones del perfil.

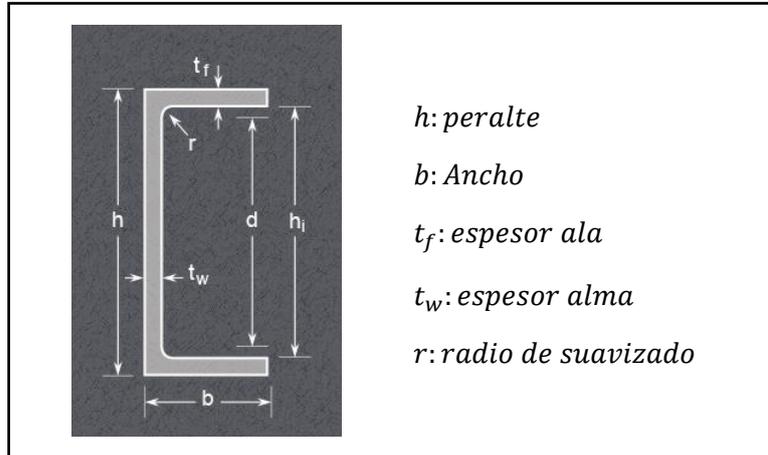


Figura 56. Modelo marco en SolidWorks.

- Sujeciones del modelo en SolidWorks

Las sujeciones son fijas en A y D de manera que se modele el empotramiento a una base que tendrá la estructura del horno.

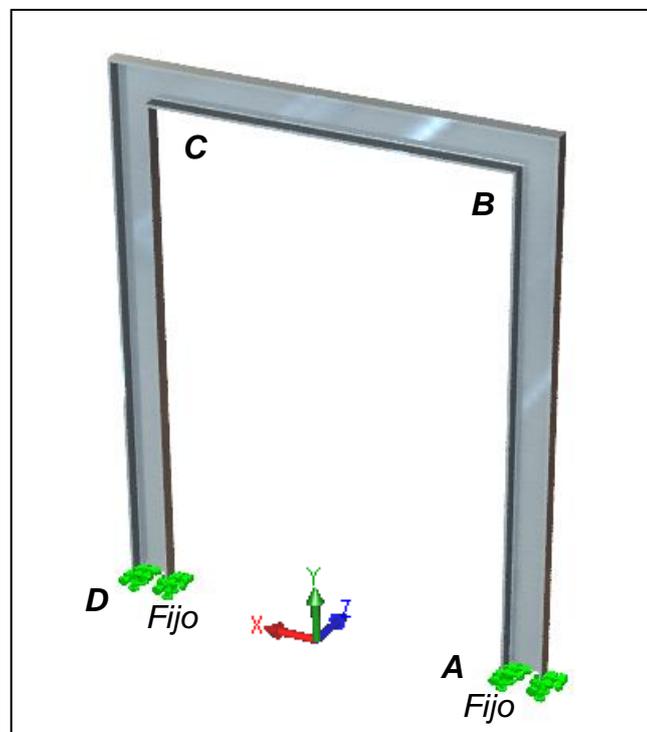


Figura 57. Modelo marco en SolidWorks.

- Cargas en modelo en SolidWorks

Las cargas se agregan en SolidWorks en la misma disposición que en el cálculo manual con la combinación de carga 3.

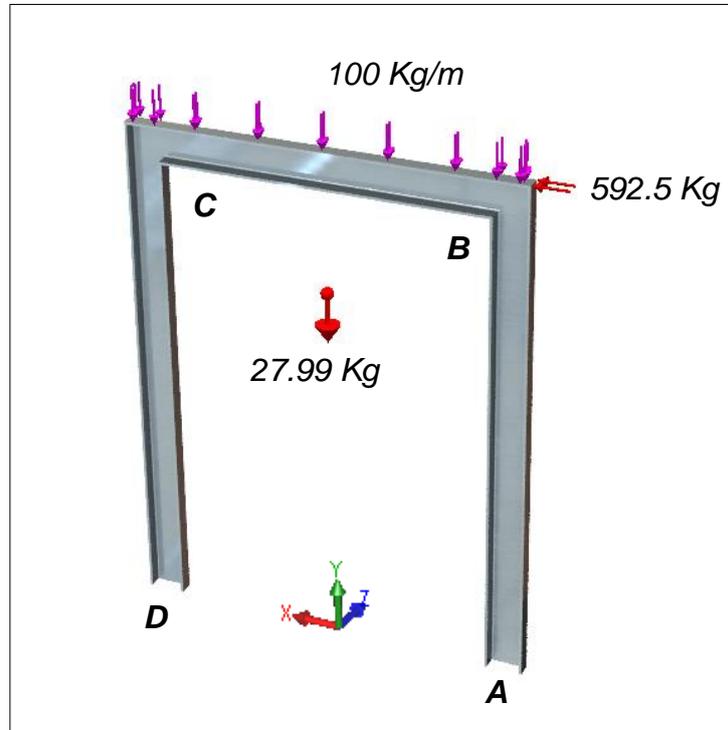


Figura 58. Combinación de cargas en modelo marco en SolidWorks.

- Mallado del modelo en SolidWorks



Figura 59. Mallado marco en SolidWorks.

- Resultados simulación: Esfuerzo de Von mises en SolidWorks

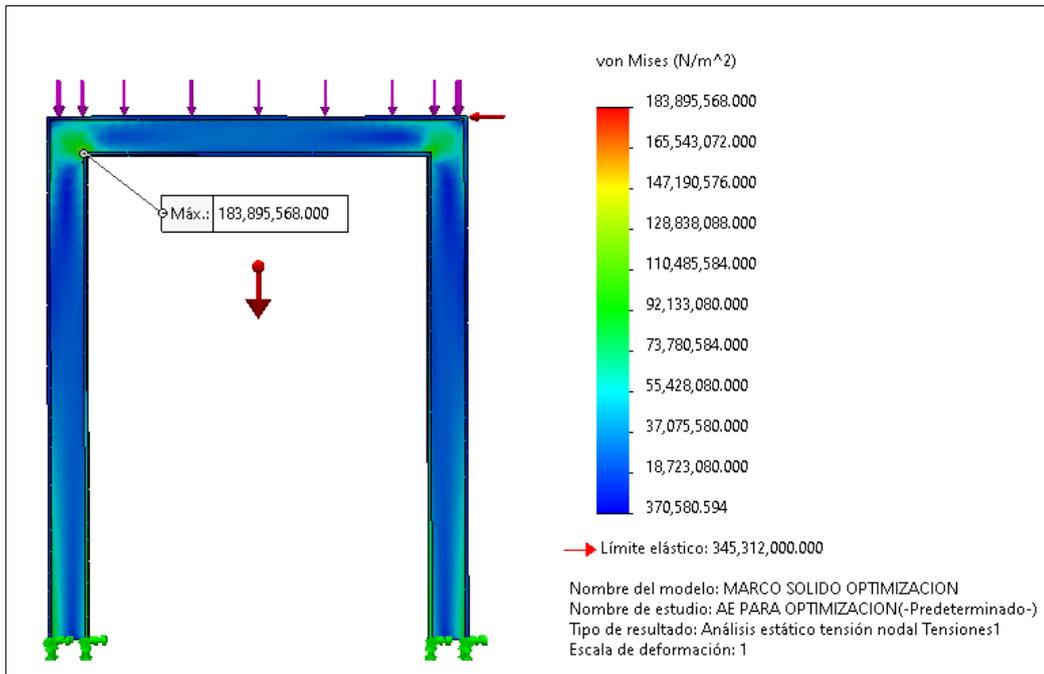


Figura 60. Esfuerzos de Von Mises para la combinación de carga 3, en SolidWorks.

- Resultados simulación: Desplazamientos en SolidWorks

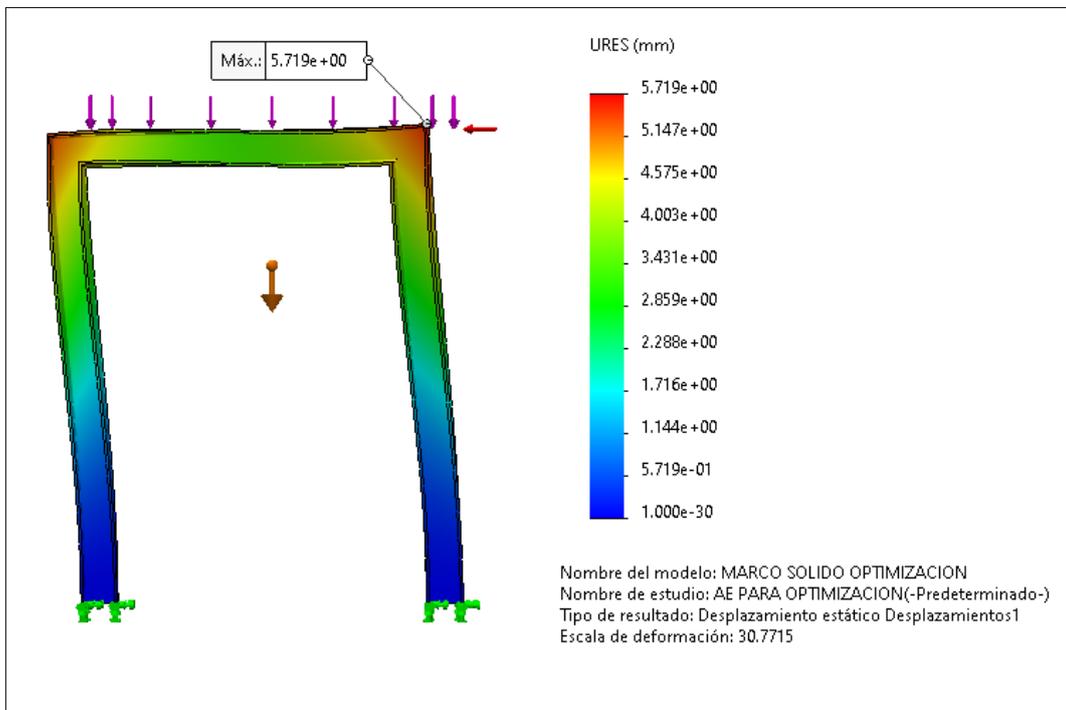


Figura 61. Desplazamientos para la combinación de carga 3, en SolidWorks.

- Resultados simulación: Esfuerzo normal en elemento AB y CD.

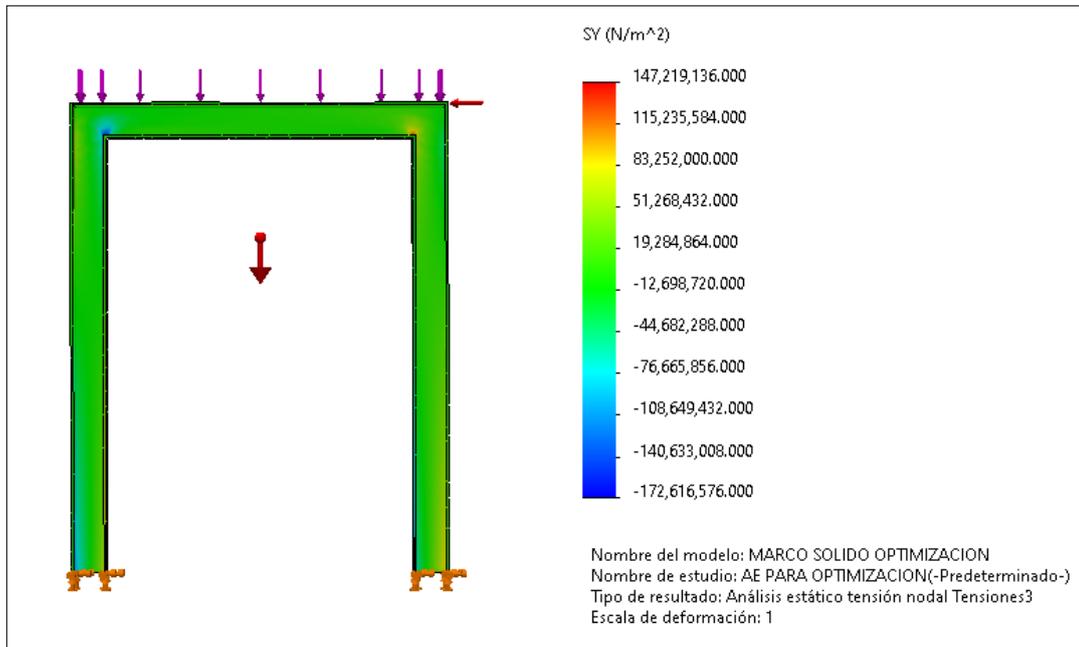


Figura 62. Esfuerzos normales en dirección paralela al eje longitudinal de elementos AB y CD para la combinación de carga 3, en SolidWorks.

- Resultados simulación: Esfuerzo normal en elemento BC.

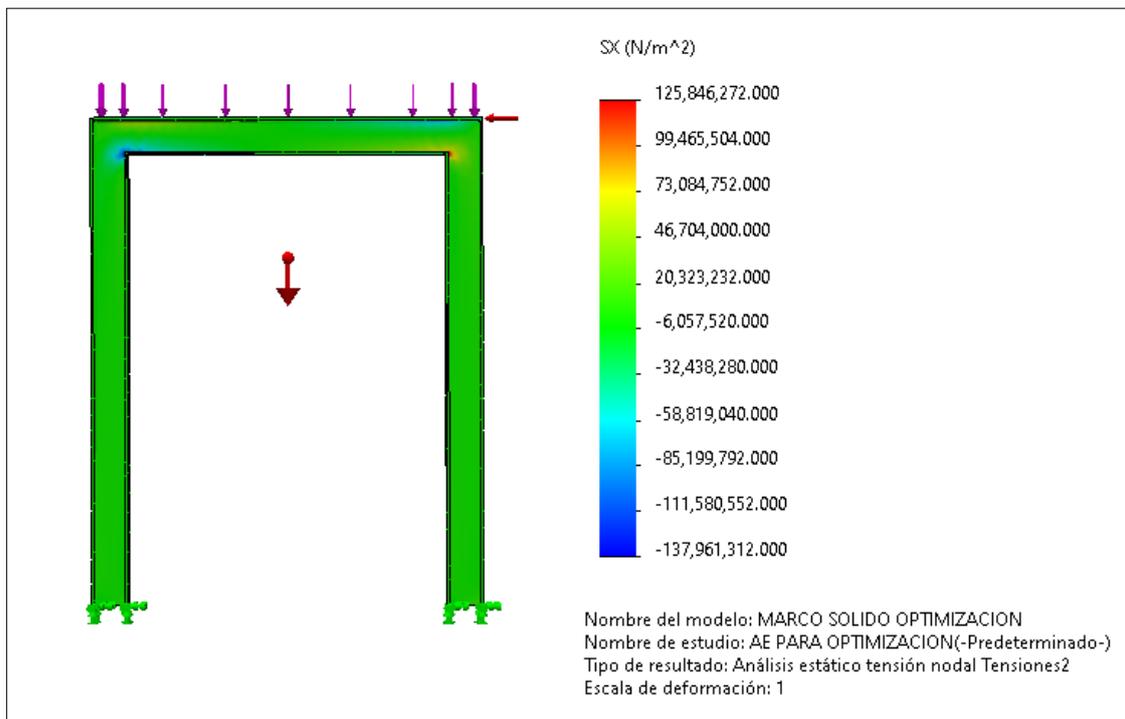


Figura 63. Esfuerzos normales en dirección paralela al eje longitudinal del elemento BC para la combinación de carga 3, en SolidWorks.

- Resultados simulación: Factor de seguridad en el modelo del marco.

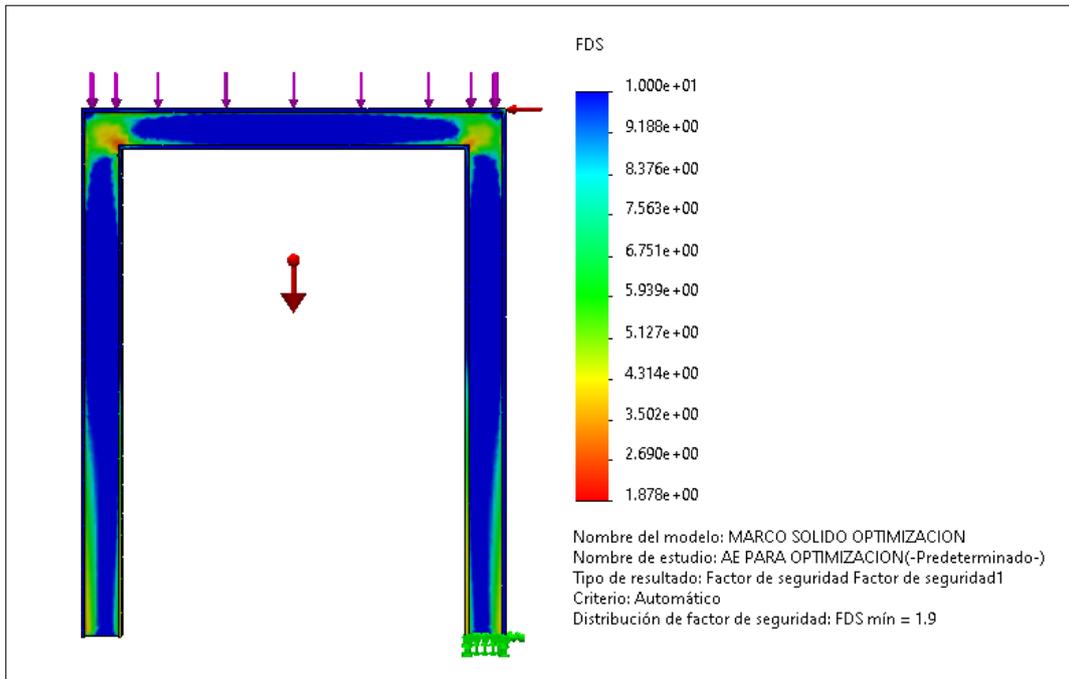


Figura 64. Factor de seguridad del modelo del marco para la combinación de carga 3, en SolidWorks.

Se pudo observar que los esfuerzo de Von Mises es mayor que el esfuerzo calculado manualmente, esto se debe a que el modelo del marco considera las concentraciones de esfuerzo y el esfuerzo normal en el eje z como resultado del pandeo lateral torsional del elemento. Por este motivo el esfuerzo es mayor, sin embargo, el factor de seguridad mínimo indicado considerando un F_y de 345 MPa (A992), es igual a 1.88 (0.54) valor que también es menor a 1.67 (0.60) por lo cual se dice que cumple el criterio de diseño por flexión según ASD.

- Variables de optimización

Como se indicó las variables de optimización son los parámetros de la sección con un rango para cada dimensión. Este rango es considerado con valores máximos y mínimos de dimensiones estándar indicadas por el proveedor de los perfiles de acero, de modo que los valores óptimos queden en un rango cercano a los valores comerciales. En la figura 64 se muestran una captura de las variables en el estudio de optimización de diseño en SolidWorks.

Variables						
Peralte h	Intervalo con	Min:	50.8mm	Máx:	152.4mm	Paso: 25.4mm
Ancho b	Intervalo con	Min:	25.4mm	Máx:	54.864mm	Paso: 5.8928mm
Espesor de alma tw	Intervalo con	Min:	4.318mm	Máx:	8.255mm	Paso: 0.98425mm
Espesor de ala tf	Intervalo con	Min:	4.7498mm	Máx:	8.7122mm	Paso: 0.9906mm
Haga clic aquí para agregar Variables						

Figura 65. Variables de optimización del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.

- Restricciones del estudio de optimización

La restricción de optimización de la sección de los elementos del marco, es el factor de seguridad, el cual debe ser mayor a 1.67 como mínimo.

Restricciones				
Factor de seguridad mínimo1	Es mayor que	Min:	1.67	AE PARA OPTIMIZAC
Haga clic aquí para agregar Restricciones				

Figura 66. Restricción de optimización del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.

- Objetivos del estudio de optimización

Se debe considerar, que, si bien a primera vista se busca evitar los esfuerzos altos, en realidad un diseño bien realizado es el que aprovecha al máximo las propiedades de la sección y el material, para absorber la mayor cantidad de esfuerzos en un modelo sin descender del valor restrictivo del factor de seguridad según la norma técnica peruana E.090.

Objetivos		
Tensión1	Maximizar	AE PARA OPTIMIZAC
Haga clic aquí para agregar Objetivos		

Figura 67. Objetivos de optimización del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.

El estudio de optimización de diseño de SolidWorks indica un total de 750 escenarios de diseño para este caso.

- Resultados de estudio de optimización de diseño

Se evaluaron los escenarios y se obtuvo la siguiente sección óptima, sin embargo, la sección no es comercial y su valor dista demasiado de un canal U comercial.

En la figura, se puede observar el perfil óptimo de nuestro estudio de diseño para la combinación de carga 3.

		Actual	Inicial	Óptimo (737)
Peralte h		101.6mm	101.6mm	76.2mm
Ancho b		39.624mm	39.624mm	43.0784mm
Espesor de alma tw		4.572mm	4.572mm	8.255mm
Espesor de ala tf		7.5184mm	7.5184mm	8.7122mm
Factor de seguridad mínimo1	> 1.670000	1.877761	1.877761	1.681541
Tensión1	Maximizar	183.9 N/mm ²	183.9 N/mm ²	250.93 N/mm ²

Figura 68. Resultados de optimización 1 del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.

Se optó por cambiar los valores máximos y mínimos de las variables para buscar un perfil óptimo que se acerque un poco más a un comercial. El programa calculó 360 escenarios y los resultados fueron los que se muestran en la figura 68.

		Actual	Inicial	Óptimo (279)
Peralte h		76.2mm	101.6mm	101.6mm
Ancho b		37.1856mm	39.624mm	37.1856mm
Espesor de alma tw		8.128mm	4.572mm	4.318mm
Espesor de ala tf		7.5184mm	7.5184mm	7.5184mm
Factor de seguridad mínimo1	> 1.670000	1.370782	1.877761	1.731877
Tensión1	Maximizar	241.58 N/mm ²	183.9 N/mm ²	206.81 N/mm ²

Figura 69. Resultados de optimización 2 del modelo del marco en el estudio de diseño en SolidWorks.

En este resultado el perfil óptimo es muy cercano al que hemos calculado manualmente con los criterios de fluencia ASD y simulado como iteración inicial. Las dos variaciones son, una reducción en el ancho del alma de aproximadamente 3 mm y una reducción del espesor de 0.254 mm lo que, por un lado, no hay un perfil con ese ancho y la reducción de espesor es prácticamente despreciable.

4.4. Dimensionamiento de componentes eléctricos

4.4.1. Esquemas para secado con convección natural y radiación

Como se evaluó en la sección 2, el secado por radiación más la convección natural requiere de un mínimo de 5179.47 W, lo cual se puede separar en 2 grupos de 3 KW conectados a una red trifásica. Se plantea 3 resistencias de 1 KW en estrella para cada grupo; de manera que se alcanza un total de 6 KW.

Se realizaron los esquemas eléctricos para el secado con convección natural y forzada. En la figura 70 se muestra el circuito de potencia del secador por radiación con dos grupos de resistencias en conexión delta.

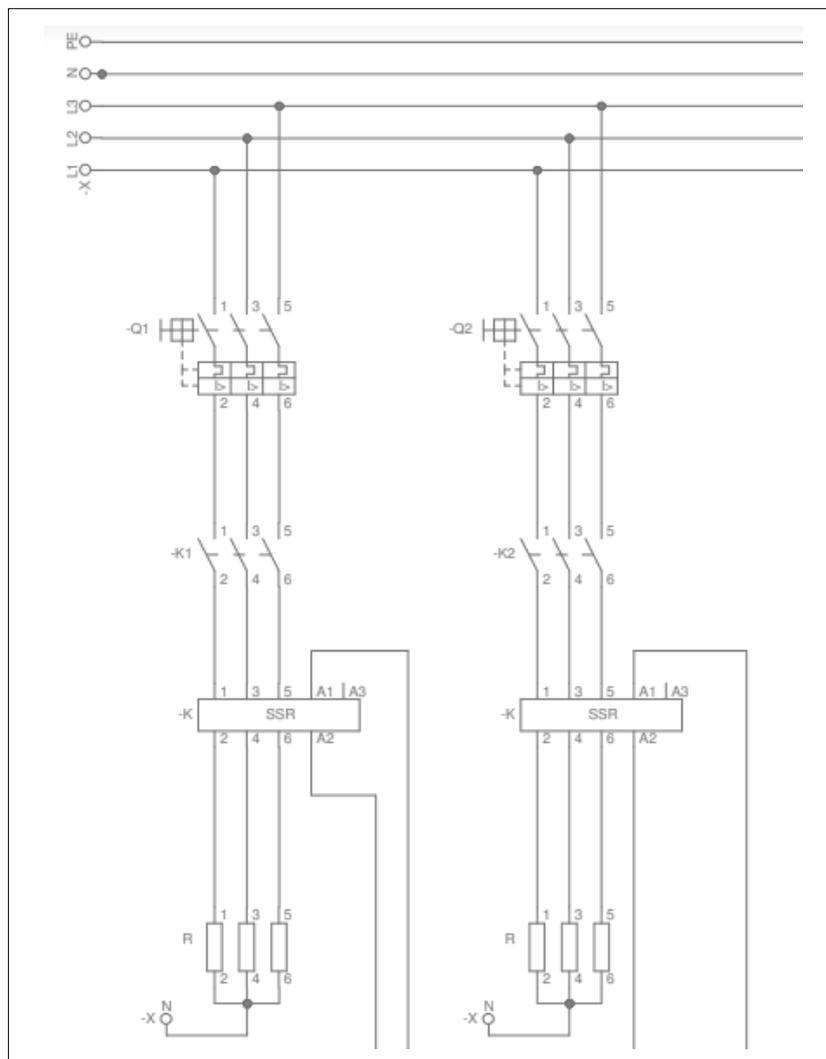


Figura 70. Circuito de potencia para secado por radiación y convección natural.

En el circuito de potencia se muestran también los disyuntores termo-magnéticos, los contactores y los relés de estado sólido normalmente cerrados. En la figura 71

se muestra el circuito de mando para secado por radiación y convección natural. Según la temperatura ingresada en el controlador, el sistema se desconectará y se habilitará en un valor inferior al programado, ya que el controlador es de señal digital y no analógica. Por este motivo cada controlador tiene un error de precisión, debido a que trabajan en un rango para dejar enfriar la cámara de secado.

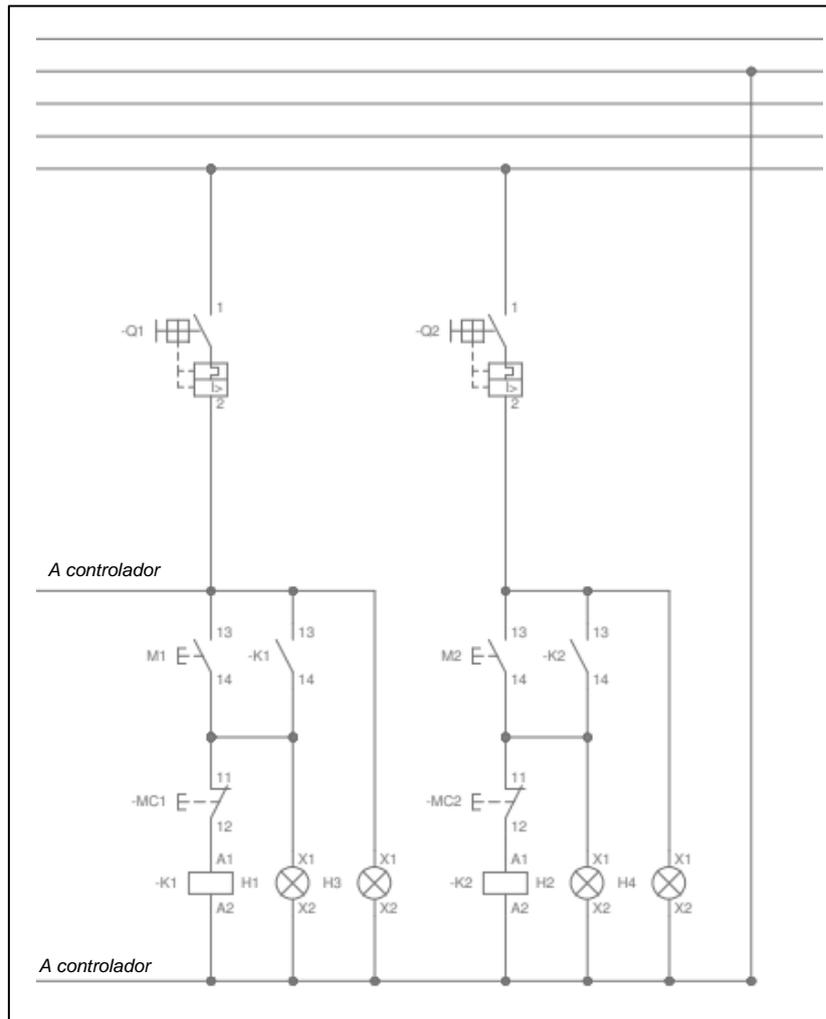


Figura 71. Circuito de mando para secado por radiación y convección natural.

El control de la temperatura de secado para esta disposición es sencillo por el hecho que tiene menor cantidad de componentes. Como se puede observar en la figura 71, el encendido inicia con el cierre de los disyuntores, y se puede conocer el estatus mediante los testigos H3 y H4 de color ámbar. Luego se da cierre de circuito por un pulsador mecánico M1 y M2 la cual alimenta las bobinas $-K1$ y $-K2$ con su respectivo enclavamiento para que las resistencias permanezcan en funcionamiento. Por ende, los contactores $-K1$ y $-K2$ de la figura 70 cierran circuito

permitiendo alimentar las resistencias; lo cual es posible debido a que el relé de estado sólido trifásico es normalmente cerrado. En la figura 72 se muestra el controlador de temperatura conectado al circuito de fuerza.

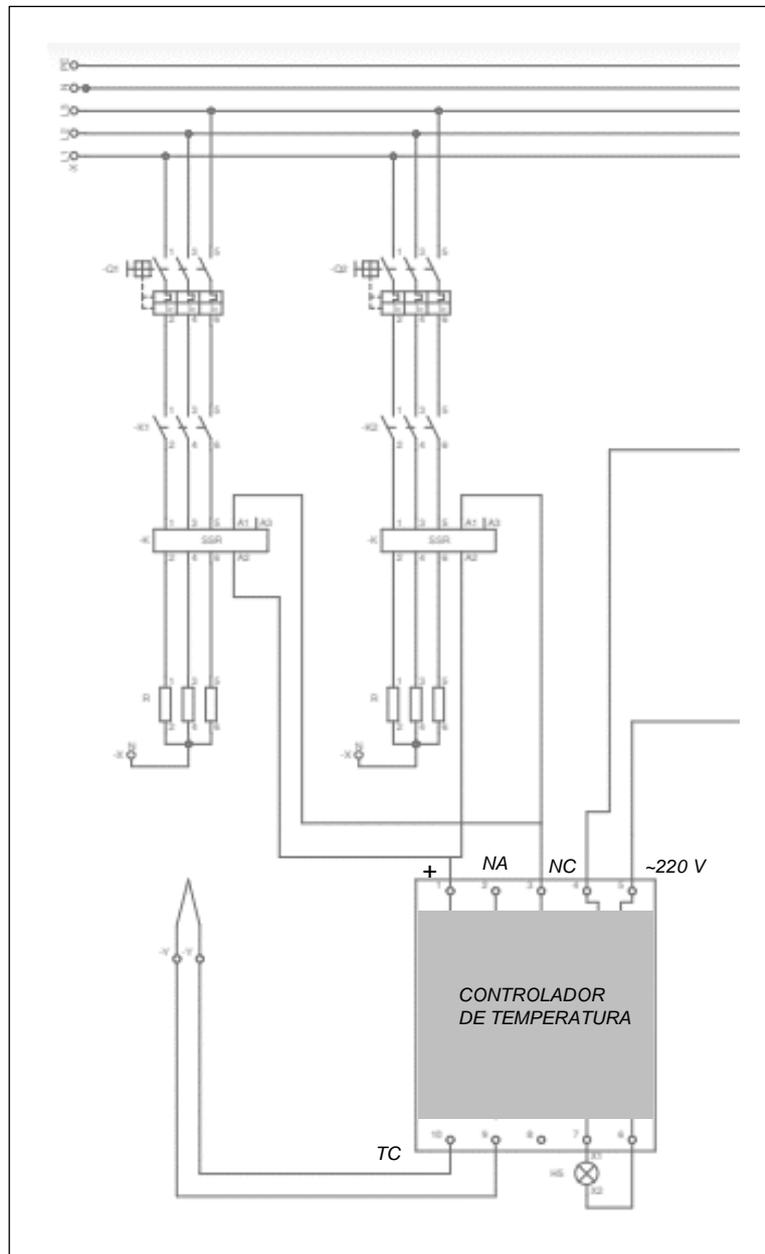


Figura 72. Conexión de controlador de temperatura para secado por radiación y convección natural.

La conexión del controlador varía según fabricante y según la complejidad del sistema al cual se instalará. Sin embargo, para este tipo de aplicación los controladores se conectan usualmente como se muestra en la figura 72. Alimentación monofásica 220V por los bornes 4 y 5. Luego se tienen los bornes que están en un rango de entre 5 a 30V para conectar el control del relé de estado

sólido ya sea en los puntos 1 y 3 para normalmente cerrado como es el caso en la figura 72 o conectado a los bornes 1 y 2 para normalmente abierto. Finalmente, se tiene los bornes 9 y 10 de conexión del termopar y para conectar un testigo.

En la figura 73 se muestra el estado del circuito eléctrico cuando se tiene una lectura de temperatura por debajo del valor programado. El esquema se dibujó en el software CAdESIMU.

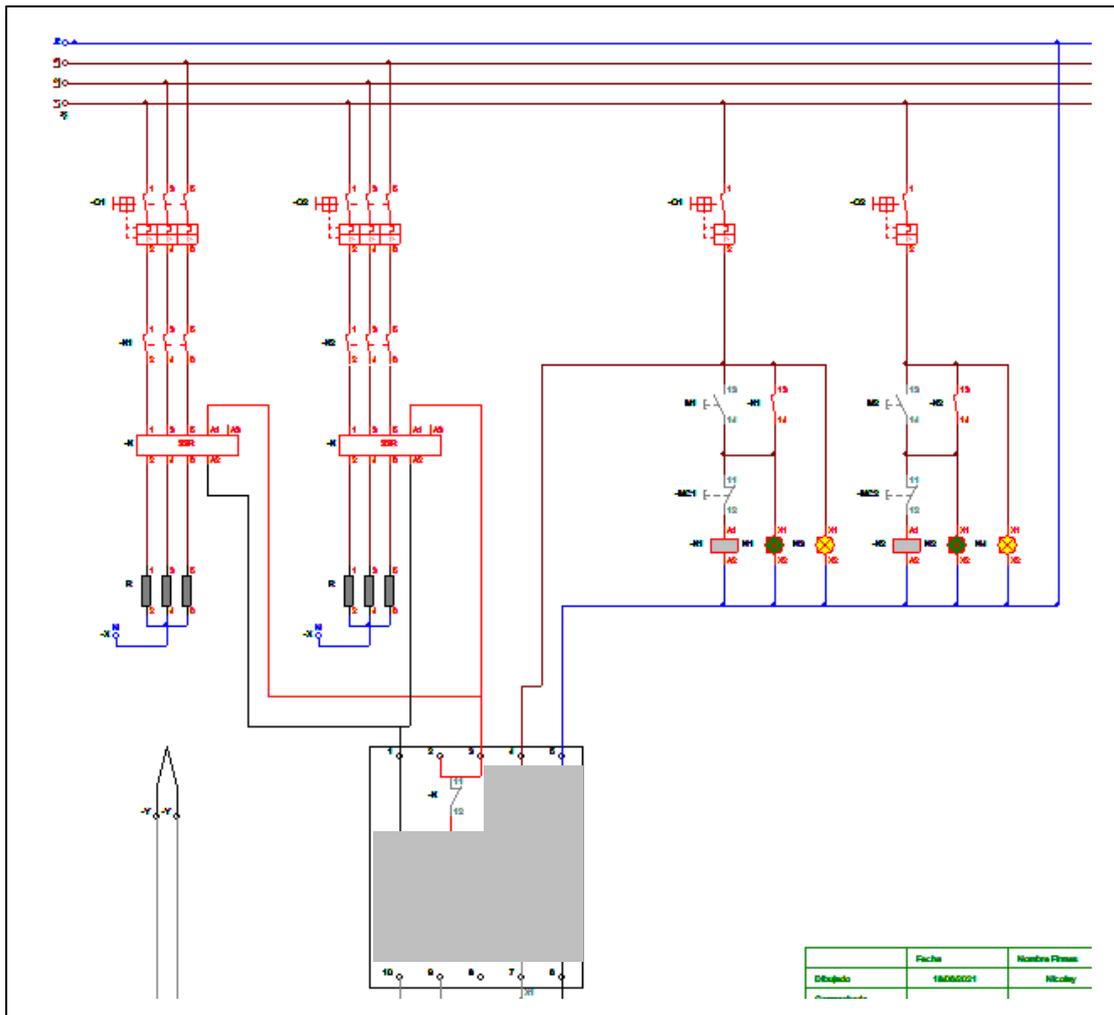


Figura 73. Estado del circuito en funcionamiento para una lectura de temperatura por debajo del valor programado para secado por radiación y convección natural.

Como se puede observar los testigos de arranque están encendidos en todo momento para indicar que el equipo está alimentado y el testigo verde es para indicar que las resistencias se están alimentando. Cuando se alcanza la temperatura programada, el controlador abre contacto $-K$ de manera que el RSS desconecta las resistencias.

4.4.2. Parámetros eléctricos del circuito de potencia - caso convección natural

- Potencia total del horno requerida, P_{horno}

$$P_{horno} = 5179.47 \text{ W} \approx 6000 \text{ W}$$

- Potencia por grupo de resistencias, P_{GR}

$$P_{GR} = \frac{P_{horno}}{2} = \frac{6000}{2} = 3000 \text{ W}$$

- Corriente que circula por fase, I_{fase}

$$I_{fase} = \frac{P_{GR}}{\sqrt{3}V} = \frac{3000}{\sqrt{3} * 380} = 4.56 \text{ A}$$

- Corriente de línea,

$$I_{línea} = I_{fase} = 4.56 \text{ A}$$

- Potencia de fase, P_{fase}

$$P_{fase} = \frac{UI_{fase}}{\sqrt{3}} = \frac{380 * 4.56}{\sqrt{3}} = 1000 \text{ W}$$

- Resistencia requerida, R_{req}

$$R_{req} = \frac{P_{fase}}{I_{línea}^2} = \frac{1000}{4.56^2} = 48.09 \text{ Ohm}$$

- Resistividad a 20°C del conductor de cobre de tabla 2.3 del libro de fundamentos de instalaciones eléctricas, (Barrero González, González Romera, Milanés Montero, & Romero Cadaval, 2012).

$$\hat{\rho}_{cobre,20^\circ C} = 0.0178 * 10^{-6} \text{ } \Omega m$$

- Resistividad para una temperatura máxima de 90°C en operación del conductor, considerando el coeficiente de resistividad temperatura del cobre igual $0.00392 \text{ } ^\circ C^{-1}$ obtenido de la tabla 2.3 (Barrero González, González Romera, Milanés Montero, & Romero Cadaval, 2012).

$$\hat{\rho}_{cobre,90^\circ C} = \hat{\rho}_{cobre,20^\circ C} [1 + \alpha(T_{operación} - T_{ambiente})]$$

$$\hat{\rho}_{cobre,90^{\circ}C} = 0.0178 * 10^{-6} [1 + 0.00392(90 - 20)] = 2.268 * 10^{-8} \Omega m$$

- La sección del conductor por caída de tensión para un porcentaje de caída de tensión mínima de 2.5% según la sección 050-102 del código nacional de electrificación, asimismo se considera una longitud máxima del conductor de 3 metros, la sección S_u , es:

$$S_u = \frac{2\rho l P}{\Delta U U} = \frac{2 * 2.268 * 10^{-8} * 3 * 1016.23}{(0.025 * 380) * 380} * 1000^2 = 0.0383 \text{ mm}^2$$

- Sección del conductor por corriente nominal, I_B

$$I_n = I_{fase} = 4.56 \text{ A}$$

Se considera un conductor THW-90 450/750 V de sección 4 mm² con amperaje máximo de 34 A.

$$I'_B = 34 \text{ A}$$

Factor de temperatura para una temperatura ambiente máxima de 40 °C y aislamiento de PVC. De tabla 10 en NTP 370-301.

$$F_t = 0.87$$

El factor de agrupamiento para 3 cables de tabla 14 en NTP 370-301, es:

$$F_a = 0.82$$

Entonces la corriente del conductor, es:

$$I_B = 31 * 0.87 * 0.82 = 24.26 \text{ A}$$

Según la sección 030-002 del código nacional de electrificación, indica que la sección mínima de un conductor para circuitos de fuerza, es de 2.5 mm².

- Protección magneto-térmico

$$4.56 \text{ A} \leq I_{mt} \leq 24.26 \text{ A}$$

Se puede considerar un calibre normalizado de 20 A para el magneto-térmico

$$I_{mt} = 20 \text{ A}$$

- Resistencia del conductor de alimentación

$$R = \hat{\rho}_{cobre,90^{\circ}C} \frac{l}{S} = 2.268 * 10^{-8} * \frac{3 * 1000^2}{4} = 0.017 \Omega$$

- La corriente para seleccionar protección frente a cortocircuito, considerando el coeficiente c para la tensión de pre-fallo en el punto de fallo, según UNE-EN 60.909:2002, para tensión menor de 1KV.

$$I_{cc \text{ máx}} = \frac{cU}{\sqrt{3}R} = \frac{1.10 * 380}{\sqrt{3} * 0.017} = 14196.02 \text{ A}$$

El poder de corte del magneto-térmico de calibre normalizado 20 A de 3 polos para 380 V tiene un poder de corte de 25 KA, por lo tanto, se cumple la siguiente condición.

$$PdC = 25 \text{ KA} > I_{cc \text{ máx}} = 14.20 \text{ KA}$$

4.4.3. Esquemas para secado por convección forzada

Se planteó también los esquemas eléctricos para el secado por convección forzada, en este caso se agregaron, el ventilador y el variador de frecuencia. La optimización del sistema eléctrico de potencia y de control se realizó considerando los siguientes requerimientos. En la figura 74 se muestra el diagrama de flujo de lo descrito.

- El sistema no debe funcionar con la puerta del horno abierta
- El circuito de ventilación debe arrancar primero en baja velocidad
- El temporizador debe desactivar tanto la ventilación como las resistencias.
- Al activar las resistencias calefactoras se debe elevar la velocidad del motor.
- Cuando se alcanza la temperatura programada se deben desconectar de manera automática las resistencias y aumentar la velocidad del ventilador para que suceda lo mismo con el coeficiente de transferencia de calor por convección y el tiempo de duración del pulso sea menor.
- Mientras no se cumpla el tiempo, se debe dar un bucle de autorregulación.

El circuito de control se realizó con este diagrama de flujo, con esto al momento del planteamiento del esquema eléctrico se hace menos iterativo. En la figura 75 se muestra el circuito de control para esta disposición de secado.

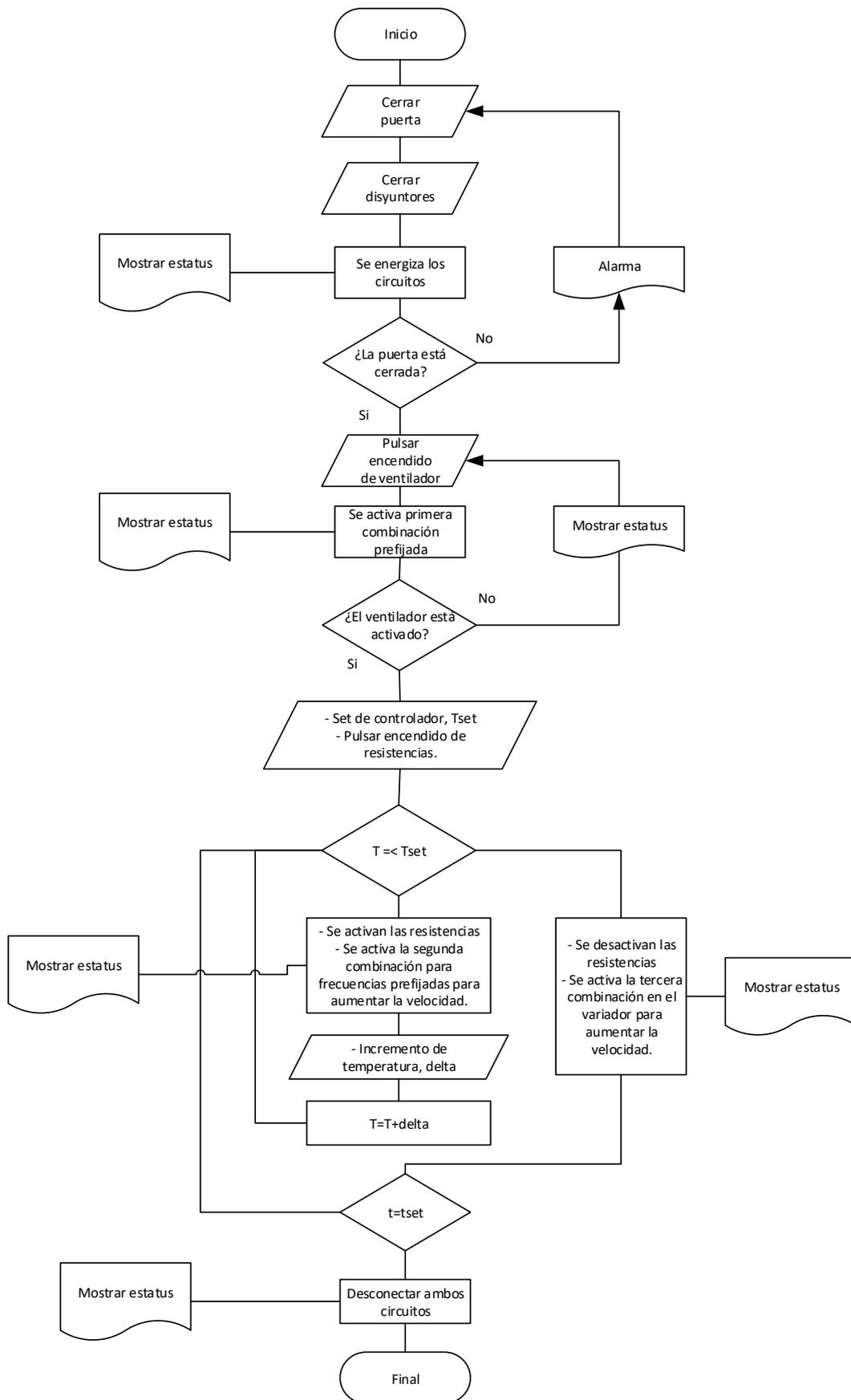


Figura 74. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de control (parte 1).

El esquema de control se puede dividir de igual manera como para el circuito de potencia, esto es, control de circuito de ventilación y resistivo. El circuito de control resistivo varía solo en el contacto de seguridad KA1 que debe activar la velocidad de secado (combinación 2 del control del variador por frecuencias fijas). Al energizar el circuito de ventilación mediante el disyuntor -Q1 se energiza el variador de velocidad y al pulsar M1 se enciende el ventilador en una frecuencia baja. En la figura 76 se muestra el esquema del variador de velocidad. Al cerrar el circuito se energiza el control de las resistencias y como se cerró contacto por KA1, entonces se puede pulsar M4 y M5 para activar las resistencias. Las resistencias se activan inmediatamente debido a que el relé de estado sólido es normalmente cerrado; esto hace que se activa la segunda combinación de frecuencias fijas en el variador, lo cual lleva a la velocidad de rotación de secado para generar $2.7 \frac{m^3}{s}$ según la curva del ventilador.

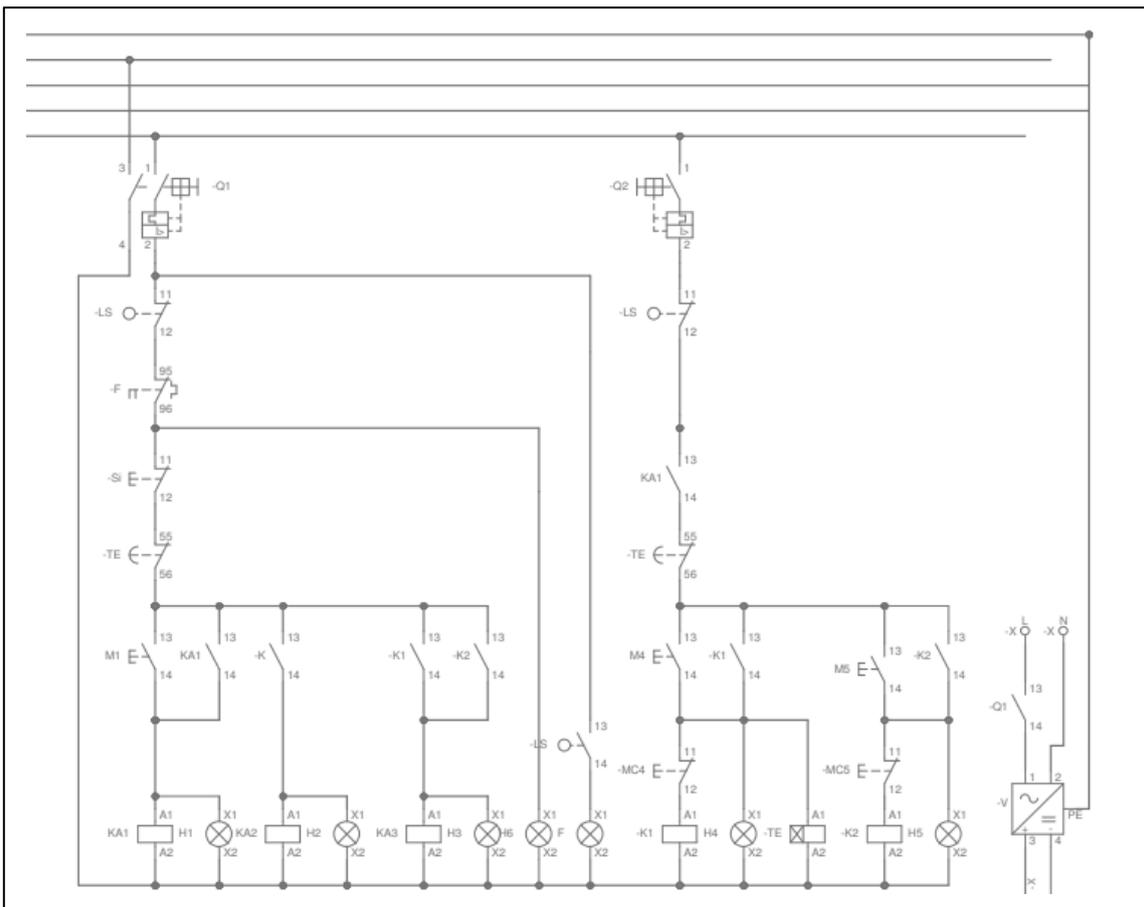


Figura 75. Circuito de mando para secado por convección forzada.

Cuando el termopar registra la variación de tensión por efecto de la temperatura, el controlador dispara dependiendo del valor seteado, de esta manera se abre contacto en los relés SRR de las resistencias.

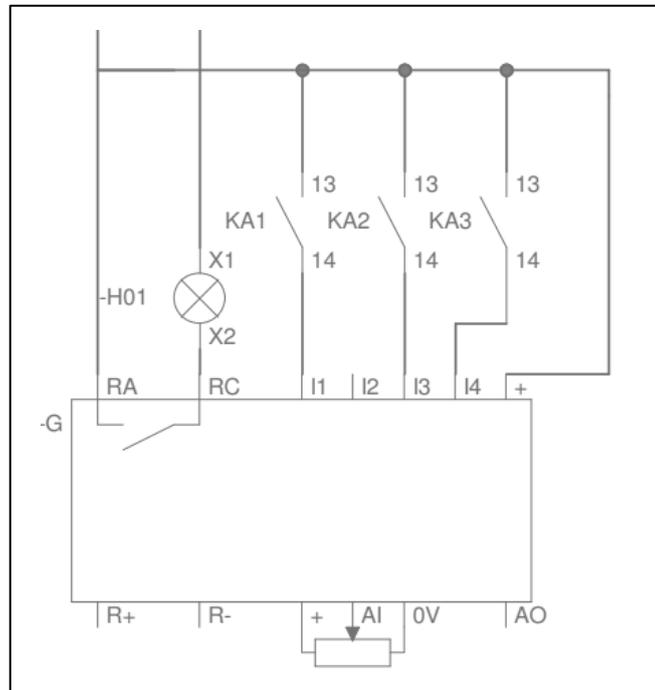


Figura 76. Conexión de variador de frecuencia con configuración por frecuencias fijas, con 3 combinaciones.

En la figura 78 se muestra el diagrama de fuerza con los elementos de seguridad correspondientes. Se observa que se agregó el circuito de ventilación con arranque directo asistido por el variador de frecuencia y al igual que para las resistencias se considera un disyuntor termo-magnético trifásico –Q1. Asimismo, se considera un guardamotor indicado por –F. El circuito resistivo es el mismo que en el caso anterior, con las resistencias en delta comandado por el controlador de temperatura y el relé de estado sólido.

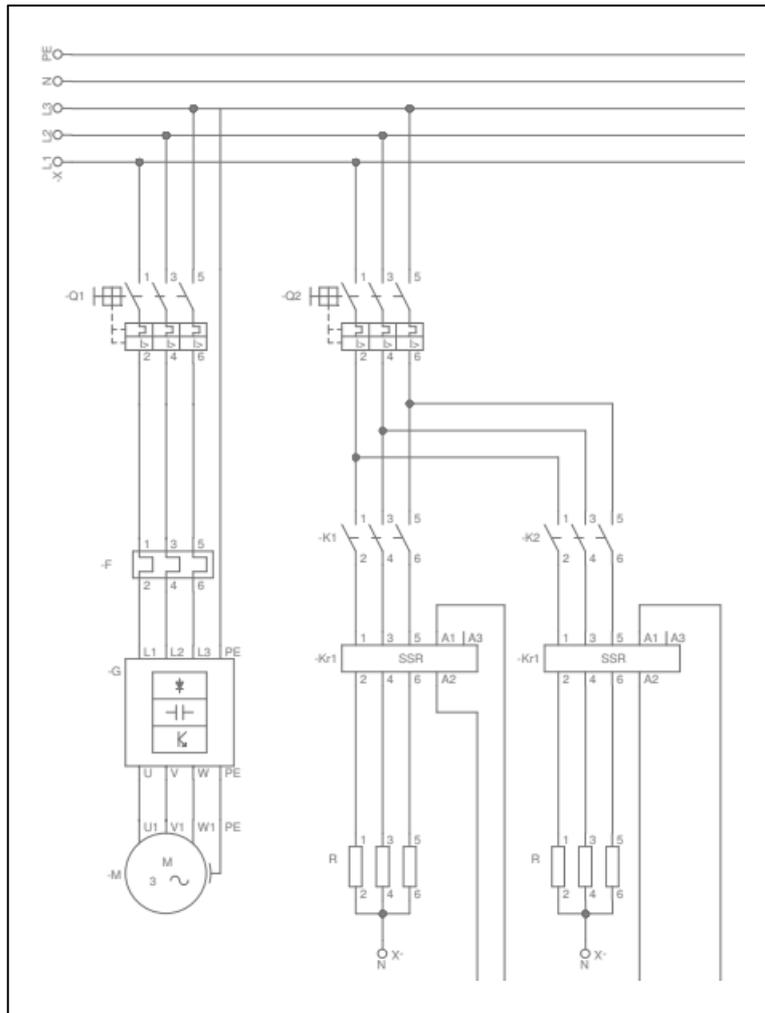


Figura 77. Circuito de potencia para secado por convección forzada.

El estado del sistema eléctrico de potencia y control cuando se pone en primera velocidad el motor, se observan en la captura de la simulación en la figura 79. En la figura 80 se muestra que al desconectar las resistencias el controlador de temperatura mediante su salida de alarma a 220V energiza la bobina KA2 dando como resultado la tercera combinación, esto programado en el variador para una frecuencia mayor, de modo que la regulación de temperatura sea más eficaz.

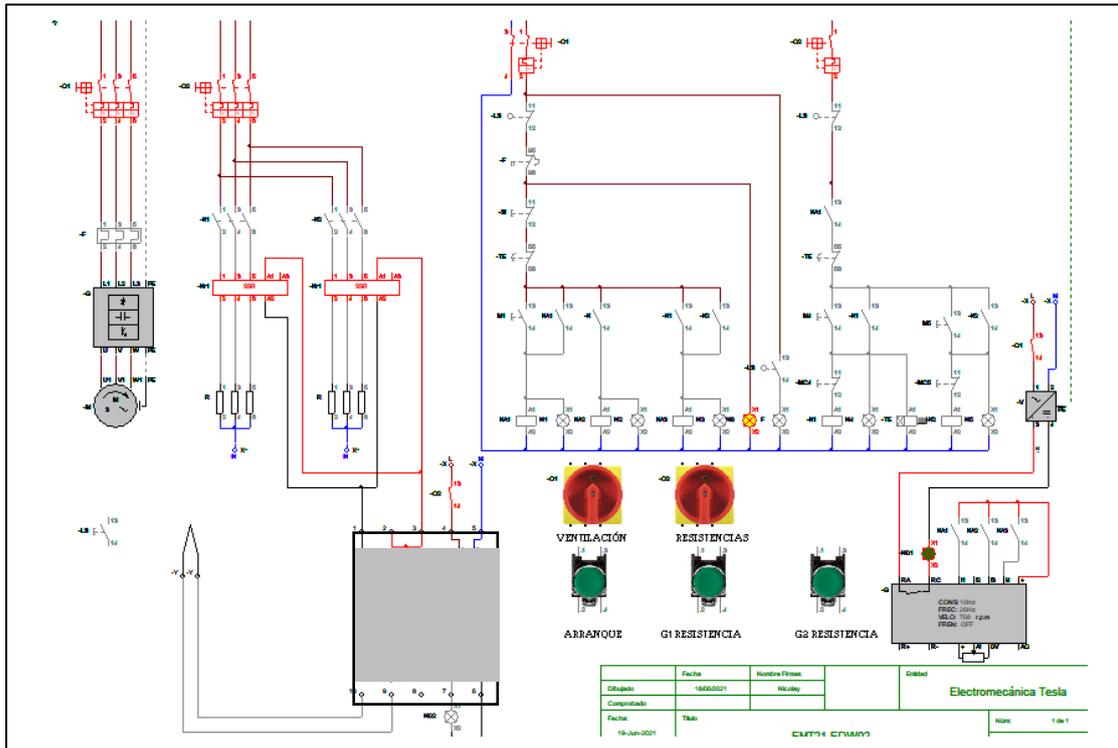


Figura 78. Captura de la simulación con el variador en combinación 1.

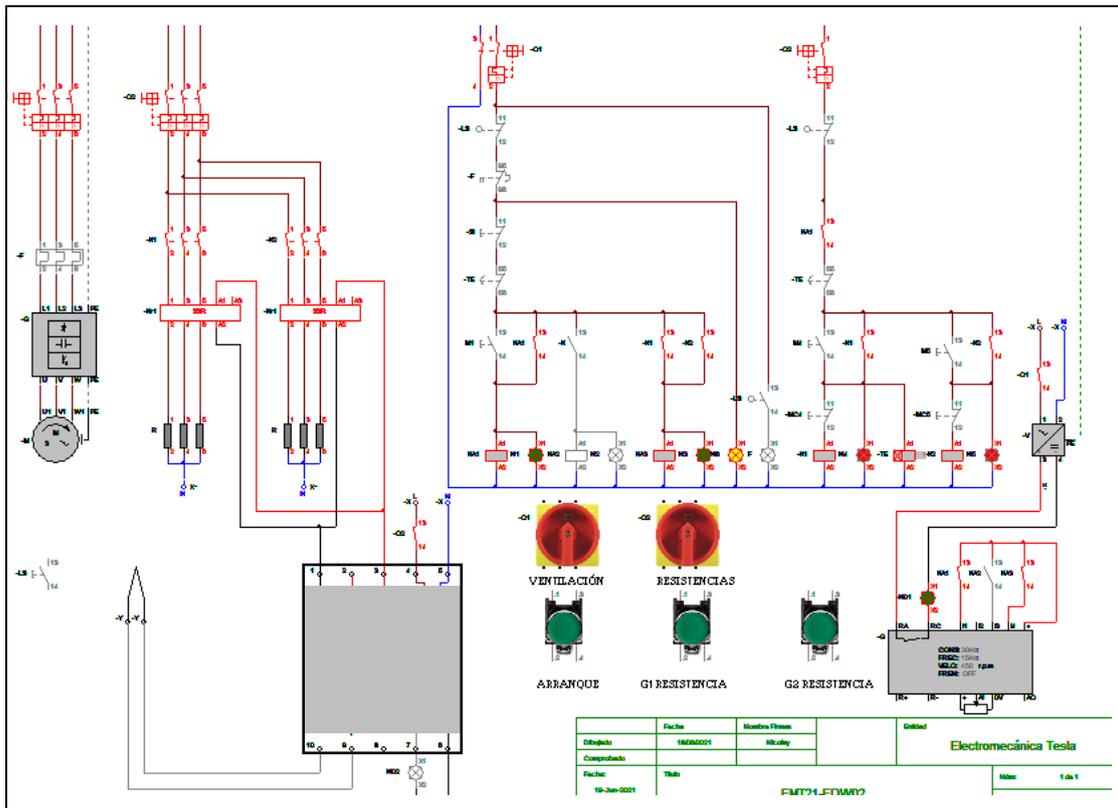


Figura 79. Captura de la simulación con el variador en combinación 2.

Finalmente, el temporizador llega al tiempo programado y abre contacto desconectando ambos circuitos.

4.4.4. Parámetros eléctricos del circuito de potencia - caso convección forzada

Se realizó el cálculo de los parámetros eléctricos del circuito de potencia del sistema de ventilación.

- Potencia de ventilación requerida para un ventilador de $8153 \text{ m}^3/\text{h}$ ($2.26 \text{ m}^3/\text{s}$), se tiene:

$$P_{\text{ventilador}} = 1.5 \text{ hp} * \frac{746 \text{ W}}{1 \text{ hp}} \approx 1119 \text{ W}$$

- Corriente que circula por fase, I_{fase}

$$I_{\text{fase}} = \frac{P_{\text{ventilador}}}{\sqrt{3}V\cos\phi} = \frac{1119}{\sqrt{3} * 380 * 0.84} = 2.02 \text{ A}$$

- Corriente de línea,

$$I_{\text{línea}} = I_{\text{fase}} = 2.02 \text{ A}$$

- La sección del conductor por caída de tensión para un porcentaje de caída de tensión mínima de 2.5% según la sección 050-102 del código nacional de electrificación, asimismo se considera una longitud máxima del conductor de 3 metros, la sección S_u , es:

$$S_u = \frac{2\rho lP}{\Delta U U} = \frac{2 * 2.268 * 10^{-8} * 3 * 1119}{(0.025 * 380) * 380} * 1000^2 = 0.042 \text{ mm}^2$$

- Sección del conductor por corriente nominal, I_B

$$I_n = I_{\text{fase}} = 2.02 \text{ A}$$

Se considera un conductor THW-90 450/750 V de sección 2.5 mm^2 con amperaje máximo de 27 A.

$$I'_B = 27 \text{ A}$$

Factor de temperatura y agrupamiento para una temperatura ambiente máxima de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ y aislamiento de PVC. De tabla 10 y 14 en NTP 370-301.

$$F_t = 0.87$$

$$F_a = 0.82$$

Entonces la corriente del conductor, es:

$$I_B = 27 * 0.87 * 0.82 = 19.26 \text{ A}$$

La sección seleccionada también se encuentra por encima del valor mínimo indicado en la norma.

- Protección magneto-térmico

$$2.02 A \leq I_{mt} \leq 19.26 A$$

Se puede considerar un calibre normalizado de 16 A para el magneto-térmico

$$I_{mt} = 16 A$$

- Resistencia del conductor de alimentación

$$R = \hat{\rho}_{cobre,90^{\circ}C} \frac{l}{S} = 2.268 * 10^{-8} * \frac{3 * 1000^2}{2.5} = 0.027 \Omega$$

- La corriente para seleccionar protección frente a cortocircuito, considerando el coeficiente c para la tensión de pre-fallo en el punto de fallo, según UNE-EN 60.909:2002, para tensión menor de 1KV.

$$I_{cc \text{ máx}} = \frac{cU}{\sqrt{3}R} = \frac{1.10 * 380}{\sqrt{3} * 0.027} = 8938.24 A$$

El poder de corte del magneto-térmico de calibre normalizado 16 A en 380 V tiene un poder de corte de 10 KA, por lo tanto, se cumple la siguiente condición.

$$PdC = 10 KA > I_{cc \text{ máx}} = 8.94 KA$$

Se recalcularon los parámetros eléctricos del circuito de potencia del sistema resistivo, debido que en convección forzada la potencia consumida por la carga es mayor.

- Potencia total del horno requerida, P_{horno}

$$P_{horno} = 8764.1 W \approx 9000 W$$

- Potencia por grupo de resistencias, P_{GR1}

$$P_{GR} = \frac{P_{horno}}{2} = \frac{9000}{2} = 4500 W$$

- Corriente que circula por fase, I_{fase}

$$I_{fase} = \frac{P_{GR}}{\sqrt{3}V} = \frac{4500}{\sqrt{3} * 380} = 6.84 A$$

- Corriente de línea, $I_{línea}$

$$I_{línea} = I_{fase} = 6.84 A$$

- Potencia de fase, P_{fase}

$$P_{fase} = \frac{UI_{fase}}{\sqrt{3}} = \frac{380 * 6.84}{\sqrt{3}} = 1500 W$$

- Resistencia requerida, R_{req}

$$R_{req} = \frac{P_{fase}}{I_{línea}^2} = \frac{1500}{6.84^2} = 32.06 Ohm$$

- La sección del conductor por caída de tensión para un porcentaje de caída de tensión mínima de 2.5% según la sección 050-102 del código nacional de electrificación, asimismo se considera una longitud máxima del conductor de 3 metros, la sección S_u , es:

$$S_u = \frac{2\rho lP}{\Delta U U} = \frac{2 * 2.268 * 10^{-8} * 3 * 1500}{(0.025 * 380) * 380} * 1000^2 = 0.056 mm^2$$

- Sección del conductor por corriente nominal, I_B

$$I_n = 6.84 A$$

Se considera un conductor THW-90 450/750 V de sección 4 mm² con amperaje máximo de 34 A. Esta sección tanto para

$$I'_B = 34 A$$

$$I_B = 34 * 0.87 * 0.82 = 24.26 A$$

- Selección de magneto-térmico

$$6.84 A \leq I_{mt} \leq 24.26 A$$

Se puede considerar un calibre normalizado de 20 A para el magneto-térmico

$$I_{mt} = 20 A$$

- Resistencia del conductor de alimentación

$$R = \hat{\rho}_{cobre,90^{\circ}C} \frac{l}{S} = 2.268 * 10^{-8} * \frac{3 * 1000^2}{4} = 0.017 \Omega$$

- La corriente para seleccionar protección frente a cortocircuito, considerando el coeficiente c para la tensión de pre-fallo en el punto de fallo, según UNE-EN 60.909:2002, para tensión menor de 1KV.

$$I_{cc \text{ máx}} = \frac{cU}{\sqrt{3}R} = \frac{1.10 * 380}{\sqrt{3} * 0.017} = 14196.02 \text{ A}$$

El poder de corte del magneto-térmico de 20 A, 3P, en 380 V es 25 KA.

$$PdC = 25 \text{ KA} > I_{cc \text{ máx}} = 14.20 \text{ KA}$$

- Sensibilidad nominal para el diferencial considerando valores típicos de capacidad fase-neutro para líneas eléctricas de la tabla 2.4 de fundamentos de instalaciones eléctricas. (Barrero González, González Romera, Milanés Montero, & Romero Cadaval, 2012)

$$I_C = \frac{V_{fase-tierra}}{Z_c} = 220 * 2\pi * 60 * 350 * 10^{-9} = 0.029 \text{ A}$$

Se opta por el diferencial de 100 mA, con lo cual se determina el valor máximo de la resistencia de la puesta a tierra. Considerando 24 V como tensión de contacto mínimo.

$$R_A \leq \frac{24}{0.1} = 240 \Omega$$

Según el código nacional de electricidad, en la sección 036.B, para los sistemas puestos a tierra con un solo electrodo, la resistencia a tierra no debe exceder 25 Ω .

4.5. Planos de fabricación de secador optimizado

Los planos de fabricación se realizaron en SolidWorks, para lo cual se consideran las medidas y materiales calculados en la sección 4.3, donde se determinó que la estructura principal modelado como dos marcos, deben ser de canal U4x5.4 A992. Para los otros elementos se realizó una simulación general en SolidWorks Simulation. En la figura 79 se muestra la estructura principal del horno secador con las dimensiones que se calcularon desde el objetivo 2.



Figura 80. Estructura principal de horno secador optimizado.

En la figura 80 se muestra el esfuerzo normal por flexión de la estructura.

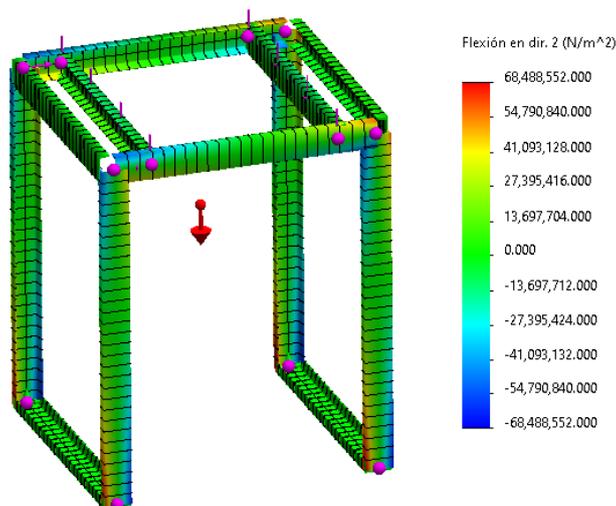


Figura 81. Esfuerzo normal en la estructura.

En la figura 81 se muestra la estructura interior, con ángulo de 2x2x1/8". La estructura pesa en total 123 Kg.

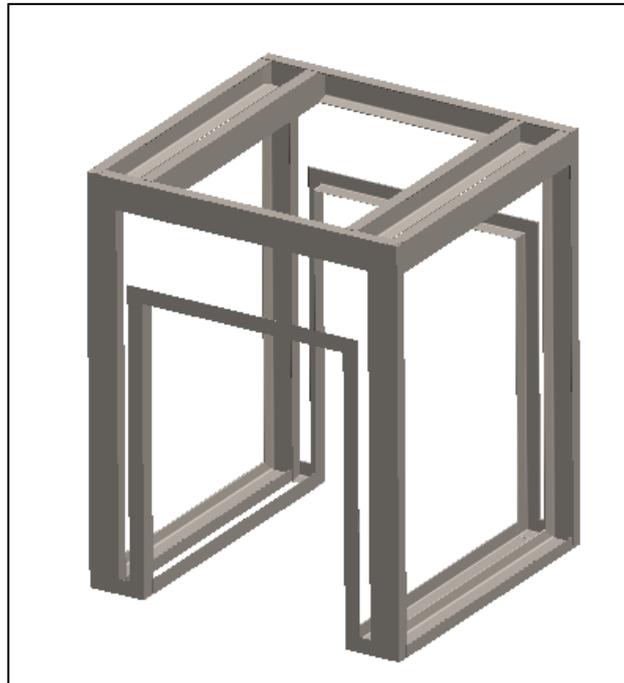


Figura 82. Estructura interior y exterior del horno secador.

Como se puede observar en la figura 81, la estructura interior de ángulo de 2x2x1/8" no estará expuesta directamente a las cargas ya que la estructura principal de canal es el que responde a las combinaciones de cargas. En la figura 82 se simuló y se pudo corroborar lo inferido.

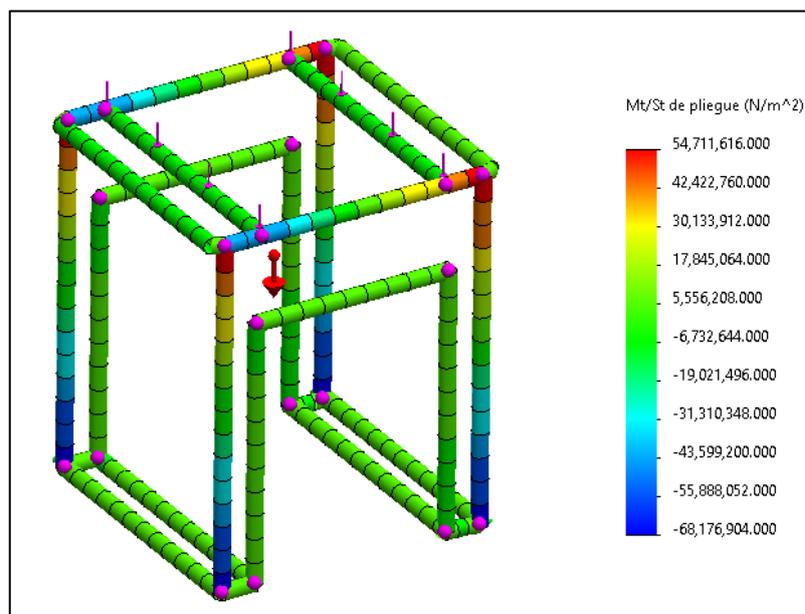


Figura 83. Simulación de estructura interior y exterior del horno secador.

En la figura 82 se muestra la cobertura interior de 1.6 mm la cual da forma al ducto de aire forzado y a su vez cubre el aislamiento por la parte interior. Peso parcial de 200 Kg hasta donde se observa en la figura 82.

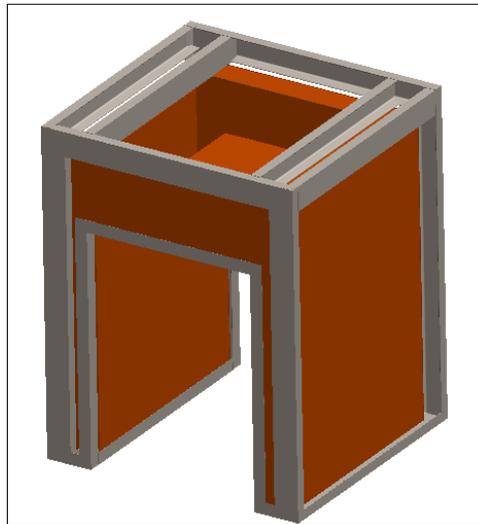


Figura 84. Estructura interior y exterior del horno secador.

El plano de fabricación de la estructura y de la cobertura se muestra en la figura 82, donde se indican la cantidad de soldadura y el tipo de soldadura según norma ISO para soldadura.

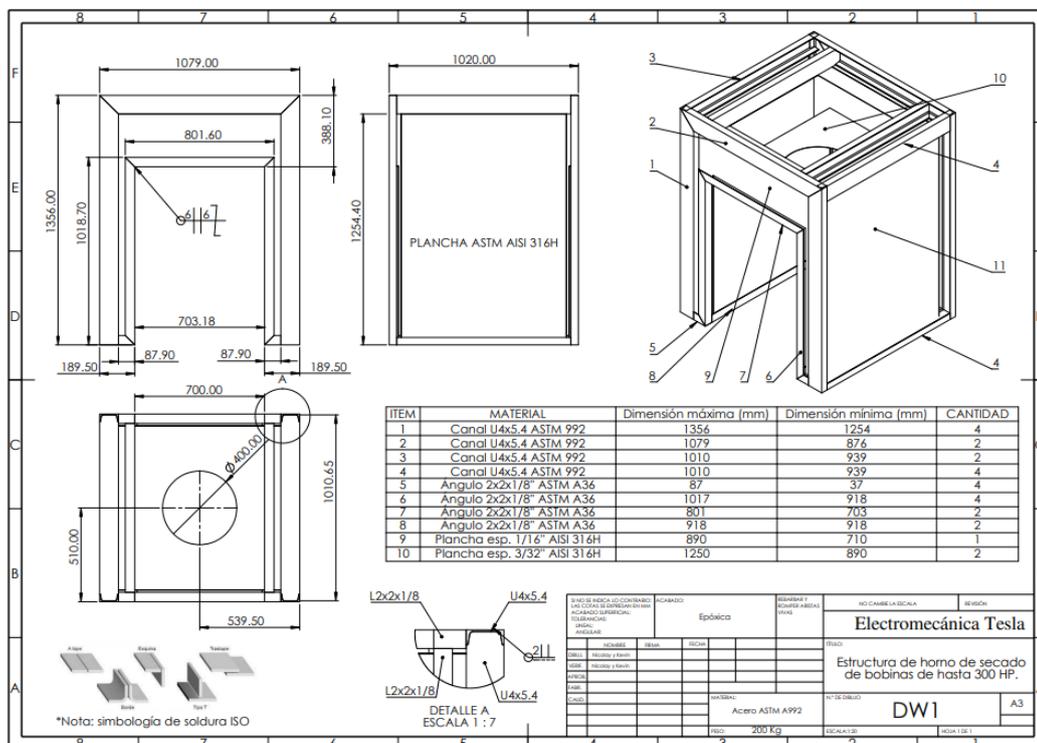


Figura 85. Plano de fabricación de la estructura del horno secador.

El material de la plancha se debe optar por un material resistente a la corrosión y a altas temperatura, como es el acero AISI 316H, el cual es un acero inoxidable con alto contenido de carbono lo que lo hace que su resistencia a la fluencia a altas temperaturas no se vea afectado como en el caso del acero 316 o de la serie 304.

4.6. Prueba de resistencia de aislamiento

La prueba de aislamiento, se realizó de manera puntual, para índice de polarización e índice de absorción dieléctrica; todo ello se realizó de acuerdo a lo descrito en la norma IEEE 43-2010. Se llevaron a cabo pruebas antes del mantenimiento, luego secado en horno sin circulación forzada de aire y finalmente secado en horno con aire forzado.

Los parámetros que debe cumplir el aislamiento de la bobina del motor, son los que se muestran en la tabla 14.

Tabla 16.
Valores mínimos aceptables de resistencia de aislamiento.
Fuente: IEEE 43-2000.

Motor Nameplate Voltage Rating	Minimum Acceptable Resistance
0-208	100,000Ω
208-240	200,000Ω
240-600	300,000Ω
600-1000	1MΩ
1000-2400	2MΩ
2400-5000	3MΩ

El índice de polarización se calculó con dos mediciones, una a 60 segundos y la otra a 10 minutos. En la tabla 15 se muestran los valores mínimos.

$$IP = \frac{\text{Medición en 10 minutos}}{\text{Medición en 1 minuto}}$$

Tabla 17.
Índice de polarización.
Fuente: IEEE 43-2000.

VALORES MÍNIMOS ACEPTABLES DEL INDICE DE POLARIZACION	
Aislamiento	Valor del índice
Clase A	1,5
Clase B	2,0
Clase F	2,0
Clase H	2,0

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas.

4.6.1. Medición previa al mantenimiento de un motor de 4 Hp

La medición puntual nos permite tener una referencia del estado del aislamiento del motor, sin embargo, el índice de polarización, permite determinar si es necesario el mantenimiento.

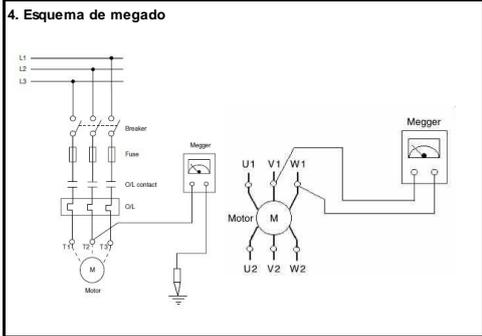
 UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO		Mantenimiento ELECTROMECÁNICA TESLA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO MOTORES	Código: UCV21-MTO-01 Versión: rev.01 Fecha: 5/05/2021		
1. Datos del motor					
Código de motor	Potencia (hp)	Voltaje nominal motor (V)	Clase		
Motor SEW-4-01	4	380	F		
2. Mediciones					
Medición	Voltaje de prueba (V)	Medición puntual (MΩ)	Mediación 30 s (MΩ)	Mediación 60 s (MΩ)	Medición 10 min (MΩ)
R-G	1000	560	720	830	980
S-G	1000	976	1320	1850	1000
T-G	1000	2600	2750	2890	2200
3. Índices y conclusiones		4. Esquema de megado			
Índice de polarización calculado	Conclusión IP				
1.18	Cuestionable				
0.54	Peligroso				
0.76	Peligroso				
Índice de absorción dieléctrica	Conclusión DAR				
1.15	Pobre				
1.40	Buena				
1.05	Pobre				
5. Registro fotográfico					
					
Inspector	Supervisor	Aprobado	Sup. Cliente	Conformidad	

Figura 86. Medición resistencia de aislamiento fase-tierra antes de mantenimiento.

Se observa que la medición puntual no supera los valores mínimos requeridos, sin embargo, los índices de polarización y absorción, son cuestionables y peligrosos.

4.6.2. Secado de un motor de 4 Hp en horno sin aire forzado

Se realizó el mantenimiento del motor para mejorar los valores de los índices de aislamiento. El secado se realizó a 115 °C durante 1 hora. En la figura 87 se muestra el controlador de temperatura a 60 °C indicando el valor mientras va ascendiendo la temperatura en el interior de la cámara de secado. Se registró un aproximadamente impulso de 15 °C.



Figura 87. Temperatura de secado en horno sin aire forzado.

El estator se colocó en forma vertical, debido a que la prueba se realizó sin aire forzado, para buscar una mayor uniformidad de secado. En la figura 88, se muestra el motor en el horno sin circulación de aire forzado.



Figura 88. Estator en posición vertical en el interior de horno sin aire forzado.

4.6.3. Medición post mantenimiento sin aire forzado

Se realizó la prueba luego del mantenimiento del estator y secado en el horno sin aire forzado, durante 60 minutos a una temperatura de 115 °C.

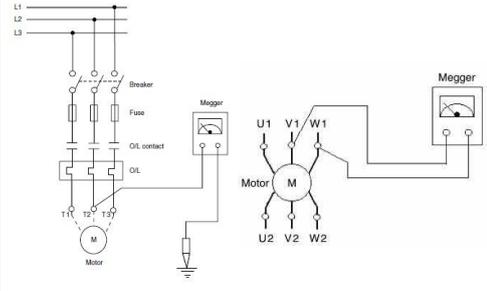
 UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	Mantenimiento ELECTROMECÁNICA TESLA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO MOTORES	Código: UCV21-MTO-01 Versión: rev.01 Fecha: 5/05/2021			
1. Datos del motor					
Código de motor	Potencia (hp)	Voltaje nominal motor (V)	Clase		
Motor SEW-4-01	4	380	F		
2. Mediciones					
Medición	Voltaje de prueba (V)	Medición puntual (MΩ)	Mediación 30 s (MΩ)	Mediación 60 s (MΩ)	Mediación 10 min (MΩ)
R-G	1000	3550	2780	3650	5320
S-G	1000	3950	3650	4750	5470
T-G	1000	3600	3450	4600	5050
3. Índices y conclusiones		4. Esquema de megado			
Índice de polarización calculado	Conclusión IP				
1.46	Cuestionable				
1.15	Cuestionable				
1.10	Cuestionable				
Índice de absorción dieléctrica	Conclusión DAR				
1.31	Buena				
1.30	Buena				
1.33	Buena				
5. Registro fotográfico					
					
Inspector	Supervisor	Aprobado	Sup. Cliente	Conformidad	

Figura 89. Medición resistencia de aislamiento para secado sin aire forzado de estator de 4 Hp.

4.6.4. Medición previa al mantenimiento de un motor de 25 Hp

Del mismo modo que en el caso del motor de 4 Hp se obtuvieron índices cuestionables y pobres como se puede observar en la figura 90.

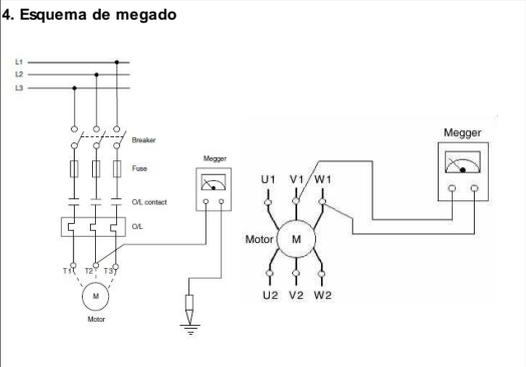
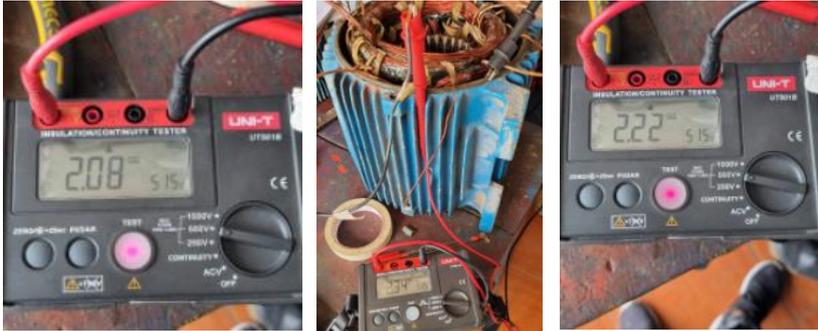
 UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	Mantenimiento ELECTROMECÁNICA TESLA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO MOTORES	Código: UCV21-MTO-01 Versión: rev.01 Fecha: 25/06/2021			
1. Datos del motor					
Código de motor	Potencia (hp)	Voltaje nominal motor (V)	Clase		
Motor SEW-25-01	25	380	H		
2. Mediciones					
Medición	Voltaje de prueba (V)	Medición puntual (MΩ)	Mediación 30 s (MΩ)	Mediación 60 s (MΩ)	Mediación 10 min (MΩ)
R-G	1000	2620	2250	2790	2950
S-G	1000	2350	2220	2750	3000
T-G	1000	2500	2080	2690	2920
3. Índices y conclusiones			4. Esquema de megado		
Índice de polarización calculado		Conclusión IP			
1.06		Cuestionable			
1.09		Cuestionable			
1.09		Cuestionable			
Índice de absorción dieléctrica		Conclusión DAR			
1.24		Pobre			
1.24		Pobre			
1.29		Pobre			
5. Registro fotográfico					
					
Inspector	Supervisor	Aprobado	Sup. Cliente	Conformidad	

Figura 90. Medición resistencia de aislamiento fase-tierra antes de mantenimiento del motor de 25 Hp.

4.6.5. Secado de un motor de 20 Hp en horno con aire forzado

Se realizó el mantenimiento del motor para mejorar los valores de los índices de aislamiento. Para el barnizado del motor se utilizó el aislante dieléctrico clase “H” para secado con horno. En el anexo 12 se muestra una imagen del mantenimiento.



Figura 91. Mantenimiento del motor eléctrico 20 Hp.

El secado se realizó a 130 °C durante 1.5 horas. En la figura 92 se muestra el controlador de temperatura a 135 °C, valor máximo al que llego por encima de los 130 °C requeridos. Con esto se puede observar que con convección forzada el impulso es de +5°C. Se programó el variador de frecuencia a 20 Hz.



Figura 92. Temperatura programada de 130°C para secado con convección forzada y temperatura máxima por encima del valor requerido.

El estator se colocó en forma horizontal con el aire transversal a la bobina; en la figura 93, se muestra la ubicación del ventilador en el horno secador.



Figura 93. Secado en horno con aire forzado.

4.6.6. Medición post mantenimiento con aire forzado

Se realizó la prueba luego del mantenimiento y se llevó a cabo el secado con aire forzado durante 90 minutos a una temperatura de 130 °C. En la figura 95 se muestran los resultados de la medición con el megohmetro.



Figura 94. Secado en horno con aire forzado.

1. Datos del motor

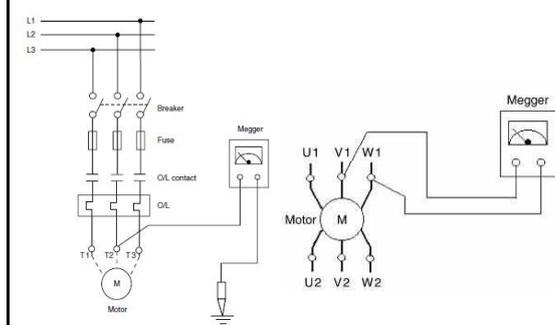
Código de motor	Potencia (hp)	Voltaje nominal motor (V)	Clase
Motor SEW-4-01	20	380	H

2. Mediciones

Medición	Voltaje de prueba (V)	Medición puntual (MΩ)	Mediación 30 s (MΩ)	Mediación 60 s (MΩ)	Mediación 10 min (MΩ)
R-G	1000	3300	3880	5100	5500
S-G	1000	3100	2990	4000	5500
T-G	1000	3240	3190	5000	5500

3. Índices y conclusiones

Índice de polarización calculado	Conclusión IP
1.08	Cuestionable
1.38	Cuestionable
1.10	Cuestionable
Índice de absorción dieléctrica	Conclusión DAR
1.31	Buena
1.34	Buena
1.57	Buena

4. Esquema de megado

5. Registro fotográfico


Inspector	Supervisor	Aprobado	Sup. Cliente	Conformidad

Figura 95. Medición resistencia de aislamiento para secado con aire forzado de estator de 20 Hp.

Se realizó secado durante 2 horas a una temperatura en el controlador programada de 150 °C; donde se obtuvieron valores máximos de resistencia más uniformes. En la tabla 96 se muestran los resultados de la medición con el megohmetro.

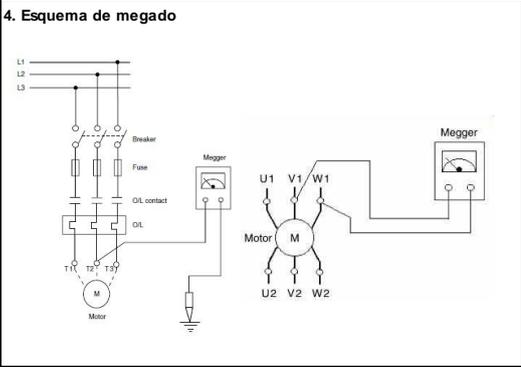
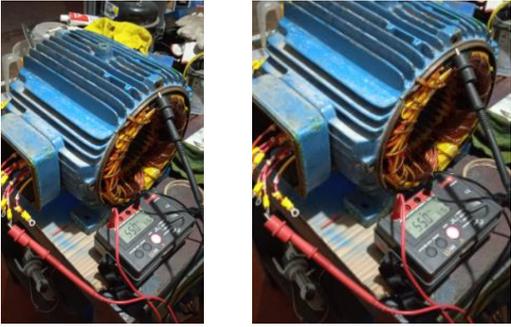
 UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	Mantenimiento ELECTROMECÁNICA TESLA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO MOTORES	Código: UCV21-MTO-01 Versión: rev.01 Fecha: 26/06/2021			
1. Datos del motor					
Código de motor	Potencia (hp)	Voltaje nominal motor (V)	Clase		
Motor SEW-4-01	20	380	H		
2. Mediciones					
Medición	Voltaje de prueba (V)	Medición puntual (MΩ)	Mediación 30 s (MΩ)	Mediación 60 s (MΩ)	Mediación 10 min (MΩ)
R-G	1000	3300	1500	3500	5500
S-G	1000	3100	1600	3600	5400
T-G	1000	3240	1400	3700	5500
3. Índices y conclusiones			4. Esquema de megado		
Índice de polarización calculado					
1.57	Cuestionable				
1.50	Cuestionable				
1.49	Cuestionable				
Índice de absorción dieléctrica	Conclusión DAR				
2.33	Excelente				
2.25	Excelente				
2.64	Excelente				
5. Registro fotográfico					
					
Inspector	Supervisor	Aprobado	Sup. Cliente	Conformidad	

Figura 96. Medición resistencia de aislamiento para secado con aire forzado de estator de 20 Hp para secado a 150 °C en cámara y 2 horas de secado.

4.6.7. Registro de temperaturas

Durante las pruebas que se realizaron en el horno con convección forzada y las pruebas en el horno sin ventilación, se registraron las temperaturas programadas, temperatura máxima de operación y el impulso; esto referente al controlador. Para las bobinas se tomaron los datos de temperatura inicial y final, por otro lado, también se tomaron los datos de las temperaturas exteriores e interiores de las paredes y techo del horno secador. En el anexo 13 se muestra una fotografía de la lectura de temperatura en el interior del secador para prueba con convección forzada.

En la tabla 18 se transcribieron los datos tomados en las pruebas realizadas para radiación y convección forzada. Con esto se puede notar que la carga recibe menos energía por radiación y que almacena más energía en las paredes del horno.

Tabla 18.
Registro de temperaturas para convección natural y forzada.

N°	Parámetro	Unidad		
			Natural	Forzada
1	Temperatura programada	°C	115	130
2	Temperatura máxima en operación	°C	132	135
3	Impulso calculado	°C	17	5
4	Temperatura de la bobina inicial	°C	22.0	21.5
5	Temperatura de la bobina final	°C	91	105
6	Temperatura pared exterior final	°C	29.5	27.2
7	Temperatura pared interior final	°C	180	140
8	Tiempo de prueba	minutos	60	90

V. DISCUSIÓN

5.1 El estudio de optimización del horno secador de bobinas de 300 hp, se realizó mediante la metodología del diseño de Ulrich y Eppinger. Se hizo uso de este método debido a que no se tenía un horno secador al cual poder modificar; esto es importante porque el estudio apunta a un tipo de optimización enfocada a hacer más competitivos en comparación a productos o equipos de otros lugares a diferencia de lo que posiblemente se pueda asociar el optimizar como repotenciar o cambiar. Por eso en la sección 4.1 se inició con el estudio de las necesidades o requerimientos principales que Electromecánica Tesla planteó, dando paso a la búsqueda de hornos secadores con similares características en proveedores de otros lugares. El análisis de alternativas conceptuales que comprendían la combinación de tecnologías permitió acercarnos a lo que se ha modelado como un horno óptimo para secado de bobinas de 300 HP. Un horno eléctrico tiene notables ventajas frente a un horno de combustión (Méndez Altamirano, 2012). Por este motivo en la primera sección de resultados se consideran solo hornos eléctricos como alternativas de solución. La información revisada en los trabajos no considera la metodología de diseño como herramienta de optimización lo cual muestra una predisposición hacia una tecnología en vez de diversificar entre diferentes opciones.

5.2 Cuando se tuvo el bosquejo de la alternativa de solución con mayor puntuación, se procedió al cálculo energético, sin embargo, se notó que en cada una de las opciones evaluadas no se habían considerado una comparación entre dos notables posibilidades, estas son, considerar solo radiación con convección natural y la otra opción, convección forzada. Aunque definir cuál sería mejor solo con el cálculo térmico no es posible, ya que es necesario las pruebas para determinar la resistencia de aislamiento para ambos casos. El cálculo térmico, permitió identificar que, con las mismas características de aislamiento y similar estructura, el sistema con convección forzada, tiene menos pérdidas al exterior y menos energía almacenada en 2 horas de funcionamiento. El análisis térmico se realizó en régimen transitorio para determinar la temperatura alcanzada en un tiempo determinado a diferencia que otro investigador que citamos en los trabajos previos, el cual realizó el cálculo en estado estable; sin embargo, es ventajoso que en parte de su trabajo

utilizó SolidWorks para obtener los resultados en estado transitorio (Echevarria Burgos & Reyes Olivares, 2016). El cálculo de la temperatura de la carga se realizó idealizando la bobina como un cilindro de 500 mm de diámetro por 700 de largo y aplicando análisis de sistemas concentrados obteniendo que la carga en 2 horas solo alcanza una temperatura superficial de 112.54°C para convección forzada consumiendo una potencia de 8.76 KW totales. Para el mismo tiempo de 2 horas, pero para el caso de secado solo por radiación con convección natural se tiene una temperatura de 99.50 °C en la superficie de la bobina modelada y la potencia consumida fue de 5.18 KW. El investigador Méndez (Méndez Altamirano, 2012) citado en los trabajos previos, si consideró el estudio en régimen transitorio, resolviendo una ecuación diferencial obtuvo que el tiempo en el que la carga llega a 200°C es de 1 hora 33 minutos para una carga de 20 Kg y para un secador de dimensiones exteriores de 1.45 m de altura x 0.9 m de ancho y 0.9 m de largo consumiendo 2.2 KW totales. Los investigadores ya mencionados, Méndez y Echevarría incluyeron el diseño de la resistencia calefactora. Por otro lado, con respecto al sistema de control, Flores (Flores Medina, 2016) en su trabajo de investigación solo contemplo la mejora en el sistema de control, Flores realizó pruebas con una carga de 4 toneladas el tiempo para alcanzar 130 °C en la superficie de la carga es de 460 minutos, esto es más de 7 horas y media; haciendo una razón que relacione a la carga con el tiempo que demora en alcanzar una temperatura determinada, para Flores el resultado sería de 8.70 Kg/min y por eso en nuestro caso se tiene 10 Kg/min, con lo cual se puede inferir que nuestro modelo se acerca a la realidad que evaluó Flores.

5.3 A nivel de estructuras, se optó por el estudio con la teoría de pendiente-deflexión para marcos simétricos empotrados, las cargas que se asignaron en el estudio de la estructura se siguieron mediante la norma técnica peruana E0.20 para cargas y combinaciones de carga, E0.30 para diseño sismo-resistente y E0.90 para estructuras metálicas; puede ser que el lector sugiera que las normas solo son aplicables a estructuras industriales o edificios, sin embargo, estas normas están basadas en normativas internacionales como la AISC 360-10 lo cual es aplicado para diseño de estructuras en general. Por ello, se realizó el estudio considerando 3 combinaciones de carga, donde la más crítica fue la de carga muerta más sismo (D+E), combinaciones que están indicadas en la norma para el diseño por

esfuerzos admisibles ASD. El perfil luego que se diseñó por la norma, se evaluó en SolidWorks arrojando valores similares, donde finalmente se optimizó determinando que el perfil calculado era el óptimo. La optimización desde el punto de vista de diseño de producto involucra no solo los sistemas de control o el estudio de las cargas térmicas o por separado la estructura, la metodología busca mejorar un producto en varias características o aspectos. Por otro lado, los autores de los trabajos previos revisados como por ejemplo Méndez (Méndez Altamirano, 2012), hizo el análisis estructural considerando únicamente los elementos como vigas con apoyos simples.

5.4 El impulso mínimo obtenido en la prueba realizada en este trabajo es de 5°C con convección forzada. En nuestro caso se ha realizado el controlador de temperatura ON/OFF más variador de velocidad con frecuencias fijas para que cuando se alcanza la temperatura de 200 °C, no solo se desconecta el circuito de resistencias, sino también se aumenta la velocidad prefijada en el variador; esto se proyecta que permitirá reducir el impulso en control ON/OFF sin aumentar los costos de adquisición e instalación de otras tecnologías. Un punto donde convergen los autores de los trabajos previos, es en el diseño y mejora del sistema eléctrico, donde, por ejemplo, el autor Solís (Solís Bustamante, 2019), determinó en sus pruebas que existe un impulso de 8 °C sobrepasando la temperatura programada durante 6 segundos y luego se estabiliza. El autor Flores (Flores Medina, 2016) consideró controlar el horno secador con un PLC Siemens S7-1200 donde obtuvo un mejor control de la temperatura. En nuestro trabajo también se consideró el cálculo de los parámetros para la selección de elementos de seguridad como los disyuntores termo-magnéticos e interruptores diferenciales; tema que los autores citados en los trabajos previos no consideraron en sus estudios de diseño y que es muy importante desde el punto de vista de seguridad. A excepción de Méndez que calculó la corriente de alimentación al motor, igual a 2 A, valor cercano al calculado para nuestro caso, 2.11 A.

5.5 En el objetivo 5 se logró dibujar el plano de la estructura y la cobertura, indicando el material de fabricación y haciendo uso de simbología de soldadura en norma ISO. Como se ha venido describiendo los resultados, no todos los autores han abordado el tema estructural y en consecuencia los planos de fabricación

tampoco. Como es el caso de Flores (Flores Medina, 2016) que solo aborda el sistema de control de temperatura. Por otra parte, el autor Mendez si muestra un plano general con las dimensiones básicas como largo, ancho y altura. En el caso de Echevarría (Echevarria Burgos & Reyes Olivares, 2016) si realizó los planos de fabricación en SolidWorks. Con lo cual se puede resolver también que el uso de SolidWorks es una herramienta muy útil no solo para la simulación de transferencia de calor sino también para realizar los planos de fabricación.

5.6 Un punto muy importante es la prueba en el horno para verificar la resistencia del aislamiento de la bobina a la cual se le ha realizado mantenimiento. Las condiciones en las que se realiza el secado influyeron en estos valores finales. En el caso de nuestro estudio se realizaron las pruebas con el horno solo con radiación y convección forzada, donde se observó que con el controlador de temperatura el pulso es de $17^{\circ}\text{C}/-16^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, al utilizar el secado con el ventilador el pulso se disminuyó a $+5^{\circ}\text{C}/-7^{\circ}\text{C}$ por encima del valor programado de 130°C en 10 segundos, esto debido a que el ventilador acelera la transferencia por convección, disminuyendo con mayor rapidez la resistencia. Se aclara que el secador fabricado se hizo con algunas medidas y disposiciones diferentes por un tema económico y la prueba no se hizo a 200°C , si no, solo a 115°C ; por lo cual se puede inferir que para mayores temperaturas el pulso será mayor. Similar al investigador Solís (Solís Bustamante, 2019) que obtuvo un pulso de 8°C , pero para una temperatura mayor de 120°C . El investigador Flores (Flores Medina, 2016) que realizó el control con PLC S7-1200 obtuvo un control de temperatura con pulsos de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

VI. CONCLUSIONES

Al término de esta investigación se pudo plasmar una metodología de optimización para hornos eléctricos basada en el diseño de productos de Ulrich y Eppinger; abarcando 3 aspectos que son los más relevantes, la optimización térmica, estructural y eléctrica. Se logró realizar pruebas en un prototipo fabricado en paralelo con el desarrollo del presente trabajo. Cada objetivo alcanzado permitió encontrar el diseño óptimo de un horno eléctrico para secado de bobinas de hasta 300 HP a una temperatura máxima de 200 °C.

6.1 A nivel conceptual se logró seleccionar la alternativa C como solución óptima para el horno secador, el puntaje alcanzado fue de 3.11 no muy lejano de la alternativa B con puntuación igual a 2.93. La selección fue posible mediante la exploración de tecnologías de secado por resistencia eléctrica. El uso de la lista de valores objetivos, permitieron cuantificar cada métrica del horno lo cual no solo sirvió para el análisis conceptual, sino también para los cálculos en las secciones posteriores. Los valores objetivo con una importancia de 5 fueron, la geometría y la seguridad, es decir optimizar el espacio en función del diámetro máximo del motor y dar las condiciones adecuadas de operación con elementos de corte en caso de una acción subestándar de trabajo; por ello es que en la tabla de selección tiene un peso de 23% el criterio de seguridad en operación. Las métricas con un valor de 4 de importancia fueron el control de temperatura con valor ideal el considerar un controlador de temperatura, potencia eléctrica máxima de 12 KW, pérdidas de energía máxima de 0.65 KW y potencia del ventilador con valor ideal de 3 KW. Por último, en la lista de valores objetivo se encuentran el peso del horno con un valor ideal de 1.3 Tn.

6.2 En el análisis térmico se realizó el estudio de dos casos, considerando primero convección forzada y segundo en convección natural con radiación. Ambos estudios se efectuaron para determinar la diferencia de potencia consumida en un tiempo de operación de 2 horas y para saber cuál es la temperatura en los diferentes puntos de interés del secador. Se concluye que el modelado de la bobina de 300 HP como un cilindro de 500 mm de diámetro por 700 mm de largo, nos permite modelar la carga como un sistema concentrado, lo que a su vez hizo que el cálculo en régimen transitorio para la energía que consume la bobina idealizada,

sea más sencillo. La potencia almacenada por la carga, es de 5365.56 W con una temperatura superficial de 112.54°C para convección forzada y 3905.62 W con una temperatura superficial de 99.5°C para convección natural. La energía almacenada en las paredes y el techo suman un total de 2533.74 W con una temperatura de 28.29°C en la parte exterior para convección forzada y para convección natural, se obtuvo una potencia de 2198.13 W con temperatura en el exterior, igual a 29.29°C. La potencia perdida en convección forzada es de 864.34 W y de 1273.85 W para convección natural. Se concluye que con radiación y convección natural se aporta menos energía a la carga en el mismo tiempo de operación, a diferencia de un horno con un circuito de ventilación de $2.26 \frac{m^3}{s}$ de flujo volumétrico. Asimismo, el no ventilar las resistencias para acelerar el proceso de secado, hace que las paredes cercanas a los elementos calefactores experimenten un aumento mayor de temperatura. Un dato muy importante que se pudo identificar al realizar el cálculo de acumulación de energía, fue que el espesor de aislamiento debe ser seleccionado con el menor posible para disminuir la energía almacenada en las paredes. Visto desde el punto de vista de las métricas a optimizar, estamos a casi la mitad del valor ideal de potencia y con un porcentaje de pérdidas cercano al valor marginal, por lo que desde esta perspectiva también se concluye que el diseño con convección forzada se encuentra en valores óptimos.

6.3 Se concluye, que la optimización de la estructura del horno, permitió satisfacer dos métricas de la lista de valores objetivos, estas son, seguridad y peso de la estructura. Por una parte, al considerar combinaciones de carga según la norma E.020 y calcular el cortante horizontal por sismo según la norma E.030, permitieron tener un escenario de cargas crítico. La evaluación simplificada de la estructura principal, modelándola como un marco simétrico con sus extremos empotrados, permitió calcular los diagramas de momento flector y de fuerza cortante mediante la ecuación de pendiente-deflexión. Se calculó que la estructura está sometida a un cortante máximo de 325.70 Kg y a un momento flector máximo de 222.05 Kg. La sección se evaluó por el criterio de diseño ASD, donde el valor del esfuerzo se encuentra por debajo de la resistencia a la fluencia del acero ASTM 992. El esfuerzo normal para el criterio de diseño ASD por momento flector, es de 157.94 MPa, siendo menor al 60% de la resistencia a la fluencia y para esfuerzo cortante, el

esfuerzo calculado es de 3.62 MPa lo cual es menor al 40% de la resistencia a la fluencia. Finalmente, cuando se realizó el estudio de optimización de diseño en SolidWorks se encontró que la sección elegida como primera iteración es la óptima.

6.4 Se logró optimizar el sistema eléctrico mediante 4 pasos importantes, primero se adicionó un ventilador de 8500 m³/h accionado por un motor trifásico de 1.5 hp a 380V de tensión, siendo controlado por un variador de velocidad con frecuencias prefijadas para obtener 3 velocidades de rotación. Como segundo paso, se definió un diagrama de flujo para hacer un circuito de control seguro y que cumpla con las especificaciones requeridas. Tercero, se realizaron los esquemas eléctricos de control y potencia considerando un sensor de final de carrera como medida de seguridad en la puerta del horno y un temporizador para la programación del tiempo de secado, involucrando solo al operario para el ingreso de la carga, programación y retiro de la carga. Finalmente, en este objetivo número 4, se realizaron los cálculos de los parámetros eléctricos, donde se obtuvo un amperaje de operación para los conductores del ventilador, igual a 2.02 A; la intensidad de corriente nominal del conductor a 30°C es de 27 A y la intensidad máxima admisible es de 19.26 A. El tipo de conductor es un TWH-90 450/750 V de sección 2.5 mm². Para el circuito del ventilador se seleccionó el termo-magnético calibre normalizado 16 A a 380 V curva D con poder de corte, 10 KA. La corriente de cortocircuito que se calculó para el sistema es de 8.94 KA. Para las resistencias se seleccionó conductor un TWH-90 450/750 V de sección 4 mm² con 30 A de capacidad de conducción de corriente y una intensidad máxima admisible de 24.26 A. El termo-magnético seleccionado es un calibre normalizado 20 A a 380 V curva D con poder de corte, 25 KA. El cálculo de los parámetros terminó con la determinación de la sensibilidad nominal del diferencial, igual a 100 mA y la resistencia de la puesta a tierra no debe ser mayor a 240 ohmios.

6.5 Los planos de la estructura consideraron las dimensiones de cada elemento y se adjuntó una lista de cada perfil y plancha a utilizar con el tipo de material correspondiente. Con este objetivo se pudo observar que el espacio para las resistencias que en principio se pensó ubicar no es posible, por lo que se tuvo que distribuir las resistencias en el espacio disponible de los ductos dando preferencia a la parte superior. De esta manera se puede notar que se optimizó el espacio y

por lo tanto se ha reducido el peso de la estructura. La optimización del espacio para el límite de bobinas de hasta 300 hp también permitió reducir la energía total del sistema. Se especificaron los perfiles U4x5.4 de acero ASTM A992 para la principal, acero A36 para la estructura secundaria de ángulo de 2x2x1/8" y plancha AISI 316H de 1/8" y 1/16" para los ductos y la cobertura del aislamiento.

6.6 Luego de realizar las pruebas se concluye lo siguiente, primero se corroboró que el secado por radiación y convección natural, aportan menos energía a la carga y almacenan más en las paredes, ya que la temperatura de la superficie de la bobina en convección natural fue de 91 °C y con convección forzada fue de 105 °C. Además, la temperatura de la pared interior luego de 1 hora de prueba para convección natural alcanzó 180°C como temperatura máxima y para el caso de convección forzada, solo 140 °C, a pesar que la prueba fue de 1 hora y media. El impulso registrado en la temperatura interior del aire es de 17 °C para radiación y 5 °C para convección forzada. Por otra parte, se concluye que la resistencia de aislamiento mejora con la convección forzada, aunque no fue posible calcular el valor real del índice de polarización a consecuencia de que en la prueba solo se contaba con un megohmetro de mediación máxima de 5.5 GΩ. Sin embargo, las mediciones de la bobina secada por aire forzado obtuvieron el valor máximo de lectura del equipo, además del aumento de los índices de absorción dieléctrica con un valor máximo de 1.57 calificada por la norma como buena, y para su contraparte del secado por convección natural, se obtuvo 1.33 como valor máximo, que también es considerada como un valor bueno. Cuando se realizó un aumento de la temperatura de secado cercana al valor máximo indicado por NEMA MG-1 se logró registrar un aumento del índice de absorción dieléctrica hasta un valor de 2.64, siendo considerado esto como excelente. Por este motivo, se concluye que la convección forzada con control de temperatura cercano al valor máximo permitido según clase de aislamiento, es la opción óptima para el proceso de secado de bobinas tanto a nivel de eficiencia térmica como para mejorar los índices de resistencia de aislamiento de bobinas de motores eléctricos.

VII. RECOMENDACIONES

7.1 Se recomienda realizar la comparación del modelo con un secador con similares características al modelado, de manera que se pueda evaluar la desviación de los resultados. En nuestro trabajo solo se realizó un prototipo.

7.2 Se recomienda simular el horno secador mediante análisis de transferencia de calor en Flow Simulation SolidWorks, para visualizar el comportamiento del aire en el interior de la cámara de secado y en los ductos de aire.

7.3 Se recomienda evaluar la estructura completa en SAP2000 para determinar los diagramas de fuerza cortante y momento flector en cada elemento. Asimismo, se recomienda evaluar la estructura para otras combinaciones de carga.

7.4 Se recomienda realizar otra opción de control de temperatura considerando un PLC con módulo analógico con lo cual el control de temperatura sea en tiempo real. Para ello será necesario realizar la determinación de la función de transferencia para el circuito de control y escalando los valores analógicos de voltaje del sensor con la cantidad de bits del PLC seleccionado.

7.5 Realizar pruebas de aislamiento con un equipo de medición con un rango amplio de lectura en $G\Omega$, de tal manera que se puedan calcular los índices de polarización.

REFERENCIAS

- Aislasur. (06 de 06 de 2020). *www.aislasur.com*. Obtenido de <https://aislasur.com/la-fibra-de-vidrio-como-aislante-acustico-y-termico/>
- Barragué, L. C. (2013). *Metodología eficiente de optimización de diseño basada en fiabilidad aplicada de estructuras*. Madrid: Universidad de La Rioja.
- Beer, F. P., Jhonston, R. E., Dewolft, J. T., & Mazurek, D. F. (2009). *Mecánica de materiales*. México: McGrawHill.
- Brototermic. (06 de 06 de 2020). *RESISTENCIAS ELÉCTRICAS*. Obtenido de <http://www.brototermic.com/docs/catalogo-resistencias-calefactoras.pdf>
- Carabogdan, Ing I. GH. 1986. *Manual del ingeniero termotécnico*. Bucuresti : EDITURA TEHNICĂ, 1986.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. Nevada: McGrawHill Education.
- Childs, P. (2004). *Mechanical Design*. New York: Elsevier.
- Collins A, J., Busby, H., & STAAB, G. (2010). *Mechanical Design of Machine Elements and Machines*. United States of America: John Wiley & Sons.
- Corrêa Soares, G., Mendes Rodrigues, M. C., & de Arruda Santos, L. (2017). Influence of Temperature on Mechanical Properties, Fracture Morphology and Strain Hardening Behavior of a 304 Stainless Steel. *scielo*, 2.
- Costa, A., & Ferreira, S. (2007). *Sistema de Secado Solar para Frutos Tropicales*. Brasil: Universidad Federal de Río Grande del Norte.
- EASA. (2015). *Norma EASA AR100-2015: Práctica recomendada para la reparación de máquinas eléctricas rotativas*. USA: EASA.
- Echevarria Burgos, T. F., & Reyes Olivares, C. M. (2016). *Diseño, optimización y construcción de un horno de recalentamiento utilizando resistencias eléctricas y el software Solidworks*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.

- ERICA AISLAMIENTO Y ESTANQUEIDAD. (06 de 06 de 2020). www.eric.es.
Obtenido de <http://www.eric.es/web/aislamiento-termico/>
- Flores Medina, M. S. (2016). *Diseño e implementación de un sistema automático de control de temperatura de un horno industrial utilizado en el proceso de secado del bobinado de motores y generadores eléctricos en la empresa AFLOMOTORS de la ciudad de Quito*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito.
- García Cochachi, C. P. (2008). *Diseño de un horno eléctrico para el secado del bobinado de motores eléctricos*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- GARCIA, G. (2019). *Un proceso general de diseño en ingeniería mecánica*. Illinois: Instituto Tecnológico de Illinois.
- Global Industry Analysts, I. (2020). Market impact Survey - Covid-19 & Looming Recession. *MarketReport*, 1.
- Holman. (2002). *Heat Transfer*. New York: McGrawHill Higher Education.
- Imperbe. (06 de 06 de 2020). www.imperbe.es. Obtenido de <https://www.imperbe.es/es/servicios/aislamientos-termicos/lana-de-roca>
- Jaluria, Y. (2020). *Desing and Optimization of thermal Systems with MATLAB applications*. United State: CRC Press.
- Krar, S., Gill, A., & Smid, P. (2009). *Tecnología de máquinas herramientas*. México: Alfaomega.
- Kreith, F., Manglik, R., & Bohm, M. (2012). *Principios de transferencia de calor*. Mexico: Cengage Learning, Inc.
- Mankiw, G. (2015). *Principios de economía*. México: Cengage Learning .
- Massoud, M. (2005). *Engineering Thermofluids*. Germany: University of Maryland.
- Méndez Altamirano, J. P. (2012). *Diseño y construcción de un horno eléctrico para el secado de los bobinados de motores de hasta 10 HP*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- Ministerio de energía. (2010). *Estudio del mercado de maquinaria que integra un motor eléctrico en Chile*. Santiago de Chile: Gamma Ingenieros S.A.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Education.
- NEMA. (2010). *MOTORS AND GENERATORS*. USA: National Electrical Manufacturers Association.
- Pérez Cruz, J., & Pineda Sánchez, M. (2008). *Automatización de maniobras industriales*. Valencia: Alfaomega.
- PREMAC. (06 de 06 de 2020). *HORNO PARA CURADO DE RESINAS*. Obtenido de https://www.premac.co/pdf/H_Resinas.pdf: https://www.premac.co/pdf/H_Resinas.pdf
- Schneider Electric. (06 de 06 de 2020). *PLC T*. Obtenido de <http://ceyesa.com.pe/marca/schneider-electric/>
- Shigley. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica*. México: McGrawHill Interamericana.
- Solís Bustamante, M. C. (2019). *Diseño de un sistema de control de temperatura de un horno, utilizado para el secado de barniz aislante*. Lima: Universidad Tecnológica del Perú.
- Sowell, T. (2013). *Economía Basica* . España : Deusto SA.
- Universidad Politécnica de Cartagena. (22 de 07 de 2020). <http://www.dmae.upct.es/>. Obtenido de http://www.dmae.upct.es/http://www.dmae.upct.es/~paredes/am_ti/apuntes/guia_foe.pdf
- WEG, M. L. (2014). *MANUAL DE MOTORES ELÉCTRICOS*. Argentina.
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. Juarez: PEARSON EDUCACIÓN.
- ZEMANSKY, S. (2009). *Física universitaria con moderna*. México: Pearson.

ANEXOS

[Anexo 1](#): Valores mínimos aceptables de resistencia de aislamiento según IEEE-43-2000.

Motor Nameplate Voltage Rating	Minimum Acceptable Resistance
0-208	100,000Ω
208-240	200,000Ω
240-600	300,000Ω
600-1000	1MΩ
1000-2400	2MΩ
2400-5000	3MΩ

Anexo 2: Conductividad térmica de metales sólidos y del aire en función de la temperatura. (Cengel & Ghajar, 2011)

TABLA A-3

Propiedades de metales sólidos (continuación)

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), $k(\text{W/m} \cdot \text{K})/c_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$					
		ρ kg/m ³	c_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1 000
Al carbono-manganeso-silicio (1% < Mn < 1.65% 0.1% < Si < 0.6%)		8 131	434	41.0	11.6			42.2	39.7	35.0	27.6
								487	559	685	1 090
Aceros al cromo (bajo): $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)		7 822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9
1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)		7 858	442	42.3	12.2			492	575	688	969
								42.0	39.1	34.5	27.4
1Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)		7 836	443	48.9	14.1			492	575	688	969
								46.8	42.1	36.3	28.2
								492	575	688	969
Aceros inoxidables:											
AISI 302		8 055	480	15.1	3.91			17.3	20.0	22.8	25.4
								512	559	585	606
AISI 304	1 670	7 900	477	14.9	3.95	9.2	12.6	16.6	19.8	22.6	25.4
						272	402	515	557	582	611
AISI 316		8 238	468	13.4	3.48			15.2	18.3	21.3	24.2
								504	550	576	602
AISI 347		7 978	480	14.2	3.71			15.8	18.9	21.9	24.7
								513	559	585	606

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

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
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
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

Anexo 3: Uniones soldadas simbología ISO y AWS.

Designation	Illustration	Symbol
(a) Single-V butt/groove weld		
(b) Square butt/groove weld		
(c) Single bevel butt/groove weld		
(d) Single-U butt/groove weld		
(e) Single-J butt/groove weld		
(f) Butt weld between plates with raised edges (ISO) Edge weld on a flanged groove joint (AWS)		
(g) Single-V butt weld with broad root face		
(h) Single bevel butt weld with broad root face		

3.1 (a-h) Examples of elementary welding symbols - 1.

[Anexo 4:](#) Dimensiones típicas de aislamiento en lana mineral.

	R-VALUE⁴	SIZES	PIECES/BAG	SQ FT./BAG
Wood Stud Application	R15	3.5" x 15" x 47"	6	29.4
		3.5" x 23" x 47"	6	45.0
	R23	5.5" x 15" x 47"	5	24.48
		5.5" x 23" x 47"	4	30.3
	R30	7.1" x 15" x 47"	3	14.7
		7.1" x 23" x 47"	3	22.5
Steel Stud Application	R10	2.5" x 16" x 48"	8	42.7
		2.5" x 24" x 48"	8	64.0
	R15	3.5" x 16" x 48"	6	32.0
		3.5" x 24" x 48"	6	48.0
	R24	6" x 16" x 48"	4	21.3
		6" x 24" x 48"	4	32.0

⁴ R-value is a measure of insulating ability. "R" means resistance to heat flow. The higher the "R" value, the greater the insulation power.

Anexo 5: Material del instrumento registro de observación.



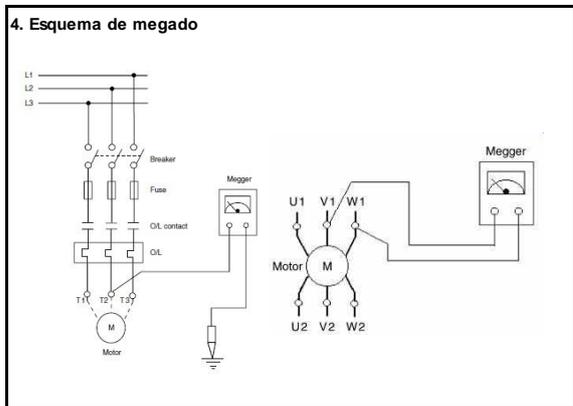
Mantenimiento ELECTROMECÁNICA TESLA
PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO
MOTORES

Código: UCV21-MTO-01
Versión: rev.01
Fecha: 5/05/2021

1. Datos del motor			
Código de motor	Potencia (hp)	Voltaje nominal motor (V)	Clase

2. Mediciones					
Medición	Voltaje de prueba (V)	Medición puntual (MΩ)	Mediación 30 s (MΩ)	Mediación 60 s (MΩ)	Mediación 10 min (MΩ)
R-G		0	0	0	0
S-G		0	0	0	0
T-G		0	0	0	0

3. Índices y conclusiones	
Índice de polarización calculado	Conclusión IP
Sin datos	Sin datos
Sin datos	Sin datos
Sin datos	Sin datos
Índice de absorción dieléctrica	Conclusión DAR
Sin datos	Sin datos
Sin datos	Sin datos
Sin datos	Sin datos



5. Registro fotográfico

Inspector	Supervisor	Aprobado	Sup. Cliente	Conformidad

Anexo 6: Características técnicas y de seguridad del horno secador marca YICHENG para elaboración de valores objetivos.

Modelo	YC-O1000	YC-O1500	YC-O1800	YC-O2000
Dimensiones interiores (mm) (Ancho * profundidad * altura)	1000 * 1200 * 1300	1500 * 1500 * 1500	1800 * 1800 * 1800	2000 * 2000 * 2000
Potencia de calefacción eléctrica (KW)	12	24	36	45
Número de ventiladores	1	4	4	4
Potencia del ventilador (Kw)	1,1	4,4	4,4	4,4
Medio de calefacción	De electricidad o de Gas			
Temperatura de trabajo	Temperatura ambiente hasta un máximo de 200 °C (Estándar) Máximo de 300/400/500/600 °C (Opcional)			
Uniformidad de temperatura	± 3 °C			
Dimensiones exteriores (mm) (Ancho * largo * alto)	1800 * 1400 * 1500	2200 * 1900 * 2500	2500 * 2200 * 2800	2700 * 2400 * 3000
Peso (tonelada)	1	1,7	2,2	2,8

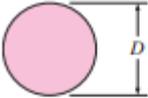
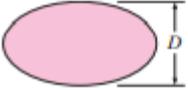
Características de seguridad

- Dispositivo de enclavamiento para motor y pieza de calentamiento. El ventilador empieza antes de que el calentador empiece a evitar daños al calentador.
- El calentador se detiene automáticamente cuando los ventiladores se rompen.
- Hay un sistema de alarma de sobretemperatura independiente, y cuando la temperatura dentro del horno se vuelve anormal, se activará y se encenderá, y la fuente de energía se cortará automáticamente.
- Protección de cortocircuitos del motor y protección contra sobrecorriente para evitar el desgaste del motor o el disparo.
- Protección de cortocircuito del calentador.
- Controla la protección del circuito para evitar cortocircuitos.
- Interruptor de aire para evitar sobrecarga del circuito principal o cortocircuito.

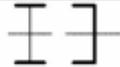
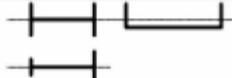
Anexo 7: Características técnicas del horno secador marca Doing Machine para elaboración de valores objetivos.

Modelo	EI DR.-5	EI DR.-6	EI DR.-7	EI DR.-8
Espacio de trabajo mm	1000X1000X1000	1200x1200x1000	1500x1200x1000	1500x1500x1200
Dimensión total mm	1580X1370X1200	1780x1570x1200	2100x1600x1200	2100x1900x1400
Tensión de alimentación V	240V/380V/415V	240V/380V/415V	240V/380V/415V	240V/380V/415V
Calentador eléctrico KW	12	15	18	21
Temperatura de trabajo? °C	Ambiente-300 °C	Ambiente-300 °C	Ambiente-300 °C	Ambiente-300 °C
Temperatura precisión de control °C	± 1 °C	± 1 °C	± 1 °C	± 1 °C
Ventilador de circulación W	370	750	750	1100

Anexo 8: Correlaciones empíricas para el número de Nusselt promedio, para convección forzada sobre cilindros circulares y no circulares en flujo cruzado (tomada de Zukauskas, 1972, y Jakob, 1949) (Cengel & Ghajar, 2011).

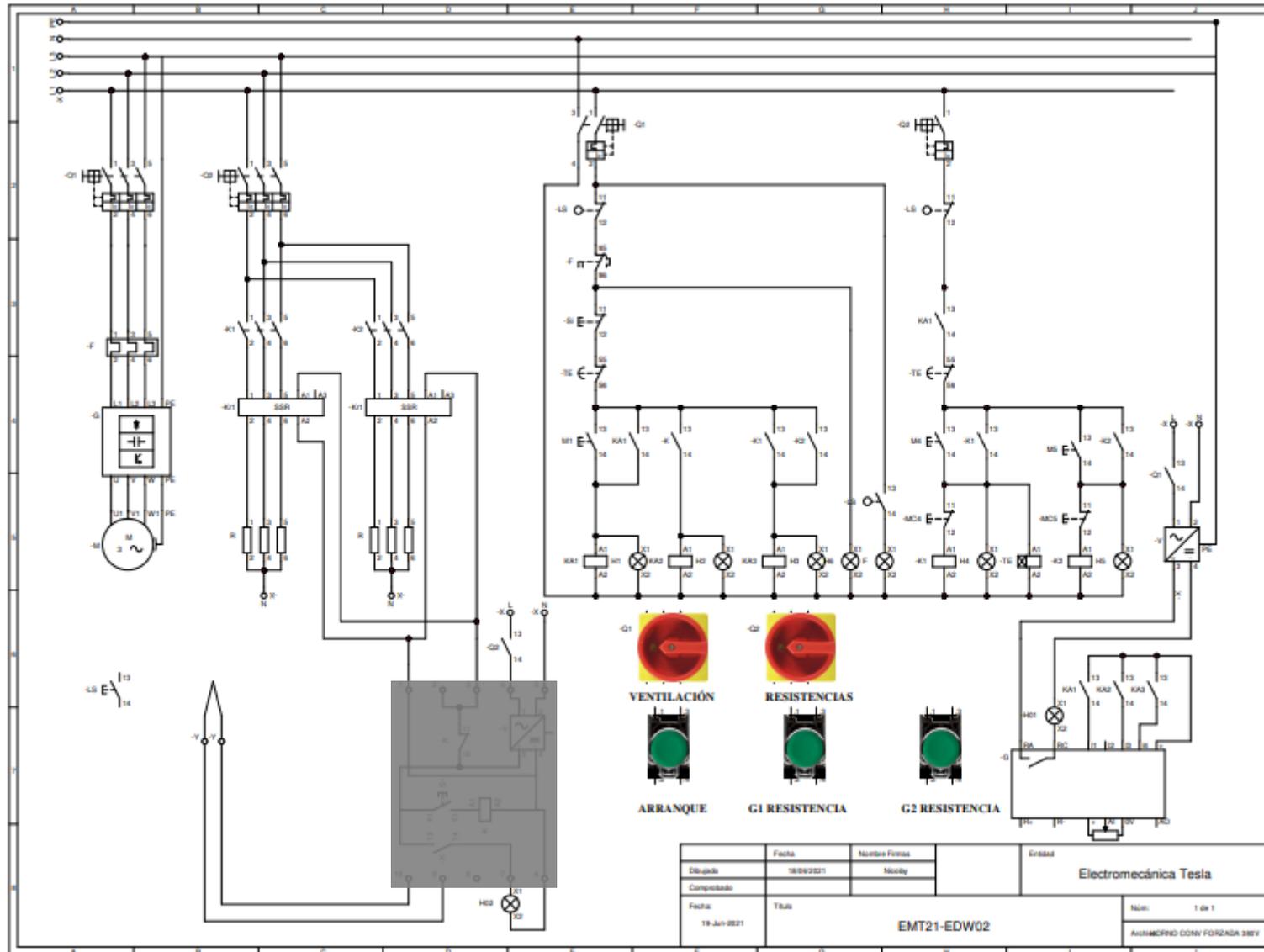
Sección transversal del cilindro	Fluido	Rango de Re	Número de Nusselt
Círculo 	Gas o líquido	0.4-4 4-40 40-4 000 4 000-40 000 40 000-400 000	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.683Re^{0.466} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$
Cuadrado 	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.102Re^{0.675} Pr^{1/3}$
Cuadrado (inclinado 45°) 	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.246Re^{0.588} Pr^{1/3}$
Hexágono 	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.153Re^{0.638} Pr^{1/3}$
Hexágono (inclinado 45°) 	Gas	5 000-19 500 19 500-100 000	$Nu = 0.160Re^{0.638} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.0385Re^{0.782} Pr^{1/3}$
Placa vertical 	Gas	4 000-15 000	$Nu = 0.228Re^{0.731} Pr^{1/3}$
Elipse 	Gas	2 500-15 000	$Nu = 0.248Re^{0.612} Pr^{1/3}$

[Anexo 9:](#) Tabla de selección extraída de la norma técnica peruana E.090 para diseño de estructuras.

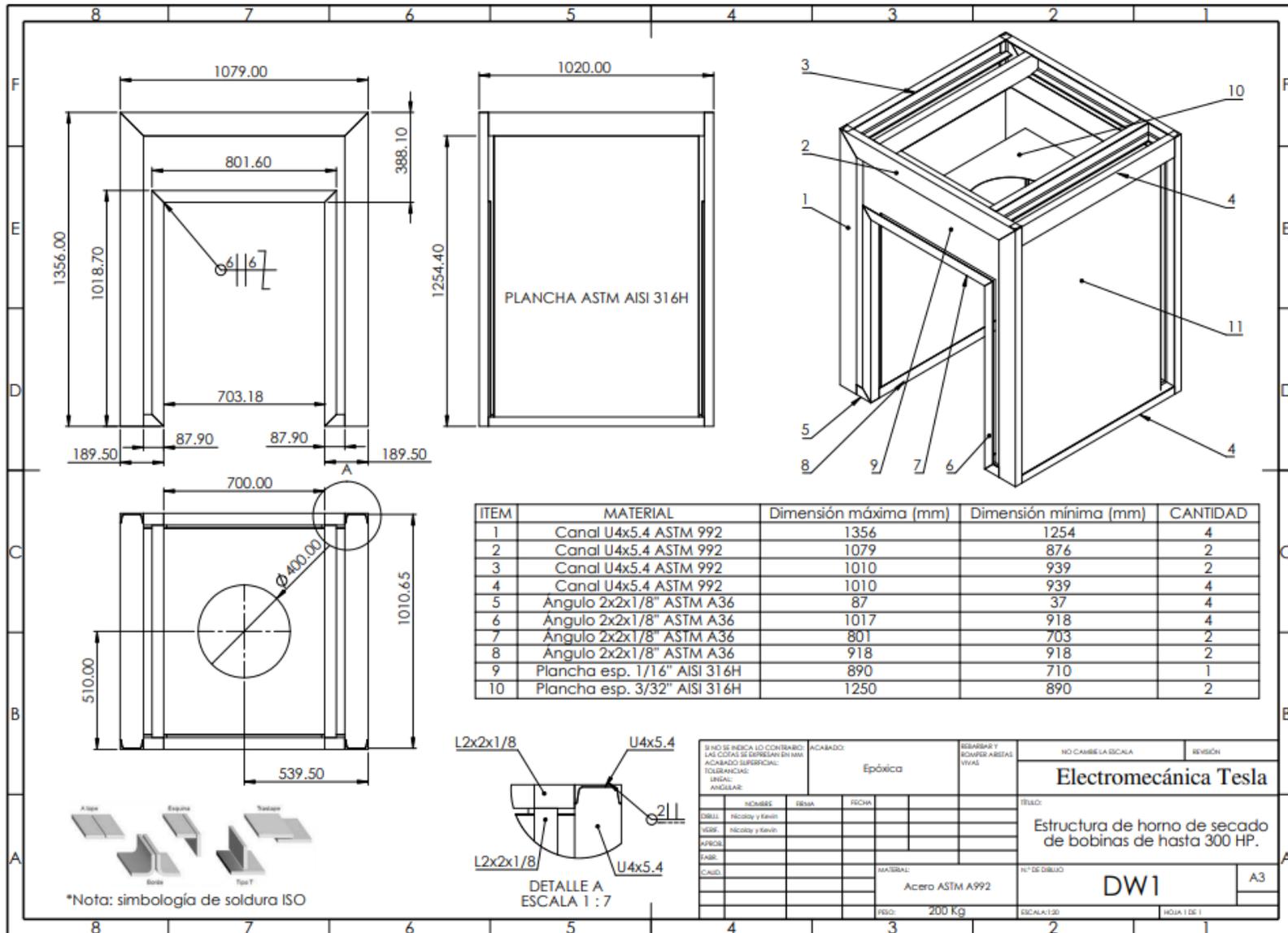
TABLA Notas F1.1 Tabla de Selección para la Aplicación de las Secciones del Capítulo F				
Sección en Capítulo F	Sección	Esbeltez Alta	Esbeltez Alma	Estados Límites
F2		C	C	Y, LTB
F3		NC, S	C	LTB, FLB
F4		C, NC, S	C, NC	Y, LTB, LLB, TFY
F5		C, NC, S	S	Y, LTB, LLB, TFY
F6		C, NC, S	N/A	Y, LTB
F7		C, NC, S	C, NC	Y, LTB, LLB
F8		N/A	N/A	Y, LTB
F9		C, NC, S	N/A	Y, LTB, LLB
F10		N/A	N/A	Y, LTB, LLB
F11		N/A	N/A	Y, LTB
F12	Perfiles asimétricos diferentes de ángulos simples	N/A	N/A	Todos

Y = fluencia, LTB = pandeo lateral-torsional, FLB = pandeo local ala, WLB = pandeo local alma, TFY = fluencia ala tracción, LLB = pandeo local ala, LB = pandeo local, C = compacto, NC = no-compacto, S = esbelto

Anexo 10: Plano eléctrico de horno con convección forzada.



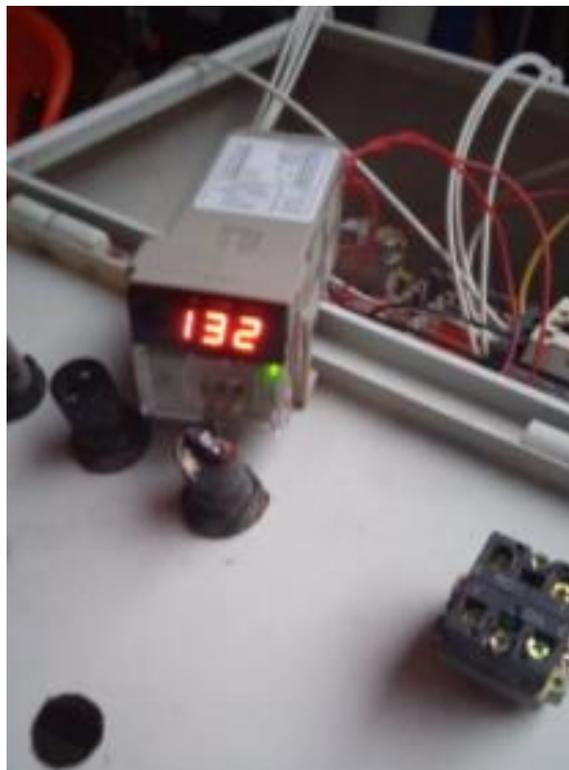
Anexo 11:



Anexo 12: Mantenimiento de motor de 20 HP previo al secado por convección forzada.



Anexo 13: Temperatura en el interior del horno 17 °C por encima del valor seteado para la prueba con convección natural con radiación.



Anexo 14: Operacionalización de la variable

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Escala de medición
Diseño óptimo	Acción de encontrar mejoras de una actividad o producto.	Priorizar parámetros para optimizar el diseño.	Control de temperatura	°C	90 - 130 °C
			Energía perdida	W	< 5 %
Temperatura de secado (dependiente)	Es una propiedad intensiva que expresan el nivel térmico de un sistema. (Cengel & Ghajar, 2011)	La diferencia de temperatura de dos cuerpos genera la transferencia de calor.	Temperatura ambiente	°C	< 200 °C
			Temperatura de secado		
Potencia eléctrica consumida (dependiente)	Es el trabajo eléctrico efectuado por unidad de tiempo. (Cengel & Ghajar, 2011)	Es la energía consumida por unidad de tiempo para cambiar el estado de una carga.	Trabajo eléctrico por unidad de tiempo $P_e = WI$	Watts	< 20KW
			Trabajo de flecha por unidad de tiempo $P_m = 2\pi nT$		
Esfuerzos (dependiente)	Es la intensidad de las fuerzas distribuidas en una sección. (Beer, Jhonston, Dewolft, & Mazurek, 2009)	Es la respuesta de un material frente a sollicitaciones de carga.	Esfuerzo normal	MPa	< 345 MPa
			Esfuerzo cortante		
			Resistencia a la fluencia		
Nivel de aislamiento de bobinas (independiente)	Es la resistencia al paso del flujo de electrones. (ZEMANSKY, 2009)	Resistencia de aislamiento de bobina de una máquina eléctrica.	Resistencia de aislamiento.		< 5.5 GΩ
Peso de la máquina eléctrica a secar (independiente)	Es la fuerza gravitacional que actúa sobre un cuerpo. (Cengel & Ghajar, 2011)	Es el peso del equipo eléctrico de 300 HP que se ingresará en la cámara de secado.	Geometría	mm.	De razón
			Masa	Kg	< 1200 Kg

Anexo 15: Instrumento de recolección de datos

N°	Técnica	Instrumento	Materiales
1	Observación directa e indirecta	Registro de observación	Ficha de observación Megóhmetro. Cámara fotográfica
2	Análisis documental	Hoja de cálculo en Excel SolidWorks simulations Algoritmo de cálculo	Computadora Computadora Libros Calculadora