



Rediseño de la línea de producción de cadenas transportadoras implementando un proceso de tratamiento térmico

Juan Manuel López Forero ^{1 a,d}, Valentina Martínez García ^{2 a,d}, Allison Olaya González ^{3 a,d}, Ismael Alquicira Perea Fernández ^{4 a,d}

Juan Camilo Paz Roa ^{b,d} Mario Fernando González Ramírez ^{c,d} Jesús Antonio Olaya Escobar ^e

^aEstudiantes de Ingeniería Industrial e Ingeniería Mecánica

^bDirector del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

^cCo-director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

^dPontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

^eAsesor de la empresa Mecanizados Industriales Cadenpal E.U

Resumen en español

Este informe presenta el rediseño del proceso productivo en Mecanizados Industriales Cadenpal E.U., empresa especializada en la fabricación de cadenas transportadoras para los sectores aceitero y azucarero. El objetivo principal del proyecto es reducir la pérdida de clientes, abordando los factores que la generan (costos elevados, tiempos de entrega y confiabilidad del proceso), lo que permitirá mejorar la calidad del producto, reducir costos y agilizar los tiempos de entrega. Para lograrlo, se analizan dos estrategias: la adquisición de un horno de inducción en China y el diseño y fabricación nacional de un sistema equivalente, comparando su viabilidad técnica, económica y operativa.

Para abordar esta problemática, el estudio se centra en la reorganización y mejora del proceso productivo, evaluando el impacto de cada alternativa en términos de integración con la distribución de planta, control de calidad, eficiencia energética y costos de mantenimiento. Desde la perspectiva mecánica, se analizarán los requerimientos técnicos de cada opción, incluyendo medidas de seguridad y durabilidad. Desde el enfoque de ingeniería industrial, se evaluará la inversión necesaria, la optimización del flujo de trabajo y la rentabilidad del proyecto. La implementación de la solución más viable permitirá no solo mejorar el desempeño productivo, sino también fortalecer la competitividad de Cadenpal en el mercado. Los resultados proyectados incluyen una reducción significativa en los tiempos de entrega, mejoras en indicadores económicos y un aumento en la satisfacción del cliente, consolidando a Cadenpal como un referente en su sector a nivel nacional e internacional.

Por la parte de Ingeniería Mecánica, se abordó el proceso de tratamiento térmico a los que se someten los pasadores de las cadenas transportadoras de bagazo, por lo cual se planteó el diseño y modelado de un horno de inducción a partir de solicitudes del cliente que se transformaron en requerimientos de ingeniería.

Palabras claves: Tratamientos térmicos, Distribución de planta, Líneas de producción, Pasadores, Inducción electromagnética, Horno

Tabla de contenido

I. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA O NECESIDAD	4
1. Contexto y justificación	4
2. Grupos de interés	5
3. Diagnóstico del problema o necesidad	6
3.1. Plan de recolección de datos	6
3.2. Medición del sistema actual	6
3.3. Análisis de causas	18
4. Objetivos	19
II. REVISIÓN DE LITERATURA	19
III. DISEÑO CONCEPTUAL Y PRELIMINAR	24
1. Requerimientos	24
1.1. Clarificación de objetivos	24
1.2. Análisis funcional	25
1.3. Fijación de requerimientos del cliente	27
1.4. Determinación de características de ingeniería	29
2. Exploración de ideas y selección de alternativa	30
2.1. Exploración y selección	30
2.2. Especificación del diseño preliminar	42
3. Plan de trabajo (PdT)	44
IV. DISEÑO DETALLADO (Resultados objetivos específicos)	48
1. Resultados del objetivo I (Diseño del mecanismo de horno de inducción y selección de componentes)	78

2. Integración de horno diseñado vs. Compra de horno comercial para optimizar capacidad productiva	85
3. Validación de alternativas de operación	103
V. CONCLUSIONES	105
VI. GLOSARIO	105
VII. REFERENCIAS	106
VIII. ANEXOS	109

Índice de Tablas

Tabla I. Indicadores de desempeño a medir	6
Tabla II. Criterios de Evaluación de los puntos críticos	7
Tabla III. Estructura de indicadores de desempeño	16
Tabla IV. Resultados de indicadores de desempeño de la tercerización del T.T (KPI'S)	17
Tabla V. Composición química del acero 4140	21
Tabla VI. Propiedades mecánicas del acero SAE 4140	22
Tabla VII. Clasificación de los T.T en los dos grupos	23
Tabla VIII. Fijación de requerimientos del cliente para la línea de productiva y el horno	27
Tabla IX. Notación para la dirección de mejora de los requerimientos de diseño	29
Tabla X. Notación para los requerimientos del cliente y los de ingeniería	30
Tabla XI. Criterios de selección para la alternativa del modelo de la línea productiva	31
Tabla XII. Análisis de criterios de selección desde un enfoque sistémico	33
Tabla XIII. Contraste de las alternativas con el criterio de eficiencia operativa	33
Tabla XIV. Contraste de las alternativas con el criterio de flexibilidad	33
Tabla XV. Contraste de las alternativas con el criterio de calidad del producto	33
Tabla XVI. Contraste de las alternativas con el criterio de costos de implementación y seguridad laboral	33
Tabla XVII. Contraste de las alternativas con el criterio de mantenimiento de operación	34
Tabla XVIII. Contraste de las alternativas con el criterio de sostenibilidad	34
Tabla XIX. Contraste de las alternativas con el criterio de seguridad laboral	34
Tabla XX. Definición de los criterios para la selección de la alternativa del horno	35
Tabla XXI. Referencias comerciales del mercado para los criterios de selección para la alternativa del horno	35
Tabla XXII. Calificación de los criterios de selección para la alternativa de diseño del horno	36
Tabla XXIII. Normatividades y Descripciones de cada una	41
Tabla XXIV. Plan de Trabajo	45
Tabla XXV. Análisis Morfológico del Sistema de Calentamiento	50
Tabla XXVI. Análisis Morfológico del tipo de Sistema de Posicionamiento de Pasadores	51
Tabla XXVII. Análisis Morfológico del Sistema de Enfriamiento y Extracción de calor	52
Tabla XXVIII. Análisis Morfológico de Materiales y Estructura del mecanismo	53
Tabla XXIX. Análisis Morfológico del Sistema de Monitoreo y Control	54
Tabla XXX. Tipos de señales electrónicas	55
Tabla XXXI. Listado de señales de todo el proceso de tratamiento térmico	56
Tabla XXXII. Selección del Controlador Lógico Programable (PLC)	60
Tabla XXXIII. Pantalla seleccionada para proyectar la interfaz HMI	61
Tabla XXXIV. Selección del protocolo de comunicación	62
Tabla XXXV. Selección de los sensores de monitoreo	63
Tabla XXXVI. Selección de los cables y accesorios	64
Tabla XXXVII. Costo total del sistema de monitoreo y control del horno	65
Tabla XXXVIII. Tareas de instalación del sistema de control	66
Tabla XXXIX. Conductividad térmica de los materiales de la bobina	71
Tabla XL. Especificaciones técnicas de la bobina seleccionada	79
Tabla XLI. Datos necesarios para calcular la radiación emitida por el pasador	81
Tabla XLII. Especificaciones técnicas de la bobina y del equipo de alimentación	82
Tabla XLIII. Valores de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales que componen cada pieza del equipo de alimentación	84
Tabla XLIV. Costos de los equipos asociados al montaje eléctrico del horno	87
Tabla XLV. Tareas de instalación del sistema de calentamiento y días de ejecución	87
Tabla XLVI. Especificaciones técnicas del anillo de enfriamiento seleccionado	90
Tabla XLVII. Especificaciones técnicas del chiller seleccionado	94
Tabla XLVIII. Materiales de los componentes del chiller y la función de cada una de las piezas del equipo	96
Tabla XLIX. Consideraciones necesarias y días de ejecución para la instalación del chiller	97
Tabla L. Criterios de selección para el mecanismo de posicionamiento y transporte de los pasadores	99
Tabla LI. Dimensiones de los componentes	102
Tabla LII. Especificaciones técnicas de la guía de desplazamiento lineal	104
Tabla LIII. Criterios de selección del material de la estructura	106
Tabla LIV. Costo final del diseño y selección de equipos para el proceso de T.T	110
Tabla LV. Especificaciones técnicas de cada uno de los elementos de unión roscada usados entre soporte y tanque de agua	113
Tabla LVI. Parámetros para el cálculo de cargas y esfuerzos aplicados en los tornillos del soporte del tanque de agua	115
Tabla LVII. Especificaciones técnicas de cada uno de los elementos de unión roscada usados en pared estructural	117
Tabla LVIII. Especificaciones técnicas de cada uno de los elementos de unión roscada usados entre soporte, pared y piso	118
Tabla LIX. Piezas que componen la guía deslizante con sus respectivos materiales asignados	124
Tabla LX. Especificaciones técnicas del motor de paso controlado seleccionado	126
Tabla LXI. Diagrama Multiproducto	142

Índice de Figuras

Figura I. Plano de la planta de producción (Dimensiones en metros)	10
Figura II. Cadena de Transporte ensamblada	10
Figura III. Composición de una cadena transportadora	12
Figura IV. Pasadores fabricados en cadenpal	12
Figura V. Diagrama de flujo del proceso	13
Figura VI. Planos del pasador (dimensiones en milímetros)	14
Figura VII. Planos del pasador (dimensiones en milímetros)	14
Figura VIII. Posibles medidas de las cadenas con su respectiva resistencia de la rotura.	15
Figura IX. Diagrama de Espina de Pescado de Causas	18
Figura X. Proceso de tratamiento térmico por inducción electromagnética	23
Figura XI. Calentamiento por inducción de un eje	24
Figura XII. Calentamiento por inducción en una rueda dentada	24
Figura XIII. Árbol de objetivos del rediseño de la línea productiva	25
Figura XIV. Caja negra del proceso productivo de Cadenpal	26
Figura XV. Caja transparente del proceso productivo de Cadenpal	26
Figura XVI. Caja negra del horno de tratamiento térmico	27
Figura XVII. Caja transparente del horno de tratamiento térmico	27
Figura XVIII. Casa de la Calidad para el horno	30
Figura XIX. Metodología AHP para la selección de alternativa	32
Figura XX. Horno de inducción sin núcleo	37
Figura XXI. Horno de inducción de canal	37
Figura XXII. Horno de inducción para fundición	38
Figura XXIII. Horno de inducción para T.T	38
Figura XXIV. Ley de inducción de Faraday (voltaje)	39
Figura XXV. Ley de inducción de Faraday (corriente)	39
Figura XXVI. Arreglo de electrones cuando se mueven de forma aleatoria	39
Figura XXVII. Horno de inducción de la marca Jin Lay	42
Figura XXVIII. Horno de inducción de la marca JL-AC-6HP	42
Figura XXIX. Diseño manual con posible ubicación del horno de inducción (Dimensiones en metros)	43
Figura XXX. Diseño conceptual del horno	43
Figura XXXI. Diseño conceptual vista interna del horno	44
Figura XXXII. Diseño conceptual vista isométrica del horno	44
Figura XXXIII. Diagrama y curvas de transformación isotérmica del acero SAE 4140	49
Figura XXXIV. Diagrama y curvas de transformación isotérmica del acero SAE 4140	50
Figura XXXV. Ciclo térmico definido para el tratamiento de temple	51
Figura XXXVI. Profundidad del calentamiento en la superficie radial del pasador	52
Figura XXXVII. Curvas estándar del ensayo Jominy para el acero AISI 4140	53
Figura XXXVIII. Ensayo de temperabilidad Jominy del acero y sus efectos en la dureza	53
Figura XXXIX. Barra de metal de tipo carril DIN	60
Figura XL. Borneras y tornillos para armado del tablero	61
Figura XLI. Módulo de comunicación seleccionado	63
Figura XLII. Vista frontal del tablero de control	66
Figura XLIII. Vista lateral del tablero de control	66
Figura XLIV. Calentamiento de un pasador a partir de la ley de inducción de Faraday y el efecto Joule	68
Figura XLV. Diseño de una bobina tipo pancake	69
Figura XLVI. Diseño de bobina tipo cilíndrica	69
Figura XLVII. Plano de vista isométrica de la bobina y el pasador	70
Figura XLVIII. Plano de vista superior de la bobina y el pasador	70
Figura XLIX. Configuración de los nueve pasadores/20 minutos en las tres bobinas configuradas	75
Figura L. Gráfico de las dimensiones de bobina que cubren un área de sección de calentamiento definida para el pasador	78
Figura LI. Bobina de cobre seleccionado.	81
Figura LII. Fuente de alimentación seleccionada del mercado según parámetros calculados	83
Figura LIII. Sistema de refrigeración cerrado	85
Figura LIV. Tubos de enfriamiento de la fuente de alimentación	86
Figura LV. Esquema de interconexión entre dispositivos que conforman el equipo de inducción	86
Figura LVI. Carrete de cable #8 tipo AWG.	87
Figura LVII. Tablero eléctrico trifásico a utilizar	87
Figura LVIII. Anillo de enfriamiento seleccionado del mercado	90
Figura LIX. Esquema del ciclo de refrigeración del chiller seleccionado	93
Figura LX. Referencia de Chiller de la empresa Mecalor seleccionado	95
Figura LXI. Ejemplo del sistema de cremallera-piñón acoplado a un servomotor	101
Figura LXII. Representación de los movimientos rectilíneo y circular del mecanismo cremallera-piñón	102
Figura LXIII. Diseño conceptual preliminar del sistema de cremallera-piñón acoplado al movimiento del pasador	103
Figura LXIV. Bosquejo de la estructura del sistema de sujeción del pasador y su movimiento	103
Figura LXV. Guía de deslizamiento lineal seleccionada	104

Figura LXVI. Sistema de posicionamiento y movimiento axial de una muestra en horno de inducción en la industria	105
Figura LXVII. Tercer diseño conceptual preliminar realizado por el estudiante de Ingeniería mecánica	107
Figura LXVIII. Vista frontal de los dos orificios de sujeción a los ejes	110
Figura LXIX. Vista isométrica del anillo de enfriamiento	110
Figura LXX. Diseño CAD del ensamble entre el pasador y el anillo de enfriamiento	111
Figura LXXI. Diseño CAD del tanque de agua	111
Figura LXXII. Diseño CAD del soporte de metal que sostiene el tanque de agua	112
Figura LXXIII. Vista de la unión del tornillo y la tuerca entre los espesores de los materiales	114
Figura LXXIV. Vista isométrica de la pared estructural junto con sus partes de unión detalladas	116
Figura LXXV. Diseño CAD del soporte de la pared junto con sus partes de unión detalladas	117
Figura LXXVI. Vista del ensamble entre los dos ejes de soporte con el anillo de enfriamiento	118
Figura LXXVII. Vista isométrica del eje primario que soporta el pasador	119
Figura LXXVIII. Vista isométrica del eje secundario del sistema de ejes	119
Figura LXXIX. Vista isométrica del eje terciario del sistema de ejes	119
Figura LXXX. Vista isométrica del gancho que soporta el pasador	120
Figura LXXXI. Vista isométrica del pasador sujetado por el gancho	120
Figura LXXXII. Croquis de la vista superior del gancho de soporte del pasador	121
Figura LXXXIII. Vista de la parte más crítica del sistema mecánico diseñado para los ejes de movimiento axial del pasador	122
Figura LXXXIV. Vista isométrica de la placa de unión	123
Figura LXXXV. Vista isométrica de la guía de deslizamiento lineal junto con sus partes	123
Figura LXXXVI. Vista frontal de la guía de deslizamiento lineal	123
Figura LXXXVII. Vista frontal de la unión entre el soporte que sujeta la cremallera y el anillo deslizante	124
Figura LXXXVIII. Vista isométrica de la cremallera	125
Figura LXXXIX. Vista isométrica del piñón	125
Figura XC. Motor de paso controlado seleccionado. Tomado de un catalogo de Mercado Libre Colombia	126
Figura XCI. Vista isométrica del motor y acoplado al mecanismo	127
Figura XCII. Vista isométrica del ensamble final del diseño mecánico del movimiento axial del pasador	127
Figura XCIII. Vista frontal del ensamble final del diseño mecánico del movimiento axial del pasador	128
Figura XCIV. Vista isométrica explosionada del diseño mecánico final y vista frontal	128
Figura XCV. Vista isométrica final del horno para tratamiento térmico por inducción de los pasadores con sus partes	129
Figura XCVI. Vista isométrica final del horno para tratamiento térmico por inducción de los pasadores con sus partes	130
Figura XCVII. Vista isométrica final del horno para tratamiento térmico por inducción de los pasadores con sus partes	130
Figura XCVIII. Materias primas para cadena referencia 2100	131
Figura XCIX. Flujograma del proceso actual de Cadempal	132
Figura C. Distribución de la planta actual	133
Figura CI. Flujo del proceso rodillos	134
Figura CII. Flujo del proceso de bujes y pasadores	135
Figura CIII. Flujo del proceso de platinas	136
Figura CIV. Distribución prevista para la llegada del horno	137
Figura CV. Distribución prevista para la llegada del horno (bujes y pasadores)	138
Figura CVI. Distribución prevista para la llegada del horno (platinas)	139
Figura CVII. Matriz de relación de actividades	141
Figura CVIII. Valores de cercanía y tipos de relación para análisis de distribución de planta	142
Figura CIX. Cálculo de unidades de area por departamento según estándar SLP	142
Figura CX. Conjunto de departamentos productivos para análisis de distribución de planta	143
Figura CXI. Priorización de departamentos según relaciones importantes y unidades	143
Figura CXII. Resultado gráfico de la distribución de planta nueva y considerando restricciones	144
Figura CXIII. Áreas de la planta implementando valores de cercanía y tipos de relación para análisis de distribución en planta	144
Figura CXIV. Distribución propuesta SLP para rodillos	145
Figura CXV. Distribución propuesta SLP para pasador y buje	146
Figura CXVI. Distribución propuesta SLP para platinas	147
Figura CXVII. Valores calculados de la capacidad máxima de la planta, por áreas	149
Figura CXVIII. Cantidad de piezas, por áreas	150
Figura CXIX. Supuestos técnicos y financieros para el análisis de inversión del horno de T.T	151
Figura CXX. Comparación de costos entre la compra del horno y el diseño	151
Figura CXXI. Comparación de los costos operativos anuales entre la compra del horno y el diseño	151
Figura CXXII. Proyección de los flujos de caja de las dos alternativas	152
Figura CXXIII. Simulación situación actual	153
Figura CXXIV. Simulación situación actual	153

PROJECT CHARTER

Rediseño de la línea de producción de cadenas transportadoras implementando un proceso de tratamiento térmico

Breve resumen del Proyecto (Business case)

Este informe analiza la internalización del tratamiento térmico en Mecanizados Industriales Cadenpal E.U. para mejorar calidad, reducir costos y agilizar entregas. Se comparan dos opciones: adquirir un horno de inducción en China o fabricarlo a nivel nacional, evaluando su viabilidad técnica, económica y operativa. La implementación de la mejor alternativa optimizará el proceso productivo, fortalecerá la competitividad de la empresa y mejorará la satisfacción del cliente.

Problema (Problem)

La tercerización del tratamiento térmico y una distribución ineficiente de la planta generan retrasos, costos elevados y variaciones en la calidad, provocando la pérdida de clientes y afectando la competitividad de Cadenpal.

Impacto en los Actores (Business Need – Stakeholders)

La implementación de un sistema de tratamiento térmico interno y la optimización de la distribución de planta mejorarán la eficiencia operativa de Cadenpal, reduciendo costos, tiempos de entrega y asegurando un mayor control de calidad. Además, una mejor organización en la planta permitirá un flujo de trabajo más eficiente, optimizando el uso de los recursos y mejorando la coordinación entre procesos. Estos cambios aumentarán la satisfacción del cliente, fortalecerán su competitividad en el mercado y facilitarán su expansión a nuevos sectores, impulsando su crecimiento y rentabilidad.

Objetivo General (Goal statement)

Rediseñar el proceso productivo de Mecanizados Industriales Cadenpal E.U. para integrar un proceso de tratamiento térmico, con el fin de mejorar los indicadores claves de desempeño de producción.

Objetivos Específicos (Project Scope)

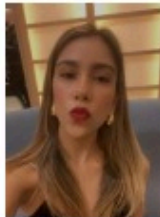
1. Diseñar un horno de inducción que cumpla con los parámetros técnicos específicos de la empresa para el tratamiento térmico de los pasadores de las cadenas, garantizando compatibilidad con el proceso productivo.
2. Desarrollar dos alternativas de operación del proceso productivo, una que contemple la integración del horno diseñado y otra que considere la compra de un horno comercial, mediante la definición de sus procedimientos y distribución de planta para mantener o aumentar la capacidad de producción.
3. Validar, mediante análisis cualitativos y cuantitativos, el impacto de la implementación del sistema de tratamiento térmico en la productividad, la calidad del producto y los costos operativos de la empresa.

Equipo de trabajo (Team Members)

Allison Olaya



Valentina Martínez



Juan Manuel López



Ismael Perea



PLAN DE TRABAJO PROPUESTO

Análisis de requerimientos técnicos, cap de planta y adecuaciones

Evaluación financiera de inversión tercerización y presupuesto

Análisis técnico y económico entre el diseño interno y modelos comerciales

Reorganización del espacio y flujo de producción.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA O NECESIDAD

1. Contexto y justificación

Mecanizados Industriales Cadenpal E.U. es una empresa mediana ubicada en la ciudad de Palmira, Colombia, dedicada a la fabricación de cadenas transportadoras y mecanizados para sectores industriales clave, como el de la caña de azúcar y el aceite de palma. Desde su fundación en 2005, la empresa ha experimentado un crecimiento constante, consolidándose como una de las compañías tecnológicamente más avanzadas en su sector dentro de la región.

En sus inicios, Cadenpal se enfocó en la reparación de cadenas transportadoras existentes. En ese entonces, la compañía operaba de manera empírica y con herramientas manuales, atendiendo a un mercado local que incluía ingenios de caña de azúcar como Carmelita y trapiches paneleros. La capacidad de la empresa para ofrecer soluciones prácticas y adaptadas a las necesidades específicas de sus clientes le permitió construir una sólida reputación en el sector. Con el paso del tiempo, Cadenpal identificó una creciente demanda del mercado, donde los clientes exigían mayor calidad, tiempos de entrega más ajustados y procesos de mecanizado más precisos. Para responder a estos desafíos, la empresa apostó por la innovación tecnológica, incorporando maquinaria avanzada que optimizó su capacidad productiva. Esta modernización fue crucial para mantener su competitividad y garantizar altos estándares en sus productos. La actualización de equipos, herramientas y una mejor capacitación en materiales permitió mejorar la eficiencia operativa y la calidad de las cadenas lo cual le genera a la empresa, menor riesgo en pérdida de clientes. Gracias a esta estrategia, Cadenpal no sólo consolidó su base de clientes, sino que también logró expandir su alcance en el mercado.

Hoy en día, la empresa cuenta con una cartera de clientes que incluye algunos de los ingenios más destacados como: Ingenio Manuelita Colombia, Ingenio Manuelita Perú, Ingenio Mayagüez, Ingenio Rio Paila Castilla e Ingenio La Cabaña, entre otros. Además, ha expandido su mercado al sector del aceite de palma, trabajando con clientes como Ingenio Tecnointegral, Ingenio Humea e Ingenio Guaicaramo. El crecimiento de la empresa también se ha visto impulsado por la creación de alianzas comerciales estratégicas. Actualmente, Cadenpal trabaja de la mano con dos importantes comercializadoras: Acero Industria y Jhamesa. Estas asociaciones han permitido a la empresa expandir su alcance en el mercado y asegurar un suministro constante de materiales de alta calidad, fundamentales para la fabricación de sus productos.

Una de las fortalezas clave de Cadenpal radica en la utilización de aceros especiales importados para la fabricación de sus cadenas transportadoras. Estos aceros provienen de países como Suiza, Brasil e India, lo que garantiza la calidad y durabilidad de los productos finales. En particular, las barras laterales son fabricadas con acero suizo, mientras que los aceros redondos, utilizados en bujes, rodillos y pasadores, provienen de Brasil e India. La empresa se enfrenta a un cuello de botella crítico en su proceso de fabricación debido a la tercerización del tratamiento térmico por inducción electromagnética para los pasadores. Esta práctica externa genera retrasos significativos en los tiempos de entrega, incrementando los costos y poniendo en riesgo la competitividad de la compañía en un mercado altamente demandante. Para solucionar esta problemática, se plantea la internalización de este proceso a través del rediseño del proceso productivo, evaluando dos alternativas: la adquisición de un horno de inducción en China o el diseño y fabricación de un sistema nacional.

La implementación de un sistema de tratamiento térmico in-house no solo permitiría reducir drásticamente los tiempos de entrega y los costos asociados, sino que también mejoraría la fiabilidad de la calidad de las piezas, minimizando errores y garantizando una mayor consistencia en el producto. Esto debido a que la tercerización de este proceso ha resultado en varios problemas en la venta de la empresa, que se pueden dividir en tres categorías principales, ordenadas por su importancia:

- **Costos elevados:** La externalización del tratamiento térmico genera costos adicionales significativos, reduciendo la rentabilidad e incluso eliminando el margen de ganancia en algunos casos. Esto impacta directamente las utilidades de la empresa.
- **Confiabilidad para los clientes:** Muchos clientes prefieren que todos los procesos de fabricación se realicen internamente. La tercerización de una etapa crítica puede generar desconfianza en la calidad y consistencia del producto, afectando la reputación de Cadenpal y su relación con el mercado.

Retrasos en los tiempos de entrega: La subcontratación del tratamiento térmico añade hasta 10 días al proceso productivo, elevando el tiempo total de fabricación a un mínimo de 40 días. Esto coloca a Cadenpal en desventaja frente a competidores con procesos completamente internos, afectando su capacidad de respuesta en un mercado donde la puntualidad es clave para la satisfacción y fidelización del cliente. Aunque la empresa es

un aliado valioso para muchos ingenios colombianos debido a su ubicación geográfica y la escasez de oferentes en este mercado, la falta de control sobre tiempos y calidad ha afectado su reputación y oportunidades de negocio. Evaluar la mejor alternativa para internalizar este proceso permitirá a Cadenpal mejorar su competitividad y explorar nuevas posibilidades en términos de materiales y tecnologías.

Para la toma de decisiones en la implementación del tratamiento térmico in-house, se llevará a cabo un levantamiento detallado de información dentro de Cadenpal. Esto incluirá la recopilación de datos clave como requerimientos de capacidad, consumo energético, dimensiones y especificaciones técnicas necesarias para garantizar una integración eficiente en la línea de producción. A partir de esta información, se definirán los requerimientos de diseño desde la perspectiva de la ingeniería mecánica, asegurando que el sistema seleccionado cumpla con las necesidades operativas de la empresa.

Una vez establecidos estos parámetros, se realizará una comparativa exhaustiva entre el mejor modelo desarrollado por el equipo de ingeniería mecánica y las opciones disponibles en el mercado chino que mejor se ajusten a estos requerimientos. Además, se llevará a cabo un análisis financiero integral que evalúe el costo actual de la tercerización del tratamiento térmico, permitiendo estimar con precisión el presupuesto necesario para la implementación del proyecto. Este enfoque garantizará que la elección final no solo mejore la eficiencia operativa y la calidad del producto, sino que también representa la mejor inversión a largo plazo para la sostenibilidad y crecimiento de Cadenpal.

2. *Grupos de interés*

Durante el desarrollo de este proyecto, y con el apoyo de la gerencia de Mecanizados Industriales Cadenpal E.U., se han identificado diversos grupos de interés que podrían verse afectados por la implementación del sistema de tratamiento térmico por inducción electromagnética. Estos actores pueden experimentar impactos tanto positivos como negativos, dependiendo de cómo se desarrolle y se implemente la tecnología. Además, se consideran entidades gubernamentales relacionadas con la regulación y el desarrollo del sector industrial.

Impactos Positivos

Algunos grupos de interés podrían beneficiarse con la incorporación de esta tecnología, ya que su implementación podría generar mejoras en la compañía. Entre estos actores se encuentran:

- Mecanizados Industriales Cadenpal E.U.: La empresa podría optimizar sus procesos productivos y mejorar su posición en el mercado.
- Clientes de Cadenpal: En caso de que la tecnología funcione como se espera, podrían recibir productos con estándares mejorados y tiempos de entrega más cortos.
- Operadores y Personal de Producción: La automatización del tratamiento térmico podría impactar su carga laboral y la seguridad en sus tareas diarias.
- Entidades Gubernamentales y Organismos de Regulación: La adopción de nuevas tecnologías en la industria metalmeccánica podría contribuir al cumplimiento de normativas ambientales, laborales y de seguridad.
- Economía Local y Sector Industrial: Dependiendo de los resultados del proyecto, la empresa podría aumentar su capacidad operativa y generar un impacto en su entorno económico.

Impactos Negativos

También existen grupos de interés que podrían verse afectados en caso de que la implementación de esta tecnología genere cambios en la estructura del mercado o en las relaciones comerciales de Cadenpal. Entre estos se encuentran:

- Empresas Competidoras: Si la optimización del proceso le da una ventaja competitiva a Cadenpal, otras empresas del sector podrían enfrentar desafíos para mantener su posicionamiento.
- Proveedores de Tratamiento Térmico Externo: La reducción de la tercerización podría impactar la demanda de sus servicios.

3. *Diagnóstico del problema o necesidad*

Se diagnosticó que la tercerización del tratamiento térmico genera ineficiencias sistémicas: interrumpe el flujo productivo al requerir transporte externo, dificulta el control estadístico de calidad al depender de estándares ajenos, y limita la flexibilidad para ajustar parámetros según requerimientos específicos de clientes.

3.1. Plan de recolección de datos

En este apartado se estructura el plan de recolección de datos necesarios para comprender el problema de la empresa y la necesidad de rediseñar la línea productiva. Se estableció la medición de las variables de la Tabla I como punto de partida para el análisis. Estas variables se utilizarán posteriormente para construir los indicadores clave de desempeño que facilitarán su evaluación.

Tabla I. Indicadores de desempeño a medir

VARIABLE	TIPO	OBJETIVO	DESCRIPCIÓN
Costo del tratamiento térmico	Cuantitativo	Medir el total de gastos incurridos en la tercerización del proceso de tratamiento térmico en Medellín incluyendo transporte, costos, para evaluar la rentabilidad del proceso.	Medición de los costos fijos y variables asociados a la tercerización del proceso de tratamiento térmico en Medellín.
Tiempo de fabricación y entrega	Cuantitativo	Evaluar el tiempo total desde el inicio de la producción hasta la entrega del producto final, evaluando la capacidad de cumplir con los plazos de entrega.	Evaluación de los tiempos de trabajo desde el montaje inicial del material hasta que la pieza queda terminada, esta variable tiene en cuenta el tiempo de transporte a Medellín y entrega final
Capacidad Instalada	Cuantitativo	Calcular el aumento en la capacidad de producción de la planta antes y después de implementar el tratamiento térmico in-house.	Cálculo del análisis de flujo de material en las máquinas, permitiendo comparar el volumen de producción actual con el proceso de tratamiento térmico <i>in-house</i> .

La recolección de datos para el análisis de las alternativas de adquisición de un sistema de tratamiento térmico se llevó a cabo mediante entrevistas y reuniones con operarios, jefes de producción y la gerencia de Cadenpal. Este proceso permitió obtener una visión integral del funcionamiento de la línea productiva y de las limitaciones actuales derivadas de la tercerización del tratamiento térmico.

Los operarios destacaron los cuellos de botella en el proceso productivo, como los retrasos en la recepción de materiales y la falta de sincronización entre las etapas de fabricación, lo que genera tiempos muertos y reduce la eficiencia. También señalaron dificultades logísticas, como la demora en el transporte de piezas para el tratamiento térmico externo. Por su parte, los jefes de producción identificaron problemas en la planificación debido a la incertidumbre en los tiempos de entrega del proveedor externo, lo que dificulta la programación de actividades y la gestión de inventarios. Además, resaltaron la falta de control sobre la calidad del tratamiento térmico, ya que los estándares no siempre se cumplen, lo que obliga a reprocesos y afecta la satisfacción del cliente. En las reuniones con la gerencia, se discutió cómo estos desafíos impactan los costos operativos y la competitividad de la empresa, así como la necesidad de internalizar el tratamiento térmico para reducir la dependencia de terceros, mejorar la calidad y optimizar los tiempos de entrega. Estas perspectivas permitieron alinear el análisis con los objetivos estratégicos de la empresa, proponiendo soluciones y un plan que aborde tanto los problemas operativos como los financieros.

3.2. Medición del sistema actual

Cadenpal, empresa metalmeccánica dedicada a la fabricación de cadenas transportadoras para la industria del bagazo y el aceite de palma, opera en un entorno influenciado por factores económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales. La variabilidad en los costos de insumos y las condiciones del mercado afectan la rentabilidad de proyectos como la instalación de un horno de tratamiento térmico. Socialmente, la falta de capacitación formal en la mano de obra requiere esfuerzos adicionales en formación y condiciones laborales. En el ámbito tecnológico, la adopción de nuevas herramientas es clave para mejorar la eficiencia y los tiempos de entrega. A nivel ambiental, cumplir con normativas de sostenibilidad y gestión de emisiones es esencial, mientras que, legalmente, la empresa debe adherirse a regulaciones de seguridad industrial y operación de maquinaria.

El sector de la caña de azúcar, principal mercado de Cadenpal, enfrenta desafíos similares. La fluctuación de los precios internacionales y los costos de producción impactan su viabilidad económica. Existe una creciente presión social por prácticas laborales responsables y sostenibles. La modernización tecnológica es fundamental para optimizar procesos y calidad. En lo ambiental, las regulaciones sobre uso eficiente de recursos y reducción de emisiones son prioritarias. Legalmente, el cumplimiento de normativas de producción y comercio es clave para acceder a mercados internacionales y mantener la competitividad.

Para evaluar la posición de Cadenpal en este entorno, se utilizó el modelo de las Cinco Fuerzas de Porter, el cual analiza la estructura competitiva de una industria mediante cinco factores: el poder de negociación de proveedores y clientes, la amenaza de nuevos entrantes y productos sustitutos, y la rivalidad entre competidores. En este análisis, se identificó un mercado altamente competitivo donde la calidad y los tiempos de entrega son determinantes. La amenaza de nuevos competidores es moderada debido a las altas barreras de entrada que supone la inversión en tecnología avanzada y el conocimiento especializado en procesos como el tratamiento térmico. La dependencia de proveedores de insumos clave puede afectar costos y estabilidad de producción. Además, los clientes exigen productos de alta calidad a precios competitivos, lo que convierte la instalación de un horno de tratamiento térmico en una ventaja estratégica para la empresa.

Tanto Cadenpal como el sector de la caña de azúcar operan en un contexto dinámico que requiere un enfoque estratégico basado en sostenibilidad, innovación y cumplimiento normativo. La inversión en tecnología como el horno de tratamiento térmico no sólo optimizará los procesos y mejorará la calidad del producto, sino que fortalecerá la posición de la empresa en el mercado, permitiéndole adaptarse a un entorno en constante evolución.

Los resultados obtenidos en la **Tabla II** permiten cuantificar de forma sencilla y visual el impacto de cada fuerza sobre la competitividad de una empresa. En el parámetro de la rivalidad entre competidores, se otorga una calificación de 5, ya que Cadenpal se mueve en un mercado altamente competitivo y cuenta con numerosos rivales.

Tabla II. Criterios de Evaluación de los puntos críticos

Puntos Críticos	Ponderación	Descripción
Rivalidad entre competidores	5	Otros fabricantes también pueden estar implementando tecnología avanzada para reducir costos y mejorar la calidad.
Poder de los proveedores	4	Aunque la materia prima es nacional, depende de un mercado de acero especializado con fluctuaciones de precio.
Poder de los compradores	5	Perder un cliente es costoso debido al alto volumen de compra, y los compradores valoran mucho la fiabilidad.
Amenaza de nuevos entrantes	3	Debido a la inversión en tecnología necesaria para competir en este sector.
Amenaza de productos sustitutos	1	Ya que las cadenas transportadoras son indispensables en la industria del azúcar y el aceite de palma.

En el segundo parámetro, el poder de los proveedores, se da un calificativo de 4, ya que estos tienen mucha influencia en cuanto al aumento de los precios o la restricción de suministros. Además de ello, Cadenpal podría abastecerse mediante otros proveedores, pero no sería lo ideal, teniendo en cuenta los regímenes de calidad y el cumplimiento de los pedidos. En el ítem del poder de los compradores, se le otorga una calificación de 5, ya que los principales clientes de Cadenpal cuentan con gran poder de negociación.

Para la amenaza de nuevos entrantes al mercado, se califica con un 3, considerando que no es un sector fácil de penetrar. Existen barreras significativas para la entrada de competencia directa para Cadenpal. Por último, en el ítem de amenaza de productos sustitutos, se otorga una calificación de 1, lo cual indica que no hay muchos artículos sustitutos accesibles que podrían reemplazar la mercancía o servicio brindado por la empresa.

Ventaja Competitiva

Muchos factores aumentan la competitividad de Cadenpal frente a otras empresas del sector. El producto principal de la organización, las cadenas transportadoras para el bagazo de caña de azúcar son esenciales para los ingenios azucareros. La demanda de estas cadenas se mantiene estable, ya que la industria de la caña es vital para la economía de la región. A continuación, se llevó a cabo un análisis de las tendencias actuales del mercado en el sector azucarero, tanto en Colombia como a nivel global.

Ventajas del mercado

- **Crecimiento en el sector de la caña de azúcar:** La producción de azúcar va en aumento, sumado al auge de la bioenergía, lo que genera una mayor demanda de componentes industriales de alta calidad que puedan suplir estas necesidades.
- **Expectativas de calidad:** Los clientes del sector son altamente exigentes en cuanto a la calidad de los productos debido a las duras condiciones de trabajo en los ingenios, por lo que buscan proveedores confiables en sus procesos internos.
- **Impacto en la economía:** Cerca del 2.8% del Producto Interno Bruto de Colombia (PIB) es producido por el sector azucarero, es un gran indicador económico para el país, esto ha contribuido a que Colombia tenga una participación del 1,3% en el mercado mundial de la caña de azúcar.

Factores

- **Político:** Las regulaciones en Colombia respecto a la producción industrial son favorables, aunque los acuerdos comerciales pueden afectar la importación de aceros especiales. La empresa desde su fundación ha cumplido a cabalidad la Ley 9 de 1991, que establece el régimen de aduanas y comercio exterior según sus medidas arancelarias. Es por esto que Cadenpal es beneficiario de la Ley 590 de 2000 que ofrece incentivos a empresas que invierten en la modernización y competitividad de la industria.
- **Social:** La empresa tiene una relación sólida con clientes importantes de alto volumen. El incumplimiento de tiempos de entrega o calidad afecta gravemente su reputación y podría ocasionar la pérdida de clientes, lo que significa grandes daños debido al valor de los contratos que se establecen en los negocios. Su estratégica ubicación en Palmira muy cercana a varios de los ingenios más importantes del país hace que sea mucho más fácil establecer negocios y con estas organizaciones, siendo Cadenpal en uno de sus principales proveedores de cadenas transportadoras. Por otra parte, esto también disminuye los costos de transporte que se ven reflejados en los precios de venta.
- **Económico:** Cadenpal se ha caracterizado desde su fundación por ser tener precios accesibles para su cartera de clientes, los costos de los productos pueden variar según la materia prima que se esté utilizando y el tamaño de las cadenas que los clientes requieran procurando utilidades para la compañía y a su vez precios más bajos que la competencia.
- **Diferenciación:** La empresa cuenta con canales de distribución digitales como redes sociales: Whatsapp corporativo, Instagram y Facebook donde establecen estrategias de comunicación con sus clientes de manera mucho más rápida y sofisticada. Esta empresa tiene una gran cuota de publicidad visual y acercamiento telefónico con sus clientes más cercanos en la ciudad de Palmira.
- **Tecnológico:** La tecnología del tratamiento térmico por inducción electromagnética permite mayor precisión y control sobre la calidad del producto, lo que disminuirá los riesgos de defectos en las piezas tratadas. La inducción de corrientes eléctricas aumenta la resistencia interna del material evitando fracturas internas en la pieza a largo plazo. Implementar este sistema sería innovador y novedoso ya que muchas empresas del sector no tienen incorporado estos procesos, también lo tercerizan, eso generaría una gran ventaja competitiva.
- **Ecológico:** Un proceso más eficiente y menos dependiente de servicios de transporte también contribuye a reducir la huella de carbono de la empresa hacia el medio ambiente, es por esto que Cadenpal cumple con todas las regulaciones medioambientales como la Ley 99 de 1993 y la Resolución 1362 de 2010, a su vez vela por una buena gestión de la seguridad y salud en el trabajo de sus empleados a la hora de realizar sus labores, como lo son los Decretos 1072 de 2015 y la Resolución 0312 de 2019.
- **Legal:** El cumplimiento de estándares de calidad industrial es crucial para mantener la confianza de los

clientes. En este sentido es importante para la empresa tener varios conocimientos y asesoramiento de todo el marco legal y reglamentación del país donde se van a realizar sus actividades, esto con el fin de evitar también posibles futuras demandas lo que induce en pérdidas económicas por malos procesos de calidad y fabricación.

Cadenpal, con más de 25 años de trayectoria en el sector industrial de ingenios, presenta una estructura organizacional sólida que permite una operación eficiente y bien coordinada. La empresa, que cuenta con un equipo de 23 trabajadores, se clasifica como una pequeña empresa de acuerdo con la Ley 905 de 2004, dado que su número de empleados se sitúa dentro del rango de 11 a 50. Sin embargo, su organización y gestión de recursos le otorgan la capacidad de ofrecer soluciones integrales que satisfacen las necesidades de sus clientes de manera efectiva.

Cadenpal se distingue por su enfoque en la atención al cliente, priorizando la generación de confianza a través de un servicio de alta calidad. Este enfoque abarca desde una atención personalizada hasta la gestión adecuada de garantías, asegurando que los productos entregados cumplan con los estándares de calidad requeridos. A pesar de su clasificación como pequeña empresa, Cadenpal ha logrado posicionarse como un competidor relevante en el sector, destacándose por su compromiso con la excelencia y la innovación en sus procesos y productos. Esta combinación de experiencia, estructura organizacional eficiente y enfoque en el cliente permite a Cadenpal enfrentar con éxito los desafíos del mercado, fortaleciendo su competitividad y presencia en la industria.

La estructura organizacional de Cadenpal sigue un modelo jerárquico típico de muchas empresas, con una división clara de responsabilidades y niveles de autoridad (ver Figura V). La organización comienza con la Junta Directiva, el máximo órgano de decisión de la empresa, el cual, aunque registrado formalmente, aún no se ha implementado en la práctica. Le sigue la Gerencia, encargada de ejecutar las decisiones de la Junta Directiva y supervisar las operaciones generales; actualmente, esta posición es asumida por el propietario de la empresa. La Subgerencia se divide en tres áreas principales:

- **Proceso Administrativo:** Responsable de la gestión interna de la empresa, incluyendo recursos humanos, compras, contabilidad, tesorería, almacén y calidad.
- **Proceso Comercial:** Enfocado en las ventas y la relación con los clientes, abarcando áreas como comercial, arquitectura y cadenas.
- **Proceso Productivo:** Encargado de la fabricación de productos, con departamentos que incluyen planificación, producción de cadenas, producción de inoxidable, dibujo técnico y operaciones de producción.

La organización de los equipos y la gestión del flujo de materiales reflejan el enfoque especializado de Cadenpal en ofrecer soluciones integrales a sus clientes, mientras que su modelo organizativo jerárquico garantiza un control adecuado sobre las distintas áreas funcionales. Aunque aún está en desarrollo en algunos aspectos, esta estructura permite administrar de manera óptima sus recursos y cumplir con los objetivos productivos y comerciales. Con un tamaño mediano, Cadenpal se posiciona en el sector metalúrgico con una cultura organizacional orientada a los resultados y una jerarquía bien definida, lo que demuestra un enfoque estructurado y eficiente en la gestión de sus operaciones y su capacidad para competir en el mercado.

Cadenpal se encuentra en la zona industrial de Palmira, Valle del Cauca, ocupando una superficie total de 950.47 metros cuadrados, que incluye un segundo piso destinado a las áreas administrativas. La empresa opera en un horario diurno, organizado con dos períodos de descanso. La jornada inicia a las 7:00 a.m. y se extiende hasta las 9:00 a.m., cuando los colaboradores salen a desayunar, regresando a las 9:15 a.m. Posteriormente, el horario continúa hasta las 12:00 p.m., momento en el que inicia la pausa para el almuerzo hasta la 1:00 p.m.; a partir de entonces, la jornada continúa hasta el cierre a las 5:30 p.m. La planta física está distribuida en tres líneas de trabajo distintas: cadenas/mecanizado, acero inoxidable y aluminio. Asimismo, cuenta con cinco áreas de producción: corte láser, CNC, soldadura, armado/doblado y acero inoxidable. En el plano (ver Figura I) se puede observar la distribución completa de la planta (todas las medidas son presentadas en metros).

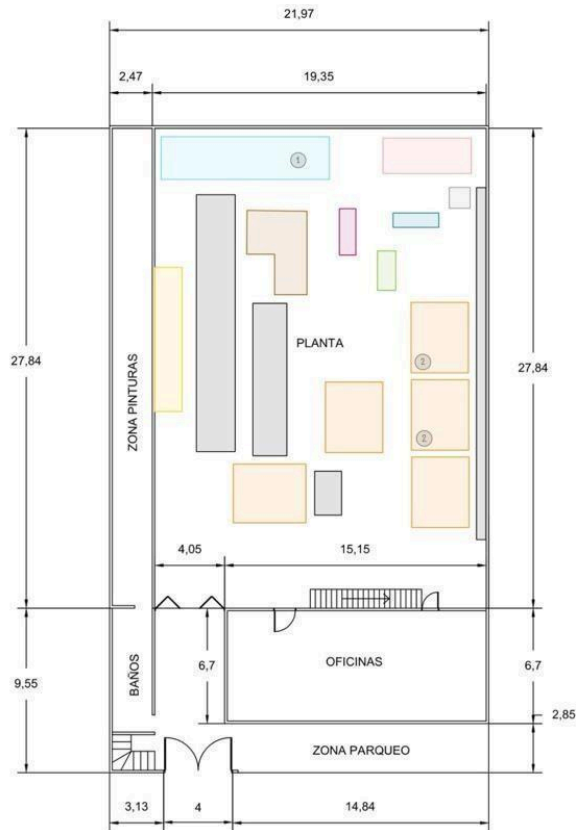


Figura I. Plano de la planta de producción (Dimensiones en metros)

Sistemas de Transporte Industrial

Dentro de esta amplia familia, las cadenas transportadoras (**ver Figura II**) se pueden clasificar de manera más específica como:

- **Equipos de Manejo de Materiales:** Se utilizan para mover y posicionar materiales dentro de un proceso de producción o almacén.
- **Sistemas de Transporte Continuo:** Permiten el movimiento constante de materiales a lo largo de una ruta predefinida.



Figura II. Cadena de transporte ensamblada

Subcategorías Más Específicas:

- **Cadenas Industriales:** Dentro de esta categoría, se encuentran las cadenas transportadoras diseñadas específicamente para soportar cargas pesadas y movimientos repetitivos.
- **Sistemas de Transporte por Vagoneta:** Esta subcategoría se refiere específicamente a sistemas que utilizan vagones o carros sobre una vía para transportar materiales.

Datos de clientes y proveedores: Los clientes de Cadenpal incluyen ingenios en las industrias azucarera y aceitera, trapiches azucareros y paneleros, entre otros sectores potenciales. Se encuentran ubicados principalmente en Colombia (Valle del Cauca), así como en Perú, Venezuela y Ecuador. Los clientes varían en tamaño, desde pequeños hasta grandes, según el sector en el que operen. Sus principales necesidades incluyen la calidad del producto, cumplimiento de plazos de entrega y normativas de resistencia para las cadenas. La cantidad de pedidos de cada cliente suele ser de aproximadamente dos al año, ya que las cadenas tienen una vida útil de 8 meses a 1 año.

En Cadenpal, los proveedores suministran diversos materiales, como acero, pinturas, herramientas, tuercas, aceites y servicios de mantenimiento. La mayoría de estos insumos son adquiridos a nivel nacional, en ciudades como Bogotá, Medellín, Cali y Palmira. Sin embargo, también se importa material especializado, como aceros de alta calidad provenientes de países como Suiza e India. En cuanto al cumplimiento de los proveedores, aquellos ubicados a corta distancia de la empresa suelen garantizar un servicio eficiente, ya sea que el transporte lo gestione el propio proveedor o Cadenpal. Sin embargo, se ha identificado que el proveedor de Medellín presenta mayores dificultades en cuanto a la puntualidad en las entregas. Por último, Cadenpal mantiene una relación crediticia con el 90% de sus proveedores, lo que facilita la adquisición de materias primas en grandes cantidades, con plazos de pago que pueden oscilar entre uno y dos meses, según se requiera.

Cadenas transportadoras de bagazo

Para la realización de este proyecto se busca dar una clara contextualización sobre las cadenas transportadoras de bagazo, este apartado tiene como fin introducir términos nuevos como bagazo, aceros, partes de cadenas, etc. El bagazo es el residuo fibroso que queda después de extraer el jugo de la caña de azúcar en el proceso de fabricación. Este material contiene aún una cantidad significativa de fibra y otros componentes que lo usan para diversos fines, como la generación de energía, los cuales se hacen efectivas en los mismos ingenios o trapiches para generar un ahorro económico.

Teniendo en cuenta lo que es el bagazo, la cadena transportadora hace función de transporte del bagazo desde los molinos que es donde se extrae el jugo hasta donde será utilizado, como las calderas para generar energía; también distribuye el bagazo de manera uniforme hacia todos los equipos o bandas por donde se procesa la caña y por último generan una ayuda en la elevación del bagazo para generar un mejor transporte.

Las cadenas transportadoras son fabricadas de materiales resistentes como acero al carbono o acero inoxidable (láminas especiales como: hardox 900, stream 700, entre otros) donde son menos riesgosas frente a una corrosión y evitan alguna oxidación por los flujos del bagazo. Tienen un diseño robusto en general (pueden tener diferentes medidas dependiendo del tipo de cadena) para así lograr soportar las cargas pesadas y exposiciones de calor, estas cadenas están conformadas por platinas, piñones, rodillos, bujes, pasador, dependiendo del tipo de cadena que se requiera y para la actividad que vaya a ejecutar, algunos tipos de cadenas son:

- Cadenas de placas:
- Cadenas de cangilones:
- Cadenas de rodillos:

A continuación en la **Figura III** se puede observar un esquema que resume las partes y elementos mecánicos que componen una cadena para rieles de transporte utilizada en diversas industrias. La **Figura IV** muestra un recipiente lleno de pasadores de cadenas recién fabricados en Cadenpal listos para enviar y recibir el proceso de tratamiento térmico. Se puede observar una gran producción en masa de esta pieza.

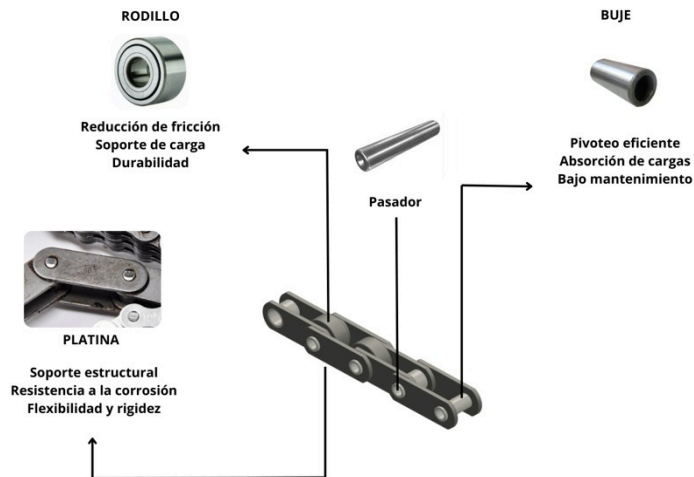


Figura III. Composición de una cadena transportadora



*Figura IV. Pasadores fabricados en Cadenpal
Tomada de: Mecanizados Industriales Cadenpal E.U*

Proceso de fabricación de una cadena

El proceso de fabricación de cadenas transportadoras de bagazo en con una fase de planificación y diseño, donde se analizan las necesidades del cliente, como la funcionalidad que va a tener la cadena , la capacidad de carga y las condiciones ambientales a las cuales se va a enfrentar. A partir de esta información, se seleccionan materiales adecuados (acero al carbono o inoxidable) y se calculan las dimensiones de los componentes como: pasadores, bujes, rodillos, piñones y platinas, para poder asegurar una buena resistencia y durabilidad.

Los componentes de unión, como platinas que tengan un diseño diferente, se ensamblan mediante soldadura, permitiendo configuraciones personalizadas, es de tener en cuenta que algunos de nuestras partes para la construcción eficiente y completa de la cadena es realizado de forma externa como el tratamiento térmico en los bujes, para así garantizar una dureza y elasticidad en el funcionamiento de la cadena.

En la fase de ensamblaje, se integran los componentes manualmente, verificando la alineación y tensión de la cadena. Los piñones, rodillos y otros elementos adicionales, como guías y tensores, se instalan para asegurar un funcionamiento óptimo. Posteriormente, se realizan pruebas de calidad, incluyendo inspecciones visuales y pruebas de resistencia, si son necesarias. El proceso concluye con la aplicación de acabado y protección, mediante una capa de pintura que previene la corrosión y mejora la durabilidad del producto. Este enfoque asegura que las cadenas transportadoras fabricadas sean robustas, eficientes y aptas para las condiciones operativas exigentes del transporte de bagazo.

Dado que la cadena de referencia 2100 es la más vendida en la empresa, nuestro análisis se centrará

específicamente en los elementos que componen su proceso de producción. A continuación, en la Figura V, se presenta el flujograma detallado de esta referencia, el cual describe las etapas clave desde la recepción de materias primas hasta el producto final.

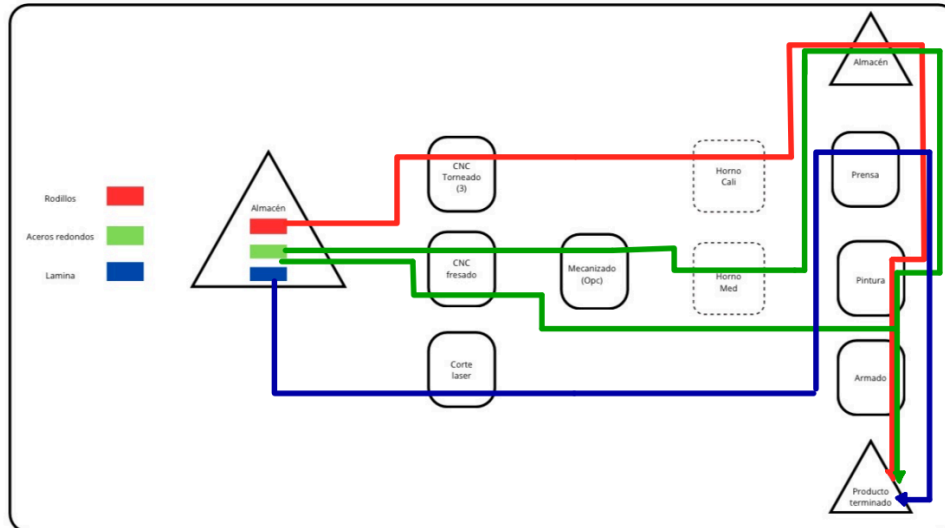


Figura V. Diagrama de Flujo del proceso

Dimensiones y características del producto: En Cadenpal se manejan diferentes tipos de cadenas, que se enfrentan a diferentes ambientes. La mesa de caña y los conductores de caña enfrentan piedras y cargas irregulares presentes en el proceso de cosecha, también la presencia de líquidos y barro, puede generar oxidación y dificultades en sus rodamientos. Los donnellys afrontan los jugos de la caña (guarapo) el cual es un agente oxidante fuerte, con un PH alto (4,9 a 5,5) el cual puede generar corrosión en caso de que el material no sea acero inoxidable o un acero al carbono de alta calidad, los conductores de bagazo se confrontan con mucha fibra lo cual provoca un aumento de fuerza en el rodamiento y produce un posible desgaste, por último, las cadenas se enfrentan a ambientes de altas temperaturas a causa de su constante trabajo en las calderas de la producción.

Los materiales de fabricación de una cadena pueden ser acero al carbono para aplicaciones generales, acero inoxidable para ambientes corrosivos y aleaciones especiales (mezcla de varios metales); los cuales se pueden enfrentar tanto a tratamientos superficiales como el galvanizado, cromado o nitrurado, y a tratamientos térmicos como el temple y revenido. Estos últimos se realizan para aumentar la resistencia a la corrosión y al desgaste puesto que las cadenas deben ser estrechas para asegurar un ajuste preciso y evitar un desgaste prematuro.

La resistencia a la rotura que se maneja por cadena está entre 20.000 y 120.000 psi (lb/in²) y las cargas o la carga admisible trabajo está entre 5.000 y 10.000 libras por pie (lb-ft) . Por lo cual nuestro pasador debe de tener una dureza de 50 a 54 Rockwell C y permitir una buena elasticidad para asegurar cierta flexibilidad a la hora de absorber las cargas de impacto.

El pasador es uno de los componentes vitales de la cadena, es la pieza que requiere de un tratamiento térmico especial que se realiza de manera externa a la empresa. Para diseñar un pasador en este caso, es fundamental considerar los cálculos de esfuerzo ya que, estos determinan la carga máxima que soportará y así se permiten seleccionar el material y las dimensiones adecuadas. Como resultado, obtuvimos un diámetro promedio de 25,40 mm y una longitud de 93,89 mm, con un área de tratamiento térmico de 63,91 mm.

Los planos de las **Figuras VI y VII** muestran en detalle cuatro tipos de pasador que dependen del modelo de cadena que se va a fabricar de acuerdo con los requerimientos mecánicos que el cliente solicite en términos de la mejora de las propiedades mecánicas y aumento de la resistencia de la pieza. En ambas figuras se puede observar la zona de la pieza a la que se le aplicó el tratamiento térmico por inducción electromagnética para aumentar la dureza y la ductilidad del pasador.

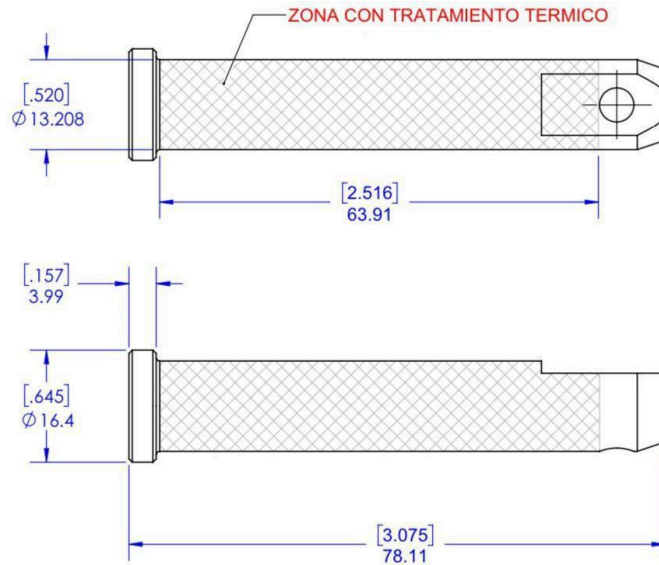


Figura VI. Planos del pasador (Dimensiones en milímetros)

Tomada de: Mecanizados Industriales Cadenpal E.U

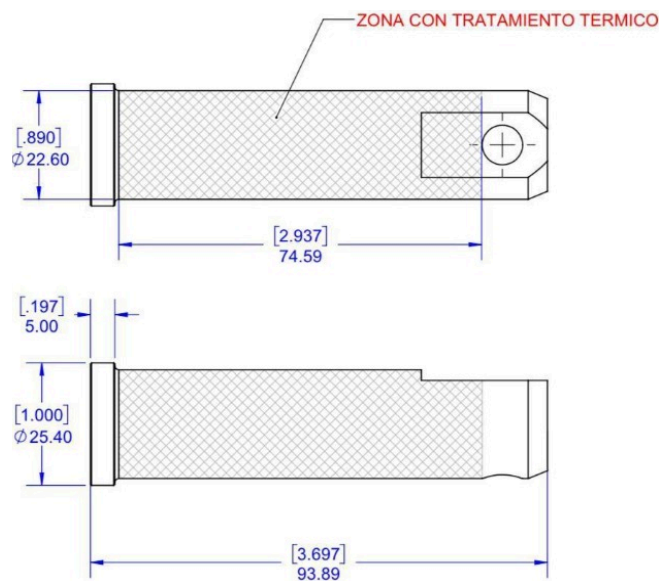
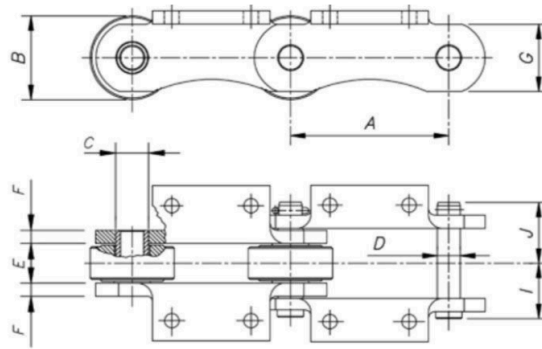


Figura VII. Planos del pasador (Dimensiones en milímetros)

Tomada de: Mecanizados Industriales Cadenpal E.U

Datos de laboratorio de metalografía (Pereira): Considerando algunos riesgos potenciales en Cadenpal, como la fractura o el estiramiento de una cadena en uso, o la imposibilidad de ensamblar piezas debido a errores en las tolerancias o insuficiente resistencia de peso, se utiliza el laboratorio de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) como respaldo para verificar la resistencia a la rotura cuando el cliente lo exige o si la cadena presenta daños durante su uso. En ciertos casos, también se solicita un certificado de dureza para algunos clientes, obtenido mediante pruebas con durómetros que realizan unas indentaciones en el material.

El laboratorio informa que los valores de dureza en la escala Rockwell C oscilan entre 50 y 54, con una profundidad de penetración entre 1 y 3 mm, dependiendo del diámetro del pasador; a mayor diámetro, mayor profundidad (ver Figura VIII). Esta imagen proviene del catálogo de una empresa brasileña especializada en elementos mecánicos para cadenas transportadoras, donde se especifican distintos tipos de piezas, materiales, tratamientos, dimensiones y cargas máximas permitidas. El laboratorio de metalografía de Pereira toma como referencia las tablas de propiedades mecánicas incluidas en este catálogo.



N°	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Kg/m	Kgf
100	101,60	50,80	24,10	15,80	33,10	794	40,00	39,50	43,50	16,00	17000	
109	152,40	81,00	31,75	22,20	38,40	9,53	65,00	46,00	52,00	2700	43.000	
113	152,40	81,00	31,75	22,20	38,40	12,70	65,00	52,50	58,50	32,00	49.000	
116	203,20	101,60	38,10	25,40	46,10	12,70	76,20	57,50	64,50	40,50	60.000	

Figura VIII. Posibles medidas de las cadenas con su respectiva carga de ruptura.

Tomada de: Catálogo de productos General Chains do Brasil

Datos del tratamiento térmico (Medellín) En la compañía TEMPLAMOS MEDELLÍN se realiza el proceso de tratamiento térmico para el pasador. En este sentido, se obtuvo la siguiente información: el costo del tratamiento térmico es de \$16.000 pesos por kilo. Adicionalmente, Cadenpal asume los costos de flete, que ascienden a \$10.000 pesos por kilo (\$5.000 de ida y \$5.000 de regreso), llevando el costo total del proceso a \$26.000 pesos por kilo.

La falta de garantía en este servicio implica que, si el producto llega en mal estado o con baja calidad, el proceso debe repetirse en Medellín, manteniendo el mismo costo. Estos factores representan un costo adicional significativo para la empresa al tercerizar el tratamiento térmico, tanto en términos de transporte como de repetición de procesos en caso de no cumplir con los estándares requeridos.

Datos del proceso del tratamiento térmico: Consideraciones de tercerizar el tratamiento térmico

Este tratamiento térmico trata de inducir una serie de corrientes eléctricas de una alta frecuencia a través de un conductor de metal, con el fin de generar calor directamente en una pieza metálica, dando la posibilidad de modificar las propiedades mecánicas del elemento como: dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la fatiga; este proceso se basa en 5 pasos los cuales son:

1. **Campo Electromagnético del inductor:** Se coloca una bobina de cobre con una forma específica para rodear la pieza la cual se desea calentar; se debe de tener en cuenta que la forma del inductor determina la distribución del calor en la pieza.
2. **Generador de alta frecuencia:** Se aplica una corriente alterna de alta frecuencia al inductor. La cual crea corrientes eléctricas dentro de la pieza. La corriente alterna genera un campo magnético que cambia constantemente de dirección.
3. **Calentamiento por inducción:** La corriente alterna en el inductor genera un campo magnético alterno, el cual induce corrientes parásitas (corrientes de Foucault) en la pieza metálica, produciendo calor por efecto Joule en la superficie del material. La profundidad de calentamiento, o profundidad de penetración, depende de la frecuencia de la corriente, la resistividad y la permeabilidad magnética del material, así como de su geometría.
4. **Enfriamiento:** Una vez se llegue a la temperatura deseada, se interrumpe el proceso y la pieza se enfría rápidamente ya sea por aire, agua (temple) u otros medios de extracción rápida de calor para producir el temple en el acero.
5. **Modificación de las propiedades:** El realizar el calentamiento y el enfriamiento del producto genera cambios de microestructura del material, lo cual genera un aumento de dureza y resistencia en la zona que se trató.

Tabla con valores de KPI

A continuación, en la **Tabla III** se puede observar la medición de cada una de las variables KPI (indicadores de desempeño) seleccionadas de acuerdo con la problemática que enfrenta Cadenpal. Se precisa que todos los KPI son variables de tipo cuantitativo y finalmente se construye un indicador mediante una expresión

matemática que permite calcular valores aproximados sobre el resultado final y alcance de estos indicadores en el proyecto.

Tabla III. Estructura de indicadores de desempeño

Nombre	VARIABLES	Indicador
Costo del tratamiento térmico	CKM = Costo por kilo envío a Medellín CS = Costo del servicio CCO = Costo capacitación operarios	$CF = \sum_1^N CKM + \sum_1^N CS + \sum_1^N CCO$
Tiempo de fabricación y entrega	TP = Tiempo producción TE = Tiempo ensamble TIM = Tiempo ida Medellín TTTM = Tiempo tratamiento térmico Medellín TVC = Tiempo vuelta Cali TCO = Tiempo capacitación operarios	$TF = \sum_1^N TP + \sum_1^N TE + \sum_1^N TIM + \sum_1^N TTTM + \sum_1^N TVC + \sum_1^N TCO$
Capacidad Instalada	CI= Capacidad Instalada PR= Producción Real CAPM = Capacidad de maquinaria HO= Horas de operación E= Eficiencia	$CI = (PR / (CAPM * HO * E)) * 100$

OPORTUNIDADES DE MEJORA IDENTIFICADAS

Puntos de Mejora

Mencionar los distintos puntos de mejora y los aspectos críticos de una empresa es esencial para identificar problemas que puedan afectar su eficiencia y competitividad. Se busca que Cadenpal fortalezca su posicionamiento competitivo en el sector metalúrgico, es fundamental identificar y abordar áreas clave de mejora en sus operaciones para diseñar estrategias específicas que aborden estas debilidades, implementar soluciones que maximicen la productividad y asegurar un crecimiento sostenible. Al realizar un exhaustivo análisis, se encontró que los principales puntos de mejora a trabajar son:

- Desarrollo de procesos de documentación interna que registren las actividades de la empresa que permitan justificar en términos económicos la implementación del sistema de tratamiento térmico.
- Implementación de un sistema de medición y monitoreo de variables de producción para rediseñar la línea productiva de manera eficiente.
- Mejorar la distribución de planta, ubicar las máquinas para poder incluir de manera eficiente y segura el horno de tratamientos térmicos en el sistema de producción.
- Abandonar técnicas empíricas y adoptar metodologías más estadísticas en los procesos incorporando la toma de datos claves para intervenir los procesos y llevar un registro mucho mejor.
- Mejorar temas acerca de las imperfecciones en los terminados de las piezas (calidad).

Puntos Críticos

Actualmente, el proceso de tratamiento térmico se realiza en Medellín y tarda **10 días** en completarse desde que las piezas salen de Palmira hasta que regresan tratadas. Esto genera un tiempo total de producción de **40 días**, lo cual es un factor crítico para la competitividad de la empresa. El costo total de la operación es de **26.000 pesos por kilo** (El valor de kilos por solicitud depende y varía según el cliente), sumando el transporte (**5,000 pesos por kilo de ida y 5,000 de regreso**) y el tratamiento térmico (**16.000 pesos por kilo**). De esto se PERDIDAhán originado una serie de problemas que han afectado en los últimos tiempos varios negocios de la

empresa.

- Dependencia de terceros en este proceso.
- Riesgo de incumplimientos en tiempos o calidad que afectan directamente a Cadenpal, poniendo en riesgo la relación con los pocos, pero grandes clientes que compran de forma intensiva.
- La pérdida de clientes es la problemática principal de Cadenpal, causada por:
 - Dependencia de terceros en el tratamiento térmico
 - Tiempos de entrega extendidos
 - Costos adicionales por tercerización

Luego de la identificación y análisis de los puntos críticos de Cadenpal, se le dio una serie de calificaciones (**ver Tabla II**) que permitieron evaluar qué tanto valor tienen estos puntos para la empresa, esto es muy importante ya que permite tomar decisiones proyectadas en la mejora de estas áreas deficientes o en crecimiento. Para esto se utiliza una escala de evaluación de 1 a 5, donde 1 representa una influencia baja, y 5 representa una influencia alta.

A continuación en la **Tabla IV** se observan los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores de desempeño, en esta tabla se consignan los datos pertenecientes a la actualidad de la variable a medir y la meta por alcanzar, medida en términos cualitativos.

Tabla IV. Resultados de indicadores de desempeño de la tercerización del TT (KPI's)

Variable	Actualidad	Meta
Costo de producción	26.000 pesos por kilo (incluye transporte y tratamiento)	Reducir a un rango de 15 a 17 pesos por kilo con tratamiento <i>in-house</i>
Tiempo de fabricación y entrega	40 días	Reducir a menos de 30 días
Capacidad Instalada	Limitada por la tercerización, aproximadamente 7 toneladas de cadena al mes	Incremento de un 35% con tratamiento <i>in-house</i>

Para lograr una estrategia de implementación eficiente, la adquisición de un horno de tratamiento térmico debe alinearse con una visión integral de crecimiento y mejora continua en Cadenpal. Para ello, se establece un enfoque basado en los siguientes elementos:

Levantamiento de Información y Análisis de Viabilidad: Se realizará una evaluación detallada de los requerimientos de diseño, considerando la capacidad de la planta, el consumo energético, el espacio disponible, la infraestructura existente y los estándares de seguridad industrial.

Análisis de Costos y Presupuesto de Implementación: Se efectuará un estudio financiero integral que permita estimar el presupuesto real para la implementación del proyecto, considerando el costo de la tercerización actual y la inversión necesaria para la adquisición e instalación del equipo.

Comparación de alternativas: Con base en los requerimientos de diseño establecidos por el equipo de ingeniería mecánica, se analizarán las características técnicas del modelo desarrollado internamente y se compararon con los modelos chinos disponibles dentro del presupuesto estimado. Esta evaluación incluirá aspectos como eficiencia operativa, costo de mantenimiento, disponibilidad de repuestos y tiempos de entrega.

Distribución y Sinergia con la Planta: La implementación del modelo seleccionado requerirá ajustes en la

distribución del espacio y en la línea de producción. La ingeniería industrial llevará a cabo una reorganización de planta para garantizar un flujo de trabajo eficiente y minimizar interferencias operativas, asegurando la correcta integración del horno en el proceso productivo.

Evaluación de Capacidad Eléctrica y Consumo Energético: Se determinará si la infraestructura eléctrica actual es suficiente para soportar el consumo del horno o si será necesario realizar adecuaciones. La eficiencia energética será un criterio fundamental en la selección del equipo, ya que impactará directamente en los costos operativos.

Impacto en la Producción y Cumplimiento con Clientes: La implementación del horno tiene como objetivo reducir la dependencia de terceros, optimizar los tiempos de entrega y minimizar costos operativos. Esto permitirá mejorar la autonomía en la producción, garantizar el cumplimiento con los clientes y fortalecer la competitividad de Cadenpal en el mercado. Al final del proceso, la selección del horno más adecuado garantizará una mejora significativa en la eficiencia operativa, facilitando un crecimiento sostenible y alineado con los objetivos estratégicos de la empresa.

3.3 Análisis de causas

A continuación, en la **Figura IX** se puede observar el diagrama de causa - efecto representado en una plantilla de espina de pescado.

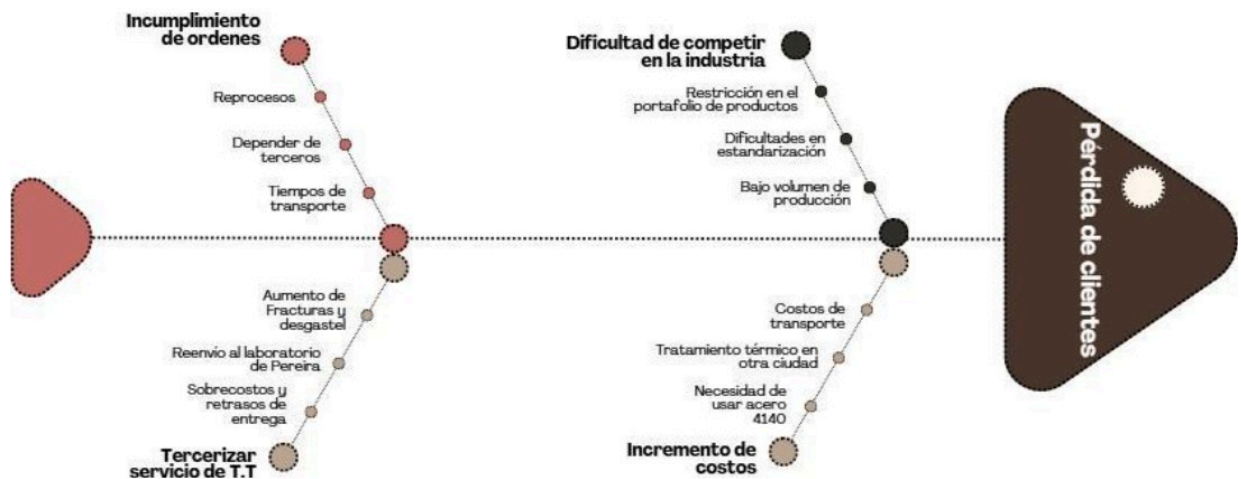


Figura IX. Diagrama de espina de pescado de causas

El diagrama de espina de pescado permite identificar y analizar las causas raíz que contribuyen a la pérdida de clientes en Cadenpal, específicamente en relación con la tercerización del tratamiento térmico de los pasadores. En primer lugar, se evidencia que el incumplimiento de órdenes está asociado a la dependencia de proveedores externos, lo que genera reprocesos y retrasos debido a los tiempos de transporte. Además, este factor se ve agravado por el aumento de fracturas y desgaste en los pasadores, lo que obliga a enviarlos a un laboratorio en Pereira, incrementando aún más los sobrecostos y tiempos de entrega.

Por otro lado, la empresa enfrenta dificultades para competir en la industria debido a la limitación en su portafolio de productos, la falta de estandarización en los procesos y un bajo volumen de producción, lo que reduce su capacidad para satisfacer las necesidades del mercado. Asimismo, el incremento de costos representa un obstáculo significativo, ya que el tratamiento térmico debe realizarse en otra ciudad, lo que implica gastos adicionales en transporte y la necesidad de emplear acero 4140 para cumplir los requisitos técnicos.

A partir de la identificación de las causas, se han podido clasificar las áreas a mejorar según el impacto que estas tienen sobre las operaciones y rendimientos de la empresa. La utilización del diagrama de espina de pescado (**ver Figura IX**) que permite organizar mejor la información de las causas analizadas es crucial para comprender mejor los problemas reales de la empresa y como más adelante poder brindar una solución adecuada de acuerdo con el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Este enfoque permitirá formular preguntas lógicas y coherentes que guiarán el proceso de rediseño, asegurando que las soluciones propuestas no solo se alineen con los objetivos estratégicos de la empresa, sino que también respondan adecuadamente a las necesidades y expectativas de los clientes.

En el proyecto de rediseño del sistema productivo de Cadenpal E.U., es crucial entender las fuentes de variación que afectan el desempeño del sistema. Estas variaciones no solo impactan la eficiencia operativa,

donde se ha observado una disminución del 15% en la productividad debido a tiempos de inactividad no planificados, además, también tienen implicaciones directas en la satisfacción del cliente, y la calidad del producto también se ha visto comprometida, evidenciando un aumento del 20% en las reclamaciones por defectos, lo que genera costos adicionales en reprocesos y devoluciones, llegando así a la pérdida de clientes.

En el contexto del rediseño del sistema productivo de Cadenpal, la identificación de fuentes de variación que afectan el desempeño del sistema es fundamental para abordar las causas que impactan en los indicadores críticos de satisfacción del cliente (CTS), los atributos críticos para la calidad (CTQ), y los elementos críticos para el costo (CTC).

Abordando el primer indicador, se evidencia que la tercerización del tratamiento térmico es una de las principales fuentes en la variación del desempeño. Pues, al depender de externos, se genera incertidumbre en los tiempos de entrega y la calidad del proceso. Estos retrasos aumentan el costo del producto, además de comprometer la capacidad de la empresa para cumplir con las expectativas de los clientes. Otro factor que influye en el incumplimiento de este indicador, es que la calidad brindada por el proveedor externo puede no ser consistente, manifestándose en el reproceso de piezas, incrementando los costos gradualmente y generando retrasos adicionales. Generando así, que los productos de Cadenpal sean menos competitivos en comparación con otros proveedores que manejan el proceso *in-house*.

Teniendo en cuenta el indicador de atributos críticos para la calidad (CTQ), existen varios factores que impiden el cumplimiento de este. Retomando la tercerización del proceso, este puede dar como resultado a inconsistencias en la calidad de los tratamientos, afectando directamente atributos como la dureza y la resistencia de las piezas.

Esto debido a que la empresa no está teniendo totalmente el control interno de estos procesos para realizar ajustes inmediatos o asegurar que se cumplan las especificaciones de calidad requeridas por los clientes. Problemáticas como esta, se han presenciado ocasionalmente en la empresa, en donde la comunicación con los proveedores y la relación comercial han sido deficientes, presenciando malentendidos en la calidad sobre los estándares de calidad, lo que repercute directa y negativamente sobre la satisfacción de los clientes.

Por otro lado, el CTC se ve influenciado por la acumulación de costos adicionales vinculados a la tercerización, que incluyen tarifas de tratamiento y transporte, así como la falta de control sobre el proceso, lo que incrementa los gastos operativos sin que se traduzcan en mejoras en la calidad o en la satisfacción del cliente. Esta interacción de factores genera un círculo vicioso donde el incumplimiento en uno de los indicadores repercute negativamente en los demás, comprometiendo la posición competitiva de Cadenpal en el mercado.

La industria asociada a Cadenpal, cuenta con buenos proveedores del servicio de tratamiento térmico; sin embargo, les hace falta ampliar su oferta, mejorar la garantía, el servicio posventa y la asesoría al momento de realizar la venta. Es por ello que se busca la factibilidad de comprar el horno especializado, pues, no solo aborda la dependencia de terceros en este proceso crítico, sino que también mejora la calidad del producto y optimiza los tiempos de entrega. El personalizar los parámetros del proceso de acuerdo a las especificaciones de cada cliente, podría traducirse en un aumento en la satisfacción del cliente y una reducción en los tiempos de producción, de los actuales 40 días aproximadamente, pasar a 25 días.

4. **Objetivos**

Objetivo General:

Rediseñar el proceso productivo de Mecanizados Industriales Cadenpal E.U. para integrar un proceso de tratamiento térmico, con el fin de mejorar los indicadores claves de desempeño de producción.

Objetivos Específicos:

- Diseñar el mecanismo de horno de inducción y seleccionar sus componentes que cumplan con los parámetros técnicos específicos de la empresa para el tratamiento térmico de los pasadores de las cadenas, garantizando compatibilidad con el proceso productivo.
- Desarrollar dos alternativas de operación del proceso productivo, una que contemple la integración del horno diseñado y otra que considere la compra de un horno comercial, mediante la definición de sus procedimientos y distribución de planta para mantener o aumentar la capacidad de producción.
- Validar, mediante análisis cualitativos y cuantitativos, el impacto de la implementación del sistema de tratamiento térmico en la productividad, la calidad del producto y los costos operativos de la empresa.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

La investigación académica es clave para comprender cómo resolver problemáticas y estructurar proyectos similares al propuesto. En este caso, la revisión de la literatura se enfoca en el rediseño de la línea de producción de una planta, evaluando la implementación de un tratamiento térmico *in-house*. Esta estrategia busca reducir costos, mejorar la fiabilidad y acortar los tiempos de respuesta. Se analizaron estudios sobre la gestión de operaciones, con énfasis en modelos de costos y eficiencia, así como investigaciones relacionadas con tratamientos térmicos y diseños de hornos. Este análisis integral permite identificar las ventajas del sistema de tratamiento térmico *in-house* frente a la tercerización de este servicio, proporcionando un marco sólido para las mejores metodologías que se encuentran en el sector.

En la literatura asociada al entorno de este proyecto hay varios estudios que abordan la optimización de procesos productivos y las cadenas de suministro en industrias de manufactura, y se pueden apreciar situaciones similares a los desafíos enfrentados por Mecanizados Industriales Cadenpal E.U., particularmente relacionado con la tercerización de procesos que se consideran críticos como en este caso lo es el tratamiento térmico. Uno de los estudios que han sido relevantes sobre la mejora de cadenas de suministro se enfocó en un ingenio azucarero en Colombia (Ingenio Manuelita), el cual, al igual que Cadenpal, quería optimizar sus procesos mediante el uso de tecnologías más avanzadas. En este caso, parte del estudio menciona los beneficios de la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 pero lo más relevante para el presente proyecto es el componente de reducción de costos y la disminución de pérdida de clientes como objetivos que se quieren alcanzar al internalizar procesos que antes eran tercerizados, por ejemplo, el mantenimiento predictivo y el control de calidad automatizado. La implementación de sistemas de control en tiempo real y la automatización de procesos permitió que esta empresa mejorará significativamente sus tiempos de entrega y la calidad de sus productos, lo cual son factores que Cadenpal también podría aplicar para disminuir costos operativos y reducir los 10 días adicionales que requiere actualmente la tercerización del tratamiento térmico, elevando el nivel de servicio y la rentabilidad de la empresa en general [1]. Al eliminar la dependencia de terceros, Cadenpal tendría un mayor control sobre el proceso y podría ofrecer un servicio más confiable y personalizado a sus clientes, lo cual es clave en un mercado tan competitivo. Además, al incorporar tecnologías avanzadas, no solo se posicionaría mejor frente a sus competidores, sino que también podría acceder a nuevos mercados al cumplir con estándares internacionales de calidad.

Otro estudio llamado “La distribución de Planta y sus Factores: incidencia en el mejoramiento de la productividad”, aborda cómo la redistribución de espacios puede ser una estrategia eficaz para aumentar la eficiencia y competitividad en las plantas de producción. Esta referencia sugiere que la reorganización del espacio y la mejora de flujos de material (elemento que es particularmente relevante en Cadenpal dado el peso del material, el cual puede afectar la salud del operario) pueden eliminar cuellos de botella y reducir tiempos muertos en la producción. Dado que Mecanizados Industriales Cadenpal enfrenta problemas de eficiencia debido a una distribución de planta no optimizada, es relevante remitirse a estudiar los principios de este estudio pues podrían aplicarse para maximizar el uso del espacio disponible (lo cual es un parámetro sin posibilidad real de cambio en el presente proyecto) y mejorar la coordinación entre procesos, especialmente si se decide implementar el sistema de tratamiento térmico *in-house*.

La reducción en la manipulación innecesaria de materiales y el flujo continuo de trabajo son elementos que también pueden contribuir a mejorar los tiempos de entrega y a mejorar la estandarización del proceso productivo de Cadenpal [2].

La información presentada proviene de la tesis “Aplicación del Sistema de Lean Manufacturing en el Incremento de la Productividad en una Empresa Metal Mecánica de Producción de Ollas de Aluminio”. Este trabajo sostiene que la metodología Lean Manufacturing ha sido ampliamente utilizada en la industria metalmeccánica para reducir desperdicios y aumentar la eficiencia operativa. Un estudio de caso aplicado en esta industria, particularmente en la producción de ollas de aluminio, demostró cómo herramientas como las 5S y el Mantenimiento Productivo Total (TPM) pueden ser utilizadas para optimizar el uso de recursos y minimizar tiempos de inactividad. La implementación de estas metodologías dentro del proceso productivo que se tiene en Cadenpal podría permitir una mejor organización de los recursos, tanto humanos como materiales, y lo que no solo permite estructurar mejores estándares para el proceso de ensamble de las cadenas, sino que permitiría a Cadenpal utilizar mejor sus recursos financieros. Por tanto, considerando la inclusión de un tratamiento térmico *in-house* en la planta de Cadenpal, sería muy importante apalancarse con el conocimiento de estas metodologías para optimizar el uso del horno y evitar gastos innecesarios, por ejemplo, en términos de gasto energético o subutilización [3].

Basándonos en otro estudio, titulado “Plan de Control de Producción para la Mejora del Área de Mecanizado de una Empresa de Diseño y Construcción de Maquinarias”, realizado por M. S. Hidalgo y E. R. Tumbaco en la Universidad Politécnica Salesiana en 2023, se observa que la implementación de un plan de

control de producción ayudó a una empresa de diseño y construcción de maquinaria a reducir notablemente los tiempos de fabricación que se tenían por medio de la eliminación de ineficiencias en la gestión de inventarios y la automatización del seguimiento de materias primas. Este enfoque se alinea con las necesidades que tiene Mecanizados Industriales Cadenpal, pues actualmente enfrenta retrasos debido a la falta de control interno en el tratamiento térmico, pues únicamente pueden llevar la trazabilidad del proceso hasta que se despacha hacia Medellín y hay una interrupción en la capacidad de control hasta que el producto en proceso regresa a la planta en Palmira. Al internalizar el tratamiento térmico y no depender de la empresa en Medellín. Aunque existen algunas empresas en el sector (Cali y Palmira) que ofrecen servicios similares, estas no cuentan con la infraestructura y la tecnología avanzada necesaria para garantizar los estándares de calidad requeridos en el proceso de tratamiento térmico.

Sin embargo, es importante señalar que, a pesar de la reputación del servicio que ofrece Templamos Medellín S.A, la falta de un plan de control de producción totalmente integrado dificulta la trazabilidad y la supervisión del tratamiento térmico, generando incertidumbre en cuanto a la calidad y plazos de entrega. Por estas razones, internalizar el proceso de tratamiento térmico se presenta como una solución viable para Mecanizados Industriales Cadenpal, ya que permitiría optimizar los tiempos de producción, asegurar un control de calidad más riguroso y mejorar la eficiencia en toda la cadena de suministro. [4].

En relación a la situación actual que se tiene en Mecanizados Industriales Cadenpal, los estudios que se presentan destacan la importancia de integrar tecnologías avanzadas y metodologías de mejora continua para resolver problemas relacionados con la tercerización de procesos claves en el proceso productivo (particularmente en la industria manufacturera). La utilización de soluciones tecnológicas como la automatización y el uso de herramientas de metodologías como lo es Lean Manufacturing no solo ayudaría a disminuir los costos operativos que se tienen actualmente, sino también a mejorar los tiempos de entrega, la calidad del producto y la confiabilidad de la empresa ante sus clientes, factor que es muy importante considerando el tipo de mercado en el que opera Cadenpal, un mercado en el que no hay muchos compradores, sino que se basa en pocos clientes que compran en gran volumen, y por lo tanto, el incumplimiento a alguno de esos clientes puede significar la pérdida del mismo, lo que se refleja en un fuerte golpe a la rentabilidad de Cadenpal. Al eliminar la tercerización del tratamiento térmico y adoptar un enfoque integral de mejora continua rigiéndose por la normativa Colombiana de seguridad y salud en el trabajo pertinente, Cadenpal podría resolver los problemas de costos elevados, confiabilidad y retrasos en la entrega para las piezas de sus cadenas transportadoras de bagazo junto con la mejora del proceso de fabricación de ellas.

Aceros Herramientas

Los aceros - herramientas son aleaciones diseñadas específicamente para la fabricación de herramientas que deben soportar condiciones extremas de uso, como altos niveles de presión, fricción y temperatura. Este tipo de acero se caracteriza por su alta dureza, resistencia al desgaste y capacidad para mantener un filo cortante, incluso después de tratamientos térmicos. Los aceros para herramientas suelen tener un contenido de carbono relativamente alto y pueden incluir otros elementos de aleación, como tungsteno, molibdeno, vanadio y cromo, que mejoran sus propiedades mecánicas y térmicas. Existen varias clasificaciones de aceros para herramientas, entre ellas los aceros de alta velocidad que se utilizan en herramientas de corte de alta precisión y los aceros de trabajo en frío y en caliente.

Las propiedades presentadas de los aceros herramientas lo hacen adecuado para la fabricación de pasadores, objeto de estudio de este proyecto. Esta pieza se encuentra sometida a esfuerzos cortantes, flectores y a fenómenos de desgaste (mecánico y corrosivo). El acero AISI 4140 es uno de los materiales más utilizados en aplicaciones industriales debido a su alta resistencia, tenacidad y buena maquinabilidad. Es el material bajo estudio en este proyecto, pues, en Cadenpal se utiliza este acero para fabricar los pasadores de los ejes en las cadenas transportadoras. El acero AISI 4140 es uno de baja aleación que contiene cromo, molibdeno y manganeso es ampliamente utilizado en diversas industrias debido a sus propiedades mecánicas y versatilidad.

Para ampliar mejor acerca de la composición química del material, en la siguiente tabla se muestra la composición química del acero 4140.

Tabla V. Composición química del acero 4140

Elemento químico	%
Carbono	0,38 - 0,43

Silicio	< 0,4
Manganeso	0,75 - 1
Fósforo	< 0,035
Azufre	< 0,04
Cromo	0,8 - 1,1
Molibdeno	0,15 - 0,25

Este tipo de acero presenta una excelente resistencia a la fatiga y a la abrasión, además de ser adecuado para el endurecimiento mediante tratamientos térmicos. En la industria de herramientas, es comúnmente empleado en la fabricación de llaves de mano y destornilladores. En el sector petrolero, se utiliza en la producción de brocas, taladros, barrenos, vástagos de pistón y cuerpos de escariadores. Asimismo, en la industria aeronáutica, se emplea en la fabricación de componentes estructurales y piezas de alta precisión. En el ámbito de la construcción, se destina a la producción de maquinaria pesada y equipos de construcción. Por último, en la industria automotriz, se usa para fabricar ejes, engranajes, cigüeñales, cilindros de motores, bielas y rotores [5]. En la **Tabla VI** se presentan las propiedades mecánicas del acero 4140. Estas propiedades fueron obtenidas de una ficha técnica comercial del material en estudio.

Tabla VI. Propiedades mecánicas del acero SAE 4140 [31]

Propiedades Mecánicas	Valor mínimo
Resistencia a la Tracción (MPa)	655
Resistencia a la fluencia (MPa)	415
Elongación (50 mm)	25.70%
Dureza Brinell	197
Módulo de elasticidad (GPa)	205

Para alcanzar mejores valores de sus propiedades mecánicas, se aplican los cuatro tratamientos del segundo grupo de la **Tabla VII**, que se muestra más adelante. Según autores de la ASM International [6], el acero 4140 puede alcanzar una dureza que oscila entre 50 - 54 en escala Rockwell C (HRC), mediante el temple seguido de un revenido, lo que mejora su resistencia a la fatiga y lo hace ideal para aplicaciones exigentes como engranajes y pasadores para cadenas transportadoras de bagazo. Es bien sabido que la alta dureza requerida para estas aplicaciones puede llevar a una pérdida de tenacidad, lo que resulta en fractura frágil. Para evitar esto, es fundamental que el núcleo del pasador tenga una dureza menor, lo que le permite deformarse elásticamente y absorber las energías generadas por las cargas de trabajo. Para conseguir estas propiedades mecánicas en el pasador se hace necesario someter la pieza a tratamientos térmicos especializados. Más adelante se va a profundizar en el tratamiento térmico por inducción. Como aclaración, los términos alta y baja dureza se clasifican según la escala de Mohs. Un valor entre 9 y 10 en dicha escala representa una dureza muy alta. Los materiales que pertenecen a este grupo son aquellos que difícilmente pueden ser rayados por otros materiales. Esta escala mide la dureza de los minerales, piedras preciosas y distintas aleaciones como lo es el acero 4140. Por otra parte, en otra escala conocida como Brinell, el acero en estudio presenta valores de dureza entre 248 y 321 HB. Al ser un acero que cuenta con altos valores de dureza según cada escala representativa, tiene una resistencia a la tracción de 1000 - 1300 MPa.

Proceso de Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico es un proceso clave en la industria manufacturera, especialmente en la metalurgia, la fabricación de componentes mecánicos y la ingeniería de materiales. Su objetivo principal es mejorar las propiedades mecánicas de una pieza, como la dureza, resistencia, ductilidad y tenacidad, para incrementar su capacidad de soportar esfuerzos mecánicos. Estos tratamientos se clasifican según las propiedades que se buscan optimizar y el tipo de proceso que se utiliza, dividiéndose en dos grupos principales: tratamientos térmicos y termoquímicos [7].

Los tratamientos termoquímicos modifican la composición química, estructura interna y superficial del material, mientras que los tratamientos térmicos se enfocan en manipular las temperaturas de calentamiento y enfriamiento como también el tiempo, la presión y el medio de gaseoso, para modificar la microestructura en el volumen del material. Cada grupo incluye varias metodologías y tecnologías especializadas, que permite el control de las variables mencionadas anteriormente a través del uso de equipos industriales como hornos. A continuación en la **Tabla VII** se puede observar la clasificación de estos dos grupos y los distintos tipos de tratamientos térmicos que corresponden a cada uno de ellos.

Tabla VII. Clasificación de los tratamientos térmicos en los dos grupos

Térmicos	Termoquímicos
Normalizado	Cementación
Recocido	Nitruración
Revenido	Cianuración
Temple	Carbonitruración

El tratamiento térmico del acero AISI 4140 para obtener las propiedades mecánicas requeridas en el pasador - buje, requiere un tratamiento térmico de temple y revenido. El tratamiento inicia por el calentamiento hasta la temperatura de austenización (850-900 °C), luego se mantiene hasta que la temperatura sea uniforme en toda la sección seguido de un enfriamiento rápido conocido como temple. Generalmente este proceso se realiza con aceite, agua o en vacío. Las barras de acero 4140 endurecidas y templadas también pueden ser nitruradas con éxito, logrando una dureza superficial de hasta 60 Rockwell C. Sin embargo, para equilibrar la dureza con la tenacidad, se realiza un revenido que reduce tensiones internas y mejora la ductilidad. J. Díaz, M. Paredes y S. Hernández [8] demostraron que un revenido a temperaturas de 500-600 °C es efectivo para lograr un equilibrio óptimo entre dureza y tenacidad. Para evaluar la efectividad del tratamiento térmico en el acero 4140, se utilizan pruebas de dureza Rockwell, análisis microestructurales mediante microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM), así como ensayos de resistencia a la tracción y a la fatiga.

En un estudio, una probeta de acero 4140 sometida a un tratamiento térmico de temple en vacío mostró una mejora de cinco puntos en la dureza Rockwell C en comparación con una probeta idéntica de acero AISI-SAE 1045 tratada mediante un temple convencional, utilizando las mismas variables de proceso. Cabe mencionar que el acero 4140 tiene una conductividad térmica de 42,6 W/m*K

En este proyecto se considerará el tratamiento térmico por inducción electromagnética, ya que ha sido el proceso seleccionado por Cadenpal, y el encargado a la empresa de Medellín para su aplicación en los pasadores de las cadenas, además es el proceso más adecuado para el temple en éste tipo de piezas como se mostrará más adelante en el análisis morfológico. A continuación en la **Figura X** se observa un modelo de inducción electromagnética para el calentamiento de la pieza, así como también se muestra un sistema de enfriamiento para realizar el tratamiento térmico de la pieza de trabajo. El tratamiento térmico por inducción consiste en utilizar corrientes eléctricas para calentar metal de manera rápida y controlada.

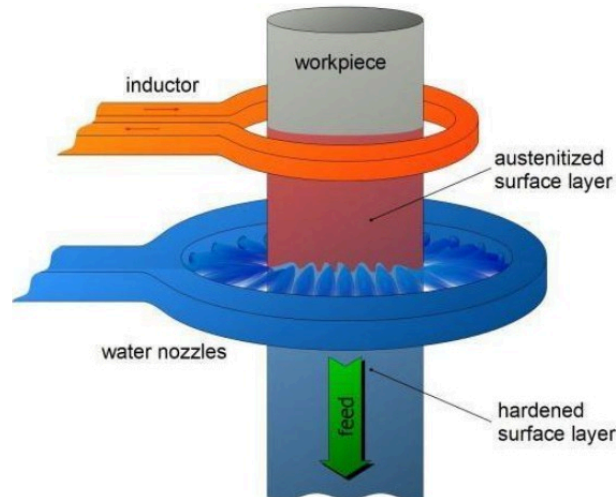


Figura X. Proceso de tratamiento térmico por inducción electromagnética [15]

La bobina inductora produce el campo que excita los electrones, calentando de forma controlada la pieza. En la parte azul de abajo de la figura, se observa el sistema de enfriamiento que cumple la función de hacer el temple en la superficie del material. [9]. Por otro lado, Cadenpal también solicita frecuentemente los tratamientos térmicos de revenido y temple para las otras piezas que conforman una cadena transportadora, pero en este proyecto se va a hacer énfasis en el tratamiento térmico por inducción electromagnética a los pasadores.

El objetivo del tratamiento térmico de temple por inducción electromagnética es obtener una dureza superficial de la pieza sin llegar a modificar la estructura del núcleo del material. El núcleo es fundamental para absorber energía debido a que tiene mayor tenacidad para resistir fracturas. Como resultado, la superficie de la pieza adquiere propiedades mecánicas superiores, lo que reduce el desgaste y minimiza la posibilidad de deformación geométrica (**ver Figura XI**). A continuación se presentan dos ejemplos de cómo el comportamiento del tratamiento térmico de inducción en piezas de sección circular es ideal por la distribución equitativa del campo magnético. En la **Figura XII** sólo se trata térmicamente la superficie que corresponde a los dientes, el núcleo queda más dúctil y absorbe más energía de deformación generada por cargas de trabajo.



Figura XI. Calentamiento por inducción de un eje [15]



Figura XII. Calentamiento por inducción en una rueda dentada [15]

Se recopilaron datos de otra investigación sobre el acero AISI 1045 ante la aplicación del tratamiento sub-cero templado en agua, la utilización del agua es una técnica muy útil ya que genera una estabilidad en el proceso debido a la neutralidad de su ph, esto evita que la pieza se sobrecaliente y haya un daño en la microestructura que pueda presentar a futuro fallas en el material. El tratamiento Sub-cero es un tratamiento criogénico a una temperatura de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, para lo cual se aplicó dióxido de carbono sólido (CO_2) previamente granulada en contacto directo con estos materiales, ya que gracias a la conductividad térmica de los materiales, estos alcanzan un equilibrio térmico a dicha temperatura [10].

Los hornos industriales son máquinas térmicas que utilizan varios tipos de combustibles para su funcionamiento, el más utilizado es el propano en pipetas de gas, los hornos tienen diferentes técnicas de construcción ya que se pueden diseñar según los requerimientos o condiciones de entrada como la cantidad de piezas que se van a tratar térmicamente, cargas que se ejercen sobre el horno, número y tamaño de los moldes, materiales refractarios que soporten las altas temperaturas en el proceso de calentamiento, dimensiones para llevar a cabo el volumen de producción planteado por la empresa. En cuanto a la tecnología de hornos, los

equipos han evolucionado para ofrecer mayor precisión y eficiencia. Los hornos de vacío son ideales para evitar la oxidación y la descarburación del acero durante el temple y revenido. Además, permiten controlar la atmósfera y la presión, ajustando las características finales del material tratado [11].

Otra tecnología importante para el tratamiento térmico del acero 4140 es el uso de hornos de atmósfera controlada, que permiten introducir gases específicos para proteger la superficie del material durante el calentamiento. Esto es crucial cuando se requiere un temple uniforme sin riesgo de oxidación. Además, los hornos eléctricos de alta precisión, equipados con sistemas avanzados de control de temperatura como el uso de sensores inteligentes y sistemas de automatización, permiten un calentamiento más uniforme y un control más exacto del ciclo térmico [12]. Por otro lado, los hornos de inducción, han desempeñado un papel fundamental en la industria debido a su eficiencia energética. Este tipo de hornos utilizan campos electromagnéticos para calentar el material, lo que permite un control preciso de la temperatura y reduce el tiempo de tratamiento térmico.

DISEÑO CONCEPTUAL Y PRELIMINAR

1. Requerimientos

De acuerdo con la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), un requerimiento está definido como una condición o capacidad requerida por el usuario para resolver un problema o alcanzar un objetivo. [14].

“Un requerimiento es simplemente una declaración abstracta de alto nivel de un servicio que debe proporcionar el sistema o una restricción de éste”. [15].

1.1. Clarificación de objetivos

El árbol de objetivos en las metodologías de diseño es una herramienta visual que descompone el objetivo principal de diseño del proyecto en objetivos específicos y subobjetivos, formando una estructura jerárquica (a este proceso también se le conoce como clarificación de objetivos). A diferencia de los objetivos académicos, los objetivos de diseño se centran en identificar y satisfacer los requerimientos del cliente, asegurando que el producto o sistema final cumpla con sus necesidades y expectativas. Es por esta razón que se elaboró un esquema en forma de árbol de objetivos (**ver Figura XIII**). Este esquema permite desglosar y jerarquizar los objetivos específicos necesarios para alcanzar el objetivo general del rediseño de la línea de producción de cadenas transportadoras en Cadenpal, facilitando los sub-objetivos de diseño e implementación del horno para el tratamiento térmico.

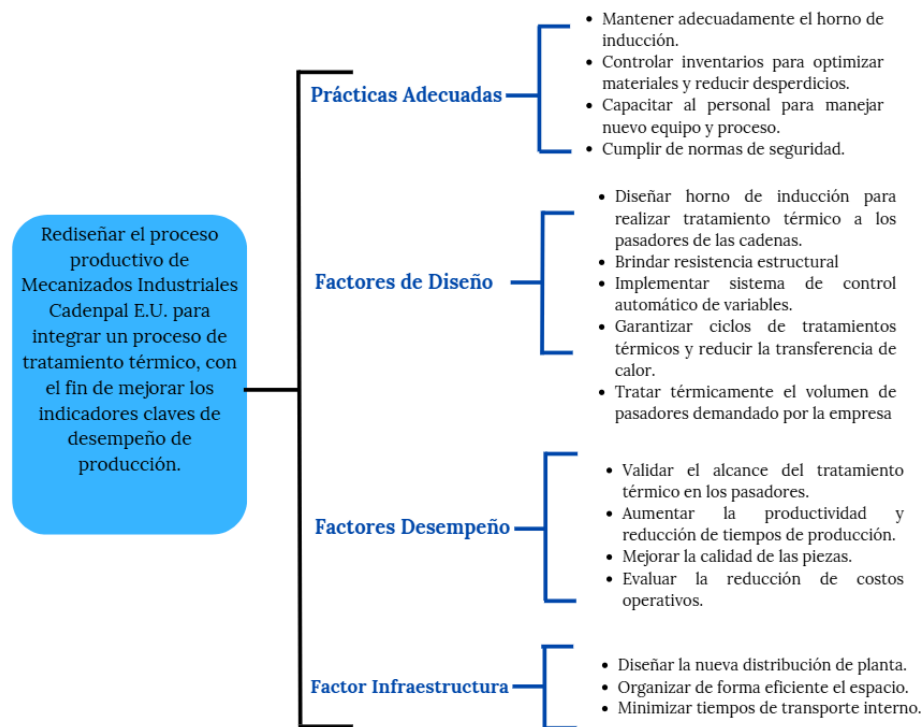


Figura XIII. Árbol de objetivos del rediseño de la línea productiva

1.2. Análisis funcional

Con el propósito de entender el funcionamiento conceptual se realiza un diagrama de caja negra, que se caracteriza por la eliminación de restricciones al proceso creativo y estimular la producción de resultados más diversificados. En este, se representa cada una de las funciones principales y secundarias, evaluando cómo interactúan para satisfacer los requisitos de Cadenpal y los objetivos del diseño del horno de inducción. Este enfoque facilita la identificación de funciones críticas y su interdependencia, asegurando que cada componente esté alineado con la finalidad general del sistema.

En el caso del rediseño de la línea productiva (ver Figura XIV), el análisis se centra en funciones clave como la propuesta de la redistribución de planta como herramienta para incrementar la productividad, también en el estudio sobre el control de producción en el área de mecanizado. La implementación de la metodología Lean Manufacturing al final del análisis del proceso permite incrementar un control efectivo sobre estas áreas a mejorar por parte de ingeniería industrial.



Figura XIV. Caja negra del proceso productivo de Cadenpal

Con el objetivo de enfrentar los desafíos que atraviesa la empresa, en cuanto a la eficiencia operativa y la calidad, se ha desarrollado un modelo conceptual que representa de manera visual y estructurada el proceso productivo de la empresa a través de la herramienta de la caja transparente.

La caja transparente es una herramienta que permite desglosar y analizar cada etapa del proceso productivo, desde la recepción de materias primas hasta el envío de productos terminados. Este enfoque no solo facilita la identificación de áreas de mejora, sino que también promueve una comprensión integral de cómo

interactúan las diferentes fases del proceso. Con el objetivo principal de identificar y organizar las funciones esenciales del sistema unificado, permitiendo una comprensión detallada de los subsistemas y recursos necesarios para su operación eficaz. Al dividir el proceso en tres ramas principales: (recepción y preparación), (procesamiento y tratamiento), y (ensamblaje y finalización), con esta clasificación se busca proporcionar una visión clara de las interdependencias y flujos de trabajo que afectan la eficiencia y la calidad. (Ver Figura XV).

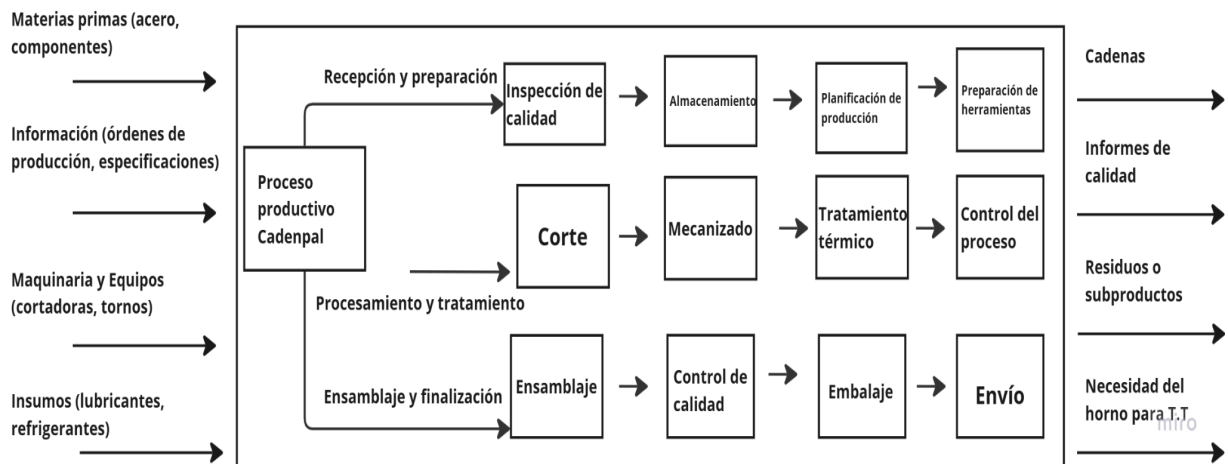


Figura XV. Caja transparente del proceso productivo de cadenas en Cadenpal

En el caso del tratamiento térmico en los pasadores, al ser este un subsistema o subproceso de la caja transparente del proceso productivo, el análisis se centra en funciones clave como el calentamiento, control de temperatura, enfriamiento y sistemas de seguridad, además de elementos de automatización que permitirán a Cadenpal gestionar internamente el proceso de tratamiento térmico. La organización y relación de las funciones en este análisis garantiza que la implementación del nuevo equipo aporten valor en forma de eficiencia y autosuficiencia en el tratamiento térmico. Se realizaron cálculos estimados de la cantidad de pasadores producidos mensualmente, utilizando el volumen, la densidad, la longitud y el diámetro mayor de los mismos, y considerando una producción total de 3,600 kg al mes. A continuación (ver Figura XVI) se observa un valor de 1.128 pasadores producidos al mes.



Figura XVI. Caja negra del horno de tratamiento térmico

A continuación, en la Figura XVII se presenta la caja transparente del horno de inducción diseñado para reemplazar la tercerización del tratamiento térmico. Esto se realiza con el objetivo de incorporar una serie de subsistemas y funciones claves del horno dentro de los procesos productivos de Cadenpal.

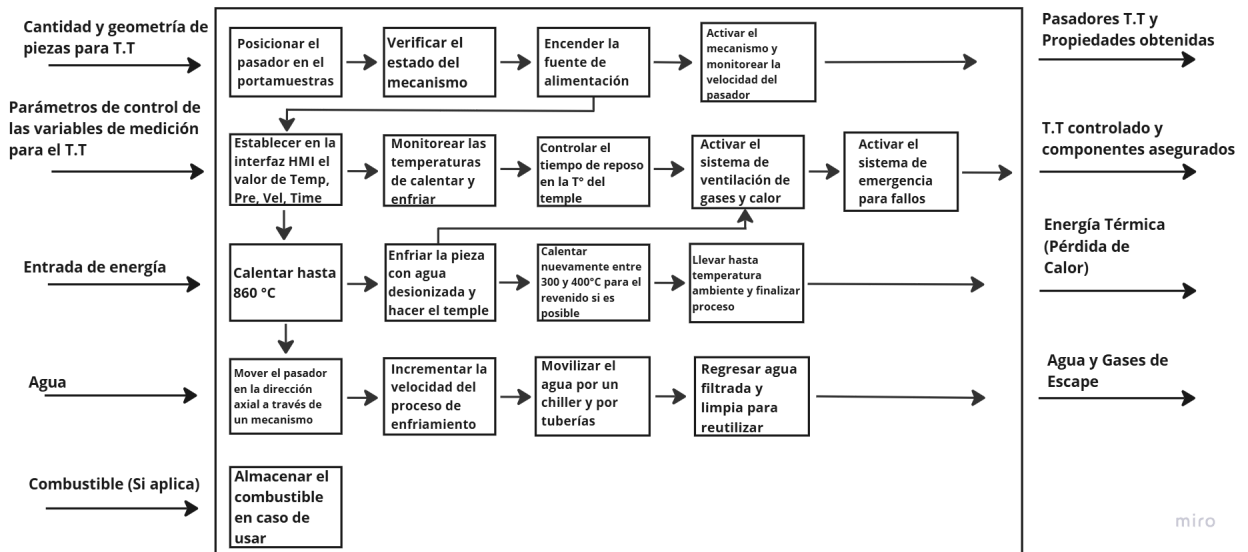


Figura XVII. Caja transparente del horno de tratamiento térmico por inducción

1.3. Fijación de requerimientos del cliente

En esta sección se listan y describen los requerimientos del grupo de interesados en el proyecto. Estos requerimientos representan restricciones clave para el diseño. El cliente principal del proyecto es Mecanizados Industriales Cadenpal, el cual ha asignado un presupuesto de 30 millones de pesos colombianos para efectuar los objetivos de diseño del proyecto.

La **Tabla VIII** detalla y organiza los requerimientos clave para el rediseño de la línea productiva, el control del proceso, la distribución de planta y el diseño del horno, de acuerdo con la metodología de diseño de Nigel Cross, la cual enfatiza el pensamiento de diseño como un proceso iterativo basado en la creatividad, la exploración de alternativas y la toma de decisiones fundamentada en conocimientos y experiencia. Estos requerimientos están clasificados según el enfoque de cada área (Ingeniería Industrial e Ingeniería Mecánica), lo que permite a cada disciplina identificar y priorizar aspectos críticos específicos para cumplir con los objetivos operativos, de seguridad y eficiencia esperados.

Tabla VIII. Fijación de Requerimientos del cliente para el rediseño de la línea productiva y el horno

Categoría	Requerimientos	Disciplina
Operativos	<ul style="list-style-type: none"> Reducir el tiempo de producción de 40 a 30 días, eliminar la tercerización, y reducir los costos 17.000 pesos por kilo. El equipo debe ser eficiente, sin sobrepasar el presupuesto, y mejorar la capacidad de producción en un 35%, pasando de 7 a 9.45 toneladas de cadena por mes. Se solicita un control interno de calidad en cada fase de producción para garantizar que los productos entregados cumplan las expectativas del cliente. 	Ingeniería Industrial
Productivos	<ul style="list-style-type: none"> Se requiere una reorganización de la planta de forma que el nuevo horno de tratamiento térmico ocupe una posición central. 	Ingeniería Industrial
Funcionales	<ul style="list-style-type: none"> El diseño del horno debe contemplar tratamientos térmicos de temple y revenido, adecuado para pasadores de acero AISI 4140 (80-220 mm de longitud, dureza 54 Rockwell C, profundidad de 1.5-4 mm de indentación). Sistema de posicionamiento de pasadores que permita transferencia de calor radial mediante bobinas de cobre, con enfriamiento acelerado por agua. Acceso fácil para mantenimiento y ciclo térmico ajustable. Aislamiento térmico con Poliestireno Expandido en la carcasa. Alineación con la nueva distribución de planta. 	Ingeniería Mecánica

Manufactura	<ul style="list-style-type: none"> ● Fabricación en materiales refractarios de bajo costo. ● Piezas económicas y ensamblaje ergonómico. ● Capacidad de procesamiento mensual de 3600 kg. ● Estructura compacta para fácil desmontaje. ● Estructura sin necesidad de grandes modificaciones ni adquisición de espacio adicional. ● El horno debe ubicarse en una posición central para minimizar el transporte interno de piezas. 	Ingeniería Mecánica
Control de calidad del proceso	<ul style="list-style-type: none"> ● Se requiere para el equipo un sistema de control de lazo cerrado con una pantalla táctil para monitoreo, equipado con sensores capacitivos de autodiagnóstico para detección de fallas y mantenimiento de parámetros de dureza y confiabilidad del proceso. ● Establecer un protocolo de calibración mensual para sensores y actuadores, con registro documentado para cumplimiento de normas de calidad. 	Ingeniería Mecánica
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> ● Se requiere un sistema integrado para prevenir sobrecalentamientos y fallas, con alertas para desviaciones en el ciclo térmico. ● Acoplamiento de un ventilador y rejillas para disipar el calor después del proceso. ● Implementar señalización clara de zonas de riesgo (alto voltaje, alta temperatura, movimiento de maquinaria) según estándares internacionales. 	Híbrido
Tiempo	<ul style="list-style-type: none"> ● Implementación en la planta en un plazo máximo de 6 meses, incluyendo selección, diseño, adquisición e instalación. ● Completar la implementación del rediseño de la línea productiva, incluyendo la instalación y puesta en marcha del horno de inducción, dentro del plazo establecido. ● Ejecutar pruebas piloto del sistema integrado para validar tiempos de ciclo y realizar los ajustes necesarios previos a la operación a capacidad total. 	Híbrido
Ecológicos	<ul style="list-style-type: none"> ● Diseño con bajo impacto ambiental, minimización del consumo energético y optimización de recursos. El cliente requiere un sistema de enfriamiento para controlar las emisiones y que sea seguro para trabajadores y el entorno. ● Establecer un sistema de separación y reciclaje de residuos metálicos (virutas, recortes) y no metálicos (embalajes, aceites usados), con contenedores específicos y alianzas con gestores autorizados. ● Buscar opciones de instalación de filtros de partículas en áreas de soldadura y pintura, y un sistema de ventilación forzada para evitar acumulación de gases o polvo. 	Ingeniería Mecánica
Éticos y Legales	<ul style="list-style-type: none"> ● Cumplimiento de la Ley 99 de 1993 (filtrado de aire y reducción de emisiones), Decreto 1072 de 2015 y Resolución 0312 de 2019 (ventilación y equipo de protección básico). ● La resolución 2400 de 1979 establece disposiciones sobre higiene y seguridad en el trabajo, incluyendo ventilación, iluminación y condiciones ambientales. Cumplir con ciertos niveles de ruido (<85 dB). En este caso para la línea productiva. ● El decreto 1072 de 2015 (SG-SST) obliga a implementar un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, evaluando riesgos físicos (ruido, calor) y ergonómicos. ● La resolución 1401 de 2007 regula la prevención de riesgos eléctricos en instalaciones industriales. Cumplir con ciertas 	Híbrido

	distancias de seguridad entre las máquinas. <ul style="list-style-type: none"> • La norma ISO 6385 recomienda principios ergonómicos en el diseño de puestos de trabajo para reducir fatiga y lesiones. 	
Restricciones	<ul style="list-style-type: none"> • Limitaciones de presupuesto para materiales y tecnologías avanzadas, espacio reducido para instalación y distribución de planta. Requiere adaptación de infraestructura y capacitación de personal. Cumplimiento de normativas de seguridad y ambientales. • Debe establecerse un plan de acción para que la distribución de la planta no sea contraproducente en términos económicos, de tiempo y de espacio. 	Híbrido

1.4. *Determinación de características de ingeniería*

En este apartado, se establece la fijación de especificaciones de diseño en términos de indicadores técnicos de desempeño específicos. Estas especificaciones permiten describir las características del sistema de tratamiento térmico y sus componentes, así como su presentación ante los grupos de interés, asegurando el cumplimiento de sus requerimientos. A partir de aquí, el trabajo de ingeniería industrial se separa del de ingeniería mecánica, dado que en esta sección se determinan las características técnicas del horno. El horno debe someterse a prueba para evaluar si representa la mejor alternativa de ingeniería y cumple con las necesidades del cliente. Para el horno, se realizó una casa de la calidad (ver **Figura XVIII**), que se presenta más adelante.

Casa de la calidad (Para el análisis de requerimientos del horno)

Es una herramienta de diseño utilizada para evaluar y comparar los requerimientos del cliente contra unas especificaciones técnicas de diseño en ingeniería, con la idea de someter a prueba el diseño del horno y encontrar interacciones con las necesidades y expectativas del cliente. En la **Tabla IX** se muestran las aclaraciones de las distintas notaciones y símbolos establecidos según la dirección de mejora del diseño en la importancia que se le da a cada requerimiento.

Tabla IX. Notación para la dirección de mejora de los requerimientos de diseño

Dirección de mejora del diseño	Simbología
Maximizar el requerimiento	▲
Minimizar el requerimiento	▼
Alcanzar el objetivo	◇

La **Tabla X** presenta una explicación del peso de las relaciones entre los requerimientos del cliente y los requerimientos técnicos de ingeniería con la simbología para cada uno.

Tabla X. Notación para las relaciones entre los requerimientos del cliente y los de ingeniería

Relaciones	Simbología
Fuerte	●
Media	○
Baja	A

En la **Figura XVIII** se pueden detallar los máxima relación y porcentajes de importancia que el cliente le asignó a cada uno de los requerimientos y finalmente se encuentran las ponderaciones que reflejan la importancia relativa de cada requerimiento según el cliente, están ordenadas en una escala de 1 a 5, donde 1

indica la menor relevancia y 5 la mayor.

Direction of Improvement	▼	▲	▲	▲	▼	▼	▲	◇	▲	▲
Customer Requirements (Explicit and Implicit)	Consumo energético de 150 kWh/ciclo	Materiales refractarios y metálicos	Rango de temperaturas entre 800 y 950°C	Diseño rectangular menor a 600 kg	Costos de materiales y piezas	Frecuencia de mantenimiento 8 horas	Obtener una dureza de 64 Rockwell C	Ley 99 de 1993, Decreto 1072 de 2015 y Resolución 0312 de 2019	Sistema de ventilación para disipar el calor	Procesamiento de 3.600 kg/mes de pasadores
Consumo energético bajo	●									●
Durabilidad para altas temperaturas		●	●		○					
Sistema de control de temperatura preciso, accesible y automático			●						▽	
Estructura ligera y compacta				●	○					○
Costo de fabricación asequible		●		○	●					
Facilidad de mantenimiento		○		○		●			●	
Mejorar la dureza y resistencia de los pasadores		●	●				●			
Cumplimiento de normas de seguridad		▽		▽				●		
Sistema de prevención de sobrecalentamientos y sistema de ventilación			●						●	
Cubrimiento de la demanda estimada	●									●

Figura XVIII. Casa de la Calidad para el horno

2. Exploración de ideas y selección de alternativas

2.1. Exploración y selección

En esta sección de especificación del diseño, se presentan los requisitos técnicos y operativos que la línea productiva de cadenas transportadoras rediseñada debe cumplir para satisfacer las necesidades de Cadenpal y de sus grupos de interés. Este análisis se enfoca en tres aspectos clave del proyecto: el rediseño de la línea productiva, la propuesta de una nueva distribución de planta y el diseño de un horno para realizar tratamientos térmicos *in-house*. La sección incluye un proceso de generación de ideas, donde se listan siete criterios de selección para tener en cuenta tanto en el rediseño de la línea productiva como en la propuesta de la nueva distribución de planta en el componente de ingeniería industrial y por el lado de la ingeniería mecánica se listan tres alternativas para el diseño y selección del tipo de horno más eficiente. Este proceso permite la exploración de ideas para cada disciplina.

Visión de la Ingeniería Industrial

Para asegurar una elección fundamentada, se establecieron múltiples criterios de selección y rúbricas de evaluación, en el caso para el modelo ideal de funcionamiento de la línea productiva (ver **Tabla XI**), así como también alternativas para la distribución de planta y para el horno de tratamientos térmicos (ver **Tabla XX**). Lo anterior se complementa aplicando una serie de ponderaciones que integren las perspectivas de todos los actores involucrados en el proyecto.

Tabla XI. Criterios de selección para la alternativa del modelo de la línea productiva

Criterios	Definición
Eficiencia operativa	Medida de la capacidad de la línea de productividad para maximizar la producción con el mínimo de recursos.
Flexibilidad	Capacidad de la línea para adaptarse a cambios en la demanda en los tipos de

	productos.
Calidad del producto	Grado en que los productos cumplen con las especificaciones y expectativas del cliente.
Costos de implementación	Facilidad de mantenimiento y operación de la línea productiva.
Mantenimiento de operación	Facilidad de mantenimiento y operación de la línea productiva.
Sostenibilidad	Incluyendo el uso de recursos y la generación de residuos.
Seguridad laboral	Criterio de seguridad de los trabajadores haciendo uso de la línea productiva.

En función de los problemas identificados, principalmente los altos costos y las demoras en el tratamiento térmico de los pasadores de las cadenas de transporte de bagazo, se han desarrollado diversas alternativas desde la perspectiva de la ingeniería industrial. El objetivo es optimizar el sistema productivo de Cadenpal, disminuyendo los costos de producción sin disminuir la calidad del servicio, evitando incumplimientos y la posible pérdida de mercado. A continuación, se presentan cinco alternativas que buscan mejorar los KPIs del proyecto, basándose específicamente en la reducción de costos operativos, tiempos de entrega y control de calidad.

Para seleccionar la mejor alternativa, se emplea la metodología de selección AHP (Proceso Analítico Jerárquico), que es especialmente adecuada para este proyecto. En ingeniería industrial, AHP se usa ampliamente para estructurar problemas complejos en decisiones jerárquicas, permitiendo evaluar múltiples criterios cuantitativos y cualitativos simultáneamente. En este caso, AHP es ideal porque facilita la comparación rigurosa de cada alternativa respecto a los KPIs clave y asigna prioridades basadas en el impacto de cada criterio. Al abordar la elección de una alternativa que no solo reduzca costos sino que también mejore la confiabilidad del servicio y la satisfacción del cliente, AHP permite un análisis integral y objetivo, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en un entorno de producción competitivo.

Alternativas para mejora del sistema de producción

- **Implementar un Sistema de Tratamiento Térmico In-House**

Instalar un horno de tratamiento térmico por inducción en las instalaciones de Cadenpal permitiría internalizar el proceso, eliminando la necesidad de tercerización y reduciendo los costos de transporte y los tiempos de entrega. Esta alternativa otorga control total sobre la calidad y los tiempos de procesamiento, optimizando la eficiencia operativa. Además, evitar la dependencia de proveedores externos permite responder rápidamente a las variaciones en la demanda y mejora la rentabilidad de la operación.

- **Comprar Pasadores con Tratamiento Térmico en Cali**

Adquirir los pasadores ya tratados térmicamente en Cali es una opción que reduciría los tiempos de entrega y evitaría los costos de transporte a Medellín. Sin embargo, esta alternativa presenta limitaciones en cuanto a la disponibilidad y a un costo elevado de los pasadores en la región, lo que podría afectar la consistencia del abastecimiento y dificultar el control sobre la calidad final del producto.

- **Tercerizar con una Empresa Extranjera**

Contratar una empresa extranjera para el tratamiento térmico presenta una mejora en el cumplimiento de los tiempos de entrega en comparación con el proveedor actual en Medellín. Aunque esta alternativa garantiza mayor puntualidad, implica un incremento en los costos de transporte y una dependencia de un proveedor en el extranjero, lo que puede resultar costoso y menos viable a largo plazo.

- **Enviar Lotes Más Grandes para Tratamiento Térmico**

Optar por el envío de mayores volúmenes de pasadores en cada envío permite reducir la frecuencia de transporte y mejorar el cumplimiento en los tiempos de entrega. Esta alternativa podría disminuir los costos de transporte por unidad tratada; sin embargo, incrementa los costos de inventario y requiere de un mayor espacio de almacenamiento, lo que podría afectar la eficiencia del sistema productivo.

- **Contratar una Empresa de Transporte de Mejor Calidad**

Subcontratar una empresa de transporte con mejor cumplimiento en tiempos de entrega reduciría los retrasos en los envíos a Medellín y mejoraría la eficiencia logística. No obstante, esta opción implicaría un aumento en los costos de transporte y no resuelve la dependencia de proveedores externos para el tratamiento térmico, lo cual limita su efectividad como solución integral.

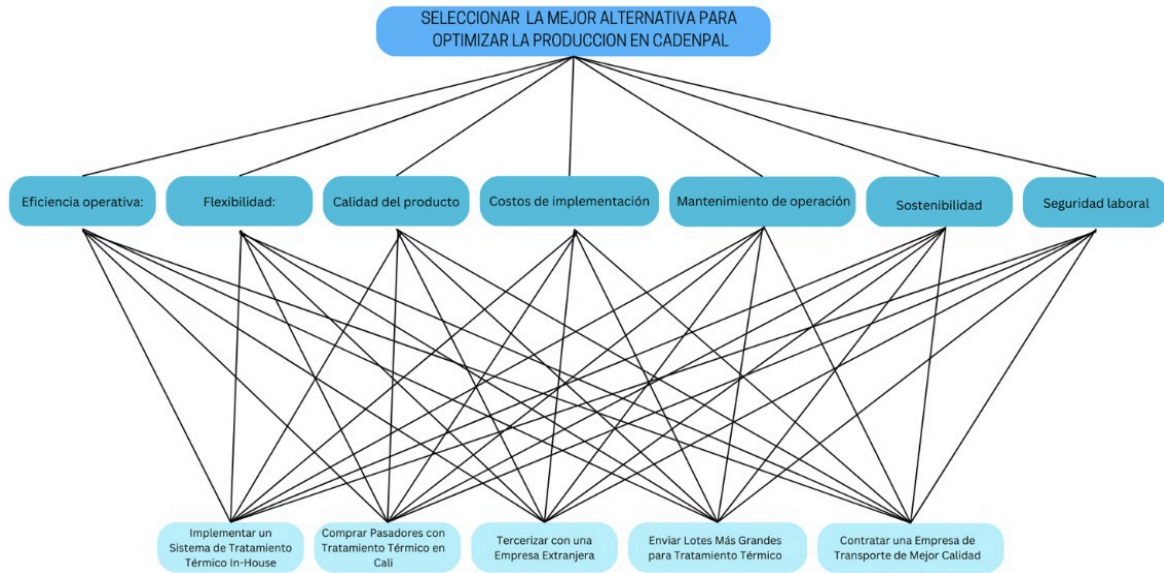


Figura XIX. Metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) para la selección de alternativa

A continuación se realiza el proceso analítico jerárquico AHP (por sus siglas en inglés Analytic Hierarchy Process) contrastando las alternativas y criterios escogidos tal como se muestra en la **Figura XIX**, con esta metodología de toma de decisiones es posible elegir una alternativa óptima para mejorar los KPIs desde una visión sistémica, para posteriormente aplicar herramientas de ingeniería mecánica para llevarlo a cabo.

Tabla XII. Análisis de Criterios de selección desde un enfoque sistémico

Criterios	Eficiencia Operativa	Flexibilidad	Calidad del Producto	Costos de Implementación	Mantenimiento de Operación	Sostenibilidad	Seguridad Laboral
Eficiencia Operativa	1	3	5	7	5	4	6
Flexibilidad	1/3	1	3	5	4	2	3
Calidad del Producto	1/5	1/3	1	3	2	2	5
Costos de Implementación	1/7	1/5	1/3	1	2	3	4
Mantenimiento de Operación	1/5	1/4	1/2	1/2	1	3	4
Sostenibilidad	1/4	1/2	1/2	1/3	1/3	1	2
Seguridad Laboral	1/6	1/3	1/5	1/4	1/4	1/2	1

Tabla XIII. Contraste de las alternativas con el criterio de eficiencia operativa

A. Eficiencia Operativa					
Alternativas	In-house	Cali	Extranjera	Lotes Grandes	Mejor Transporte
In-house	1	3	5	7	9
Cali	1/3	1	4	6	7
Extranjera	1/5	1/4	1	3	4
Lotes Grandes	1/7	1/6	1/3	1	2
Mejor Transporte	1/9	1/7	1/4	1/2	1

Tabla XIV. Contraste de las alternativas con el criterio de flexibilidad

B. Flexibilidad					
Alternativas	In-house	Cali	Extranjera	Lotes Grandes	Mejor Transporte
In-house	1	5	3	4	6
Cali	1/5	1	2	3	5
Extranjera	1/3	1/2	1	3	4
Lotes Grandes	1/4	1/3	1/3	1	3
Mejor Transporte	1/6	1/5	1/4	1/3	1

Tabla XV. Contraste de las alternativas con el criterio de calidad del producto

C. Calidad del Producto					
Alternativas	In-house	Cali	Extranjera	Lotes Grandes	Mejor Transporte
In-house	1	6	7	5	8
Cali	1/6	1	3	4	6
Extranjera	1/7	1/3	1	3	5
Lotes Grandes	1/5	1/4	1/3	1	3
Mejor Transporte	1/8	1/6	1/5	1/3	1

Tabla XVI. Contraste de las alternativas con el criterio de costos de implementación

D. Costos de Implementación					
Alternativas	In-house	Cali	Extranjera	Lotes Grandes	Mejor Transporte
In-house	1	4	3	5	6
Cali	1/4	1	2	3	4
Extranjera	1/3	1/2	1	2	3
Lotes Grandes	1/5	1/3	1/2	1	2
Mejor Transporte	1/6	1/4	1/3	1/2	1

Tabla XVII. Contraste de las alternativas con el criterio de mantenimiento de operación

E. Mantenimiento de Operación					
Alternativas	In-house	Cali	Extranjera	Lotes Grandes	Mejor Transporte
In-house	1	6	5	3	4
Cali	1/6	1	4	3	2
Extranjera	1/5	1/4	1	3	2
Lotes Grandes	1/3	1/3	1/3	1	2
Mejor Transporte	1/4	1/2	1/2	1/2	1

Tabla XVIII. Contraste de las alternativas con el criterio de sostenibilidad

F. Sostenibilidad					
Alternativas	In-house	Cali	Extranjera	Lotes Grandes	Mejor Transporte
In-house	1	5	4	3	2
Cali	1/5	1	2	3	3
Extranjera	1/4	1/2	1	3	2
Lotes Grandes	1/3	1/3	1/3	1	2
Mejor Transporte	1/2	1/3	1/2	1/2	1

Tabla XIX. Contraste de las alternativas con el criterio de seguridad laboral

G. Seguridad Laboral					
Alternativas	In-house	Cali	Extranjera	Lotes Grandes	Mejor Transporte
In-house	1	5	6	3	4
Cali	1/5	1	4	3	3
Extranjera	1/6	1/4	1	3	2
Lotes Grandes	1/3	1/3	1/3	1	2
Mejor Transporte	1/4	1/3	1/2	1/2	1

Después de analizar todos los criterios mediante la metodología AHP, la alternativa de implementar un tratamiento térmico in-house resulta la mejor opción en términos de eficiencia operativa, flexibilidad, calidad, sostenibilidad, y seguridad laboral. Aunque implica un mayor costo inicial, los beneficios a largo plazo en términos de ahorro, control de calidad, y satisfacción del cliente justifican esta inversión. Esta alternativa es la que mejor apoya el objetivo de reducir costos y mejorar el servicio, garantizando que los pasadores estén disponibles y listos sin depender de proveedores externos que puedan afectar la cadena de suministro.

Dado que la implementación de un tratamiento térmico in-house ha sido identificada como la alternativa óptima para alcanzar los objetivos de reducción de costos, mejora en la calidad del servicio y cumplimiento con las expectativas de los clientes y desde una visión de rediseño del sistema desde una visión de la Ingeniería Industrial, se procede a analizar los requerimientos específicos y los criterios desde la visión de la Ingeniería Mecánica necesarios para seleccionar el sistema de tratamiento térmico más adecuado. Este análisis abarca la evaluación de tecnologías disponibles, considerando factores críticos como la capacidad operativa, eficiencia energética, facilidad de mantenimiento, y cumplimiento con estándares de sostenibilidad y seguridad, con el fin de asegurar una solución integral que potencie la competitividad y rentabilidad de la empresa.

Visión de la Ingeniería Mecánica

Selección del tipo de horno de inducción

Aunque el cliente había expresado previamente la necesidad que tiene de adquirir un horno de inducción para tratamientos térmicos dentro de la empresa se procedió a realizar un análisis de unos criterios de selección y evaluación de alternativas para distintos tipos de hornos. Este proceso se llevó a cabo para confirmar, mediante aspectos técnicos de ingeniería, que la opción elegida cumplía con todos los requisitos y era realmente la más adecuada y óptima para satisfacer las necesidades del cliente en términos de funcionalidad, eficiencia y cumplimiento de los objetivos del proyecto.

Para la selección de alternativas del horno se tuvieron en cuenta tipos de hornos que permitan realizar tratamientos térmicos de temple y revenido. También se busca que las distintas alternativas ofrezcan una demanda de energía eléctrica baja para mejorar la eficiencia energética al incrementar la liberación de calor al medio.

Tabla XX. Definición de los criterios para la selección de la alternativa del horno

Criterios	Definición
Materiales	Evalúa los materiales utilizados para la fabricación de la estructura del horno: materiales refractarios como cerámica o cemento, metálicos como acero 1045 y cobre para las bobinas del inductor.
Costos	Considera el costo total de diseño, fabricación, instalación y operación, teniendo en cuenta el presupuesto fijado al inicio del proyecto.
Consumo Energético	Evalúa la energía necesaria para el funcionamiento del horno y su eficiencia. Mide los Kilovatios - hora (kWh) de consumo (\$1073 COP/kilo), la potencia requerida para el arranque del horno y las conexiones eléctricas que representen el menor consumo y la mayor eficiencia del proceso. El consumo energético de la planta

Peso	Se mide la influencia del peso y las cargas del horno en la facilidad de transporte e instalación. Se tiene en cuenta cual de todos es más pesado debido a los materiales que utilizan en sí
Factibilidad Técnica	Considera la facilidad de construcción del equipo e implementación tecnológica requerida por la planta. Se tiene en cuenta el suministro de gas, de electricidad, de combustible y el suministro de piezas de fabricación como bobinas para la generación del campo electromagnético.
Tamaño	El espacio que ocupa el horno es clave, especialmente si el espacio en planta es limitado. Por ejemplo, un horno de resistencia puede ocupar más espacio por sus elementos calefactores, mientras que los hornos de inducción pueden diseñarse en un formato más compacto.
Sistema de Control de T.T	Evalúa la capacidad del horno para adaptar un sistema de control preciso que permita ajustar y controlar parámetros críticos como temperatura, tiempo y velocidad de enfriamiento.

Por otro lado, en la **Tabla XXI** se presentan valores para cada uno de los requerimientos técnicos, estos datos son obtenidos a partir de referencias comerciales obtenidas de catálogos de proveedores, fichas técnicas y distribuciones actuales del mercado. Son datos precisos y reales que muestran una serie de aproximaciones hechas para cada tipo de horno aplicado en el entorno real del problema presentado en la empresa. Las fuentes de donde se extrajeron los datos pertenecen a las siguientes empresas: (Alibaba, Carbolite Gero, Lucifer Furnaces, Nabertherm, Heat Treat Today, Direct Industry, Thermolyne, Inductotherm, EFD INduction, Thermal Processing Magazine, Honeywell). Estas fuentes se encuentran organizadas en las referencias.

Tabla XXI. Referencias comerciales del mercado para los criterios de selección para la alternativa del horno

Alternativas/ Criterios	Materiales	Costos	Consumo Energético	Peso	Factibilidad Técnica	Tamaño en m	Sistema de control de T.T
Horno por Resistencia eléctrica	Acero inoxidable y cerámica resistente al calor	\$30,000 USD	150 kWh/ciclo	220 kg	Diseño sencillo y robusto	1.5 1.0 1.0	Control digital por PLC Siemens.
Horno de Inducción	Bobinas de cobre y acero	\$15,000 USD	100 kWh/ciclo	150 kg	Ideal para piezas de sección circular Ideal para tratamientos controlados en regiones específicas de la pieza	1.2 0.8 0.8	Control avanzado por PLC Omron y pantalla táctil
Horno de Gas	Acero y ladrillos refractarios	\$10,000 USD	200 kWh/ciclo	320 kg	Requiere ventilación adecuada y compleja	1.8 1.2 1.2	Termostato básico de Honeywell

En la **Tabla XXII** se presentan las ponderaciones asignadas a cada criterio de evaluación, obtenidas mediante un sondeo con el principal grupo de interés. Estas ponderaciones reflejan la importancia relativa de cada criterio, en una escala de 1 a 5, donde 1 indica la menor relevancia y 5 la mayor. Para los tres tipos de hornos, se realizó un análisis exhaustivo de los requerimientos de diseño, apoyado en referencias comerciales para asegurar que cada alternativa pudiera cumplir óptimamente los requisitos de tratamiento térmico. Así, cada

calificación asignada refleja este análisis: por ejemplo, el horno por resistencia obtuvo un 4 en peso, debido a su estructura más pesada y menos práctica, mientras que el horno por inducción, más ligero, obtuvo un 5. De esta manera, las puntuaciones proporcionan una comparativa precisa entre los requerimientos técnicos y las preferencias del cliente y de empresas con experiencia en tratamientos térmicos por inducción. Por otra parte, los datos consignados en la **Tabla XXII** provienen de diversas consultas con empresas de experiencia en tratamientos por inducción y una entrevista con el cliente, donde se le preguntó qué percepción tenía de cada uno de los criterios de selección establecidos para los distintos tipos de hornos y qué nivel de importancia representan para sus requerimientos.

Tabla XXII. Calificación de los criterios de selección para la alternativa de diseño del horno

Alternativas /Criterios	Materiales	Costos	Consumo Energético	Peso	Factibilidad Técnica	Tamaño	Sistema de control de T.T
Horno por Resistencia	5	5	4	4	5	3	5
Horno por Inducción	5	5	5	5	5	5	5
Horno de Gas	5	5	3	3	3	2	5

Tras analizar las valoraciones obtenidas en la **Tabla XXII** del principal grupo de interés sobre los criterios de selección de hornos, se concluyó que la opción más adecuada es el horno por inducción. Esta alternativa cumple satisfactoriamente con los objetivos y requerimientos tanto del cliente como de ingeniería, confirmando que la elección anticipada del cliente fue acertada para cubrir las necesidades de la empresa.

Para contextualizar al lector sobre la alternativa de horno seleccionada para su diseño, cuyo objetivo es incorporar el tratamiento térmico in house para los pasadores de las cadenas transportadoras de bagazo, se presenta una introducción detallada sobre el funcionamiento de los hornos de inducción, en la cuál se destacan los efectos y fenómenos físicos que intervienen en su operación para una mayor claridad del posterior diseño conceptual. Cabe recordar que en la parte de revisión de literatura se dio una introducción a los diferentes tipos de hornos para tratamientos térmicos y sus aplicaciones en la industria.

Para hornos de inducción, el calentamiento es significativamente más rápido en comparación con otros métodos convencionales debido a la alta densidad de potencia aplicada directamente a la pieza.

Tipos de Hornos de Inducción

En la industria existen dos tipos de hornos de inducción como lo son:

- ***Horno de inducción sin núcleo (media - alta frecuencia):*** Es un horno que opera sin un núcleo magnético o inductor, en su lugar disponen de un recubrimiento refractario diseñado para resguardar la bobina de cobre. Dado que la corriente eléctrica que circula a través de ella es bastante elevada, este recubrimiento permite que el campo magnético la atraviese, lo que origina la fusión de la carga metálica contenida dentro. Además, en este tipo de horno, la bobina se protege de las altas temperaturas mediante la circulación de agua en su interior, lo que ayuda a su refrigeración. Son ideales para aplicaciones que requieren una fundición más rápida de aleaciones, permitiendo variar las frecuencias según las necesidades de los materiales a fundir. A continuación en la **Figura XX** se presenta una ilustración de un horno de inducción sin núcleo junto con el detalle de cada uno de sus componentes. [27].

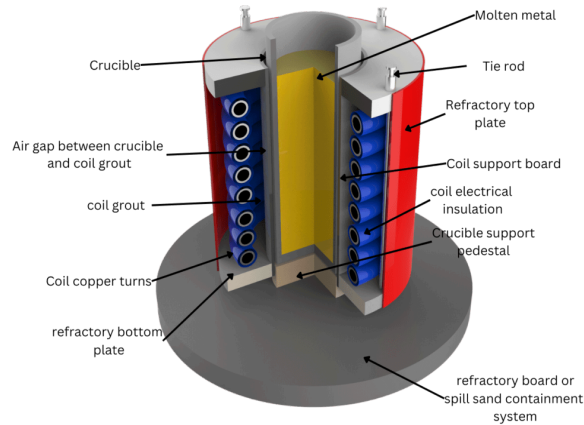


Figura XX. Horno de inducción sin núcleo [28]

Tomada de: "Beneficios de la inducción en fundidoras de metal", Electroheat Induction México

- Horno de inducción de canal (baja frecuencia):** Es un horno donde el calentamiento ocurre en un canal estrecho y de área reducida ubicado en la parte inferior. Este canal está rodeado por un núcleo de acero laminado alrededor de la bobina, que se activa cuando el canal contiene el material a fundir. El circuito eléctrico en la bobina genera un intenso campo electromagnético que provoca el calentamiento del metal. El vaciado solo se realiza cuando es necesario cambiar el recubrimiento refractario, lo que los vuelve útiles para fundiciones pequeñas con requisitos específicos. A continuación en la **Figura XXI** se presenta una ilustración de un horno de inducción de canal junto con el detalle de cada uno de sus componentes. [27].

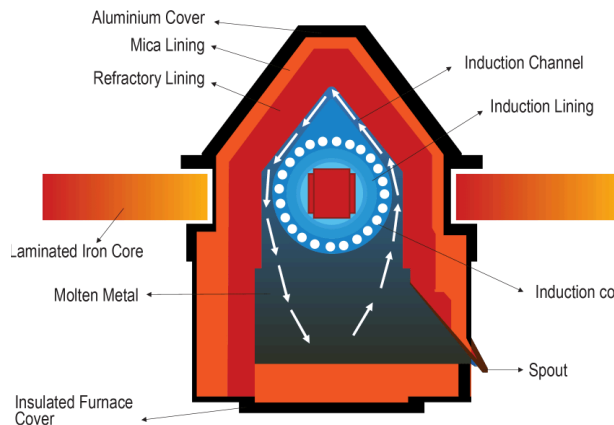


Figura XXI. Horno de inducción de canal [28]

Tomada de: "¿Cómo funciona el horno de inducción de canal?", Electroheat Induction México

- Horno de fundición (baja - media - alta frecuencia):** Es un tipo de horno que opera en diferentes rangos de frecuencia para fundir materiales metálicos. Su funcionamiento se basa en la generación de un campo magnético mediante una bobina, en cuyo interior se coloca un crisol con el material a fundir. Al activar la bobina, la corriente inducida produce calor que calienta el crisol, fundiendo los metales que se encuentran ahí. La fuente de alimentación, se conecta a una red eléctrica de la planta que suministra la energía necesaria para el calentamiento. Estos hornos se utilizan ampliamente en la fabricación de componentes metálicos, esto se da gracias a su diseño compacto y su capacidad para ofrecer un control preciso sobre la temperatura y el tiempo de fusión. Por otro lado, este tipo de hornos también se utiliza para tratamientos térmicos y forjado de piezas. Para estos procesos se elimina el crisol y solo se coloca la pieza a calentar dentro de la bobina. A diferencia de los otros tipos de hornos que se mencionaron, este no utiliza un chasis o estructura que cubre la bobina, por el contrario, la bobina queda expuesta a las condiciones del ambiente donde opera. A continuación, en la **Figura XXII** se presenta un horno de fundición (la fuente de alimentación junto a la bobina). y en la **Figura XXIII** se presenta un horno de inducción para tratamientos térmicos.



Figura XXII. Horno de inducción para fundición [29]



Figura XXIII. Horno de inducción para T.T [29]

Principio de Funcionamiento del Horno de Inducción

Los hornos de inducción funcionan a partir del calentamiento electromagnético de metales conductores como acero, aluminio o cobre. Este proceso se basa en la ley de inducción electromagnética propuesta en el año 1831 por parte del científico británico Michael Faraday. Este principio enuncia que una bobina de alambre que se conecta a una fuente de alimentación de alto voltaje, o más bien un generador de corriente alterna, induce una corriente alterna de alta frecuencia que pasa por la bobina, y a su vez, esto origina un campo magnético variable. Este campo induce corrientes de Foucault en el metal, produciendo calor por el efecto Joule. Para lograr un calentamiento uniforme, la frecuencia de operación y la geometría de la bobina deben ajustarse al material y tamaño de la pieza a tratar térmicamente. El campo magnético (B) se puede expresar según la siguiente relación matemática $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, donde μ_0 es una constante conocida como la permeabilidad del espacio libre medida en henrios por metro (H/m), I es la corriente eléctrica inducida, medida en amperios (A) y r es la distancia en metros de los electrones. La generación de calor se lleva a cabo de manera localizada, lo que elimina el riesgo de sobrecalentamiento y, sumado a que no hay la necesidad de establecer un contacto directo entre los metales conductores (se evita el desgaste mecánico y térmico de las piezas) se puede considerar que este proceso tiene una alta eficiencia térmica. La permeabilidad del espacio libre es una constante magnética que mide la resistencia o capacidad que tiene un espacio libre (vacío) para permitir la formación de un campo magnético y los efectos que este genere en el material presente en el espacio. Esta propiedad tiene similitud con la susceptibilidad magnética, que es la que indica, en respuesta a un campo magnético aplicado, el grado de magnetización de un material. [29]

A continuación se presentan unos ejemplos sobre la aplicación de la ley de inducción de Faraday en unos materiales conductores a partir de dos casos, el primero cuando se aplica voltaje (ver Figura XXIV) y el segundo cuando se induce corriente (ver Figura XXV)

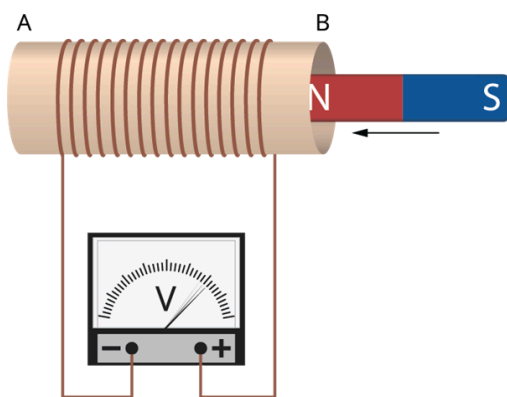


Figura XXIV. Ley de Inducción de Faraday (Voltaje)

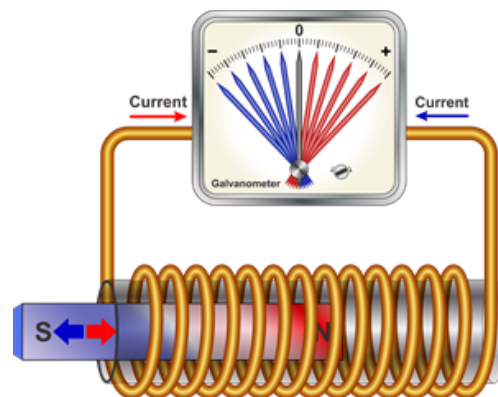


Figura XXV. Ley de Inducción de Faraday (Corriente)

Tomadas de: <https://www.yaclass.in/p/science>

Efecto Joule

El efecto Joule es un fenómeno físico que ocurre cuando una corriente eléctrica atraviesa un material conductor, generando calor debido a la resistencia que opone el material al paso de los electrones (ver Figura XXVI). En mayor profundidad, su principio de funcionamiento consiste en la disipación de energía térmica, que es consecuencia directa de la interacción entre los electrones en movimiento y la estructura interna del

conductor. Los electrones se mueven de manera aleatoria, lo que provoca interacciones con otras partículas y se genera movimiento y desprendimiento de calor. La cantidad de calor producido depende de varios factores, como la resistencia del material, ya que a mayor resistencia, mayor será la conversión de energía eléctrica en térmica. También influye la intensidad de la corriente, pues un flujo de electrones más elevado incrementa la energía disipada. Por último, el tiempo de circulación de la corriente genera un efecto acumulativo que aumenta progresivamente la temperatura. Lo anterior da origen a dos fenómenos de transferencia de calor, por conducción y convección. [30].

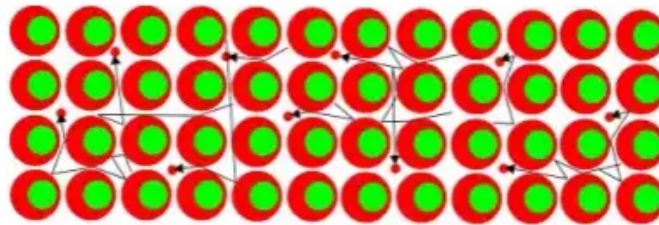


Figura XXVI. Arreglo de los electrones cuando se mueven de forma aleatoria [30]

El efecto Joule es aprovechado en numerosas aplicaciones, como en hornos eléctricos, soldadura por resistencia, electrodomésticos como planchas, estufas, calefactores y sistemas de frenado por inducción electromagnética en trenes y vehículos industriales. Sin embargo, también representa un problema en algunos circuitos eléctricos, ya que el exceso de calor puede provocar sobrecalentamientos y daños en los componentes, lo que hace necesario el uso de sistemas de refrigeración o materiales con baja resistencia eléctrica. [30]

En los apartados siguientes se muestra una metodología de diseño mecánico desarrollada a partir del material, propiedades y geometría de los pasadores producidos en la empresa (Acero AISI 4140), según los requerimientos del cliente que establecen la división de los subsistemas que conforman el horno y el proceso de calentamiento determinado para los pasadores según su volumen requerido. Esta metodología fue realizada a partir de los conceptos físicos involucrados en el funcionamiento de los hornos de inducción y en los criterios de diseño en ingeniería mecánica.

Según la literatura, se determinó el tiempo requerido para calentar una probeta de ensayo estándar de acero 4140 desde la temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura de austenización [28]. Para esto se utilizaron los datos consignados en un diagrama TTT de enfriamiento respecto al material de estudio. El diagrama TTT y el tiempo de enfriamiento es uno de los primeros pasos del diseño del horno, ya que permite comprender la duración del ciclo de calentamiento - enfriamiento y la energía necesaria para poder elevar la temperatura del pasador con mayor volumen producido en Cadenpal, y, a su vez, el diagrama indica los tiempos adecuados a los que se debe enfriar el material, una vez fue calentado. Lo anterior tiene el fin de evitar la caída en una fase austenítica, ferrítica o martensítica cuando se enfría la pieza, ya que estas fases disminuyen la dureza y otras propiedades mecánicas de la pieza, generando que se pierda el enfoque del tratamiento térmico.

Los hornos de inducción tienen diversas aplicaciones en la industria metalúrgica y manufacturera. Se utilizan en el tratamiento térmico de metales, incluyendo procesos como el temple, revenido y recocido, para modificar sus propiedades mecánicas. También son empleados en forja y estampado, ya que permiten el precalentamiento de piezas antes de su deformación plástica. En la industria siderúrgica, se destinan a la fusión de metales, facilitando su procesamiento y refinamiento. Además, son esenciales para el endurecimiento superficial, un tratamiento que mejora la resistencia al desgaste de herramientas, engranajes y otros componentes sometidos a fricción. A continuación, se introduce con mayor profundidad el concepto de efecto Joule y su vital importancia en el proceso de calentamiento por inducción en metales. Este fenómeno permite abordar de manera más precisa la relevancia del principio de funcionamiento del tipo de horno seleccionado para llevar a cabo los tratamientos térmicos en Cadenpal.

Para entrar en mayor profundidad acerca de los componentes de un horno de inducción, se realizó un análisis de materiales y refractarios adecuados para la conformación de la estructura y el aislamiento térmico del horno. A continuación, se presenta una profundización sobre los materiales más apropiados a considerar durante el diseño de un horno de inducción, de acuerdo con los estándares y normativas de seguridad industrial aplicables en Colombia, país en el que se encuentra ubicada Cadenpal.

Materiales y Refractarios para la estructura de un horno de inducción

Los materiales utilizados en los hornos de inducción deben ser altamente resistentes, ya que operan a temperaturas demasiado altas (entre 800°C - 1200°C) y bajo condiciones exigentes como (altas velocidades,

humedad, desgaste de piezas, exposición a elementos corrosivos y abrasivos). Los hornos de inducción que se utilizan en la industria de la producción de piezas que componen las cadenas transportadoras están expuestos a altos fenómenos de desgaste mecánico y térmico, por lo cual a la hora de diseñar estos equipos es necesario hacer una adecuada revisión y selección de los materiales que cumplan con satisfacción las condiciones de operación de la máquina. La bobina, encargada de generar el campo electromagnético para el calentamiento por inducción, está fabricada con tubo de cobre de alta conductividad térmica y refrigerado por agua, lo que evita el sobrecalentamiento y garantiza un funcionamiento eficiente. Además, cuenta con recubrimientos aislantes que previenen cortocircuitos y mejoran la seguridad operativa. Para minimizar la pérdida de calor y mejorar la eficiencia energética, se emplean fibra cerámica, fibra de vidrio y ladrillos refractarios como aislamientos térmicos y contribuyen a la optimización del consumo energético del horno. Finalmente, para soportar las altas temperaturas y proteger la estructura del horno, se emplean materiales refractarios de gran resistencia térmica y química como los siguientes:

- **Alúmina (Al₂O₃):** Este material soporta temperaturas superiores a 1800°C, este proceso proporciona una alta durabilidad en la estructura del horno en caso de utilizarse.
- **Sílice fundida (SiO₂):** Se utiliza en los revestimientos de hornos de inducción, gracias a su estabilidad térmica.
- **Magnesia (MgO):** Se destaca por su alta resistencia a la corrosión provocada por escorias metálicas, prolongando la vida útil del horno.

En el mercado colombiano materiales como ladrillo refractario o fibras de cerámica para construir una estructura que actúa de aislante térmico entre las paredes del horno durante el proceso de calentamiento de los pasadores a los exteriores, en este paso se tiene en cuenta el espacio designado por el área de ingeniería industrial para la ubicación del horno en la propuesta de la nueva distribución de planta.

El diseño del horno debe cumplir con estándares estrictos de seguridad y salud ocupacional en el trabajo (SST), dado que genera altas cargas térmicas que pueden afectar a los trabajadores y al entorno. A continuación, se detallan las normativas y reglamentaciones técnicas aplicables a equipos industriales de alto flujo térmico y conexiones eléctricas, incluyendo condiciones de operación, control de emisiones de gases y sustancias nocivas, así como medidas de seguridad para los operarios.

Normatividad de Uso y Reglamentación técnica en Colombia

En Colombia, existen múltiples normativas para la operación de equipos industriales sometidos a condiciones extremas como altas temperaturas, movimientos mecánicos, cortes, perforaciones y conexiones eléctricas. Para este proyecto, se investigaron las reglamentaciones técnicas que establecen buenas prácticas en el manejo de estos dispositivos y el uso adecuado de equipos de protección. Asimismo, algunas normativas regulan el diseño de nuevos equipos, considerando materiales aislantes, refractarios, conductores térmicos y eléctricos, además del sistema de control y la disposición de componentes sensibles al calor. Estas regulaciones son fundamentales en el proyecto de Cadenpal, asegurando que el horno de inducción sea eficiente, seguro para los trabajadores y ambientalmente responsable. La Tabla VI presenta las tres normativas más relevantes, abordando aspectos clave del uso y manipulación de equipos de calentamiento y procesos de alta temperatura.

A continuación, en la **Tabla XXIII**, se profundiza en las definiciones y aplicaciones de tres normativas que abordan ciertos requisitos de seguridad, control de emisiones y parámetros operativos de hornos de inducción y sistemas de calentamiento industriales en Colombia. Además, se especifican las implicaciones legales en caso de incumplimiento de estas regulaciones en los procesos internos de las empresas.

Tabla XXIII. Normatividades y Descripciones de cada una

Normativa	Descripción
Ley 99 de 1993	<ul style="list-style-type: none"> • Establece las bases de la política ambiental en Colombia y crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA). • Exige a las actividades industriales minimizar su impacto ambiental mediante el control de emisiones contaminantes

	<p>y el uso de tecnologías sostenibles.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para hornos industriales implica el uso de filtros de aire y sistemas de reducción de gases nocivos
Decreto 1072 de 2015	<ul style="list-style-type: none"> • Establece el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) aplicable a todas las empresas industriales. Impone requisitos específicos para hornos de tratamientos térmicos, como: • Condiciones de ventilación adecuadas para evitar la acumulación de gases tóxicos o temperaturas excesivas. • Capacitación de operarios en el manejo de equipos de alta temperatura y materiales peligrosos. • Planes de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos para minimizar riesgos de fallas o sobrecalentamientos.
Resolución 0312 de 2019	<ul style="list-style-type: none"> • Obliga a proporcionar y utilizar elementos de protección personal (EPP) para operarios de hornos de alta temperatura como guantes, trajes resistentes al calor, gafas y protectores faciales. • Aborda sobre la implementación de sistemas de extracción de gases y monitoreo ambiental.

En los últimos años se han desarrollado avances en simulaciones computacionales de tratamientos térmicos, esta técnica permite predecir cómo las diferentes variables afectan la microestructura y las propiedades mecánicas del material, facilitando la toma de decisiones informadas sobre los parámetros de tratamiento. En la investigación de [13] se realizó una simulación térmica en software para estimar el comportamiento del horno bajo diferentes condiciones de trabajo. Se probó la eficacia del aislamiento térmico hecho de poliuretano (PU), logrando mantener la temperatura exterior del horno por debajo de los 200°C, con pérdidas de calor controladas en menos de 5000 W.

Finalmente a partir de los aportes y metodologías encontradas en la revisión de literatura relacionada a la problemática del proyecto, junto con nuestras propuestas de trabajo, se puede establecer sobre la importancia de implementar sistemas de tratamiento térmico *in-house* para reducir costos, mejorar la eficiencia operativa y aumentar la fiabilidad del proceso productivo, como se ha demostrado en estudios de cadenas de suministro y manufactura. Los avances en tecnologías de la Industria 4.0, junto con metodologías de mejora continua como Lean Manufacturing, permiten optimizar el uso de recursos y mejorar la calidad de los productos. Por otro lado, también se resalta la importancia de tecnologías avanzadas de tratamiento térmico para materiales como el acero AISI 4140, destacando procesos clave como el temple y el revenido. El uso de hornos modernos, incluidos los de vacío y de atmósfera controlada, junto con simulaciones computacionales para la optimización de parámetros, permite asegurar propiedades mecánicas óptimas del producto final y reducir el consumo energético.

Tras la introducción a los conceptos físicos que rigen el funcionamiento de los hornos de inducción, se presentan ejemplos de su aplicación en la industria, recopilados a partir de catálogos y fichas técnicas de fabricantes internacionales.

Ejemplos de hornos de inducción de fabricante chino (Posible alternativa de compra para el cliente).

A continuación en la parte de abajo de este apartado, se presentan ejemplos y esquemas de hornos de inducción en un entorno real, ilustrando dos referencias comerciales obtenidas de los catálogos de fabricación de una empresa china. Estas imágenes permiten visualizar las características y aplicaciones de hornos de inducción similares al seleccionado para el proyecto, lo cual brinda una perspectiva concreta sobre el equipo. Las

referencias se muestran en la **Figura XXVII** y **Figura XXVIII** respectivamente.



Figura XXVII. Horno de inducción de la marca Jin Lay

Tomada de: Ficha Técnica JLY-500.pdf

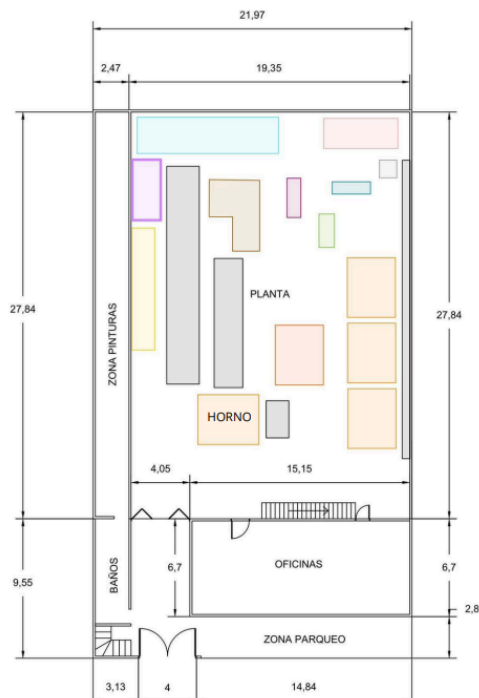


Figura XXVIII. Horno de inducción referencia JL-AC-6HP

Tomada de: JL-AC-6HP.pdf

2.2. Especificación del diseño preliminar

Esta sección presenta las especificaciones para el rediseño de la línea productiva como la nueva distribución de planta y el diseño de un horno de inducción para tratamientos térmicos. Primero, se define un diseño conceptual del sistema, que luego se detalla para cada subsistema y componente. Al finalizar, se establece el diseño preliminar, que será refinado en fases posteriores. Este apartado guía el desarrollo e implementación del proyecto, alineando todos los componentes con los objetivos de eficiencia y mejora productiva de la empresa. En la **Figura XXIX** se muestra un diseño preliminar de la distribución de planta que incorpora la ubicación del horno dentro del espacio de trabajo. En este boceto inicial, se consideró la posición específica del horno para optimizar su integración en la línea de producción. A diferencia de la figura que presenta la distribución actual de la planta sin el horno incluido, la **Figura XXIX** permite visualizar cómo se modificaría el espacio para acomodar el equipo adicional y cumplir con los nuevos requerimientos de proceso.



*Figura XXIX. Diseño manual con posible ubicación del horno de inducción (Dimensiones en metros)
Plano de la planta proporcionado por la gerencia de Cadenpal para el fin este proyecto*

A continuación en la **Figura XXX** se presenta un diseño del horno que atiende a nivel conceptual las funciones definidas a partir de los requerimientos de diseño. A estos requerimientos se le suman los criterios estéticos no contemplados. El diseño preliminar del horno y las imágenes asociadas son creación original del estudiante de Ingeniería Mecánica.

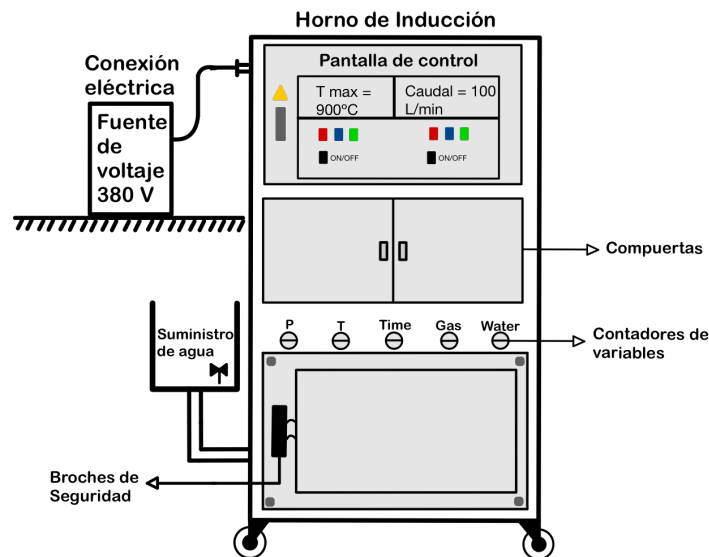


Figura XXX. Diseño conceptual del horno (vista frontal)

El primer bosquejo conceptual se trata de un horno por inducción equipado con una pantalla táctil controlada mediante un tablero eléctrico ubicado en la parte posterior de ésta. La pantalla permite establecer los parámetros de entrada de las variables medidas en el proceso (presión, tiempo, temperatura, caudal), como también su monitoreo y cuenta con dos interruptores de encendido y apagado para ser manipulados durante el ciclo según las condiciones que se vayan presentando. Por otro lado, el horno recibe energía eléctrica por parte de una fuente de voltaje alta tensión de 380V ubicada en una pared de la empresa. La compuerta principal que se encuentra ubicada debajo del panel de control es la que se abre y permite el ingreso y colocación de los pasadores sobre las bobinas y en el portamuestras. Más abajo se encuentran cinco contadores para cada variable medida en el proceso.

Seguido de esto, en la **Figura XXXI** se muestra la estructura interna del horno al abrir las compuertas. Se observan los pasadores posicionados dentro de las bobinas inductoras del campo magnético para el tratamiento térmico. Al finalizar el proceso de calentamiento, las piezas caen por gravedad a un depósito de agua que se encuentra en la parte inferior del horno, esto enfría las piezas de forma acelerada para poder realizar el proceso de temple, posterior a esto las piezas son recogidas por el operario y colocadas nuevamente en el portamuestras para realizar el proceso de revenido. El tablero de control no se detiene durante el proceso, el operario tiene la tarea de verificar los valores mostrados en la pantalla y debe tomar acciones correspondientes de aprobación, ajuste o de detener el proceso con el interruptor si los valores observados no son los adecuados. Todo el proceso contempla las normas y condiciones de seguridad, así como también todos los implementos de protección para los trabajadores. (Se planea modificar el diseño a futuro y adaptar un mecanismo para que el operario no intervenga en la manipulación de la pieza).

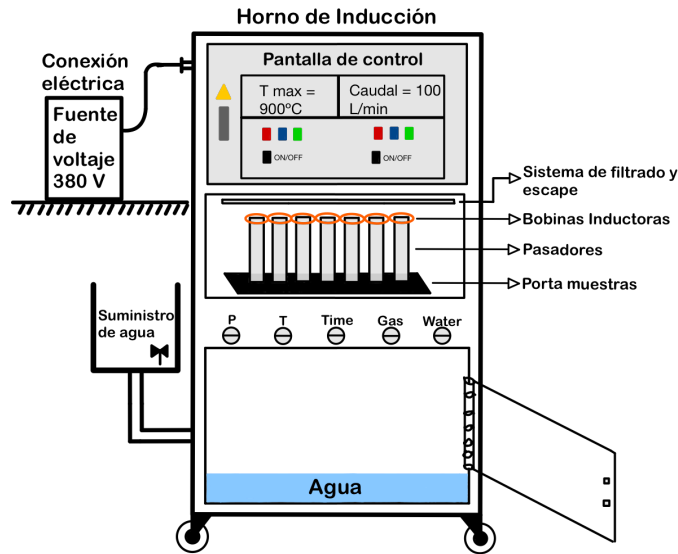


Figura XXXI. Diseño conceptual vista interna del horno

En la **Figura XXXII** se presenta una vista isométrica del diseño conceptual del horno, mostrando los sistemas de ventilación y de gases ubicados en la parte posterior de la máquina.

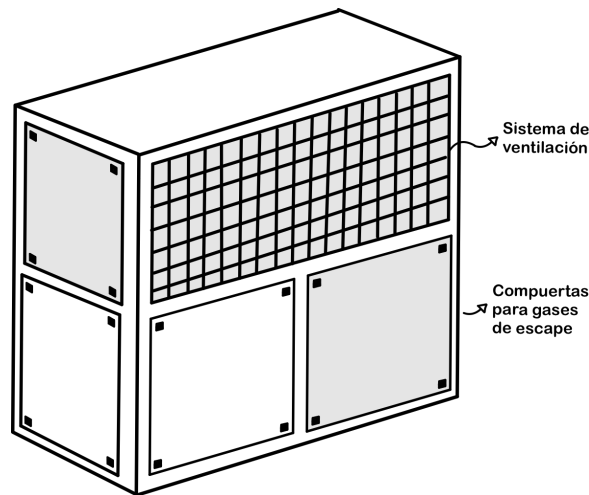


Figura XXXII. Diseño conceptual vista isométrica del horno

3. Plan de trabajo (PdT)

En esta sección del proyecto, se presenta el plan de trabajo, el cual define la metodología y las actividades que se llevarán a cabo durante el semestre 2025-1 para la realización del diseño propuesto. Este plan ha sido elaborado para abarcar tanto el área de ingeniería mecánica como la de ingeniería industrial, con el objetivo de garantizar un desarrollo ordenado y coordinado de las tareas. En el plan de trabajo también se especifican las áreas de cada disciplina según la actividad, junto con una descripción detallada de la misma, el entregable correspondiente como resultado de la actividad planificada y la fecha propuesta para su entrega.

Tabla XXIV. Plan de trabajo o Metodología

Objetivo	Área IISE	Herramientas de Ingeniería Industrial o Mecánica	Actividad	Entregable (alcance)	Fecha entrega

Definición del tratamiento térmico para lograr propiedades mecánicas adecuadas para un temple - revenido	Área de Ingeniería Mecánica: Dibujo Mecánico	Dibujo Técnico y mecánico, diseño de planos	Establecer el tiempo requerido para el calentamiento y enfriamiento del pasador según el diagrama TTT	Investigación detallada del proceso de tratamiento térmico por inducción	Semana 1: 24 de enero de 2025
Realizar el análisis morfológico de cada subsistema del horno y el tratamiento térmico	Área de Ingeniería Mecánica: Diseño mecánico, materiales y procesos	Evaluación de alternativas y criterios de selección de diseño	Establecer los distintos subsistemas que conforman el horno y plantear varias alternativas de equipos o instrumentos que conforman los subsistemas	Tablas de análisis de morfología para cada subsistema a partir de unos criterios técnicos	Semana 3: 10 de febrero de 2025
Selección del sistema de monitoreo y control	Área de Ingeniería Mecánica: Control y Automatización	Programación de PLC, sistema de control PID para lazo cerrado, selección de interfaz HMI	Integrar conocimientos de control y automatización para seleccionar un tablero de control eléctrico que incluya varios instrumentos que monitorean las variables del proceso de T.T.	Selección de un PLC con base en sus costos y ventajas técnicas según el # de variables a controlar	Semana 5: 24 de febrero de 2025
Selección del sistema de enfriamiento	Área de Ingeniería Mecánica: Ciencias Térmicas y de fluidos	Ciclos y máquinas térmicas	Proponer un sistema que asegure la refrigeración adecuada del horno, para evitar sobrecalentamientos.	Resultados de cálculos, costos y referencia del equipo seleccionado	Semana 7: 10 de marzo de 2025
Calcular el calor transferido, la potencia y corriente necesarias para calentar el pasador de mayor diámetro a 860 °C	Área de Ingeniería Mecánica: Ciencias Térmicas	Transferencia de calor y teoría de potencias eléctricas en circuitos de corriente directa	Realizar cálculos de calor, potencia y corriente para alcanzar la temperatura objetivo en el pasador	Resultados de cálculos y conclusiones	Semana 10: 24 de marzo de 2025
Calcular velocidad de avance de la pieza y el caudal necesario para alcanzar la temperatura de enfriamiento para el temple	Área de Ingeniería Mecánica: Mecánica de Fluidos	Cálculo de flujo de agua y transferencia de calor en sistemas de enfriamiento	Determinar velocidad y caudal para el proceso de enfriamiento del pasador en el proceso de temple	Resultados de cálculos y conclusiones	Semana 14: 28 de abril de 2025
Seleccionar materiales para el mecanismo de posicionamiento y	Área de Ingeniería Mecánica: Ciencia de	Materiales de alta y baja conductividad térmica. Propiedades	Elegir los materiales más adecuados mecanismo del pasador, basándose en	Listado de materiales con sus costos y propiedades mecánicas.	Semana 15: 5 de mayo de 2025

transporte del pasador	materiales	mecánicas de los materiales	critérios de selección y condiciones de uso de los materiales		
Calcular cargas y esfuerzo del mecanismo	Área de Ingeniería Mecánica: Diseño Mecánico	Condiciones de peso y fuerza ejercida, fatiga y fluencia, elementos de máquinas, determinación de esfuerzos	Realizar cálculos que determinen las cargas y esfuerzos a las que estará sometido el horno, así como su eficiencia en la transferencia de calor del sistema.	Resultados de cálculos y consideraciones mecánicas de las piezas y el sistema de posicionamiento	Semana 16: 12 de mayo de 2025
Modelar los componentes del mecanismo en Onshape	Área de Ingeniería Mecánica: Diseño Mecánico	Diseño y modelado en CAD	Utilizar el software Onshape para modelar detalladamente los componentes del mecanismo.	Archivos de piezas CAD de los componentes del mecanismo	Mayo de 2025
Simular computacionalmente y analizar por fatiga la vida útil de las piezas en condiciones críticas del mecanismo	Área de Ingeniería Mecánica: Diseño Mecánico y Ciencias Térmicas y de fluidos	Deformación térmica de los materiales, impacto en las propiedades. Método de elementos finitos	Realizar simulaciones para analizar el comportamiento de piezas del mecanismo bajo diferentes condiciones mecánicas, optimizando el diseño.	Archivo de la simulación y análisis de elementos finitos	Junio de 2025
Análisis de la distribución de planta	Optimización de procesos	Diseño de sistemas de producción	Evaluar la distribución actual de la planta para identificar mejoras y asegurar un flujo de trabajo eficiente.	Entregar posibles cambios y un prototipo de la nueva planta	Semana 1: 26 de enero de 2025
Definición de indicadores-objetivos	Gestión de la calidad y productividad	Gestión de la calidad	Establecer indicadores que permitan medir el rendimiento y la efectividad del horno y su impacto en la planta.	Listado de indicadores según los datos hallados por el proceso del horno	Semana 2: 2 de febrero de 2025
Diseño del layout de la distribución de planta	Diseño de instalaciones	Diseño y distribución de plantas	Crear un diseño detallado de la distribución del equipo en la planta utilizando Autocad, optimizando la utilización del espacio.	Dibujo y esquema de la propuesta de la redistribución de plantas.	Semana 5: 23 de febrero de 2025
Simulación del flujo de trabajo	Simulación de procesos y modelación de sistemas	Simulación de procesos y modelación de sistemas	Modelar cómo fluyen los procesos dentro de la planta y el impacto del nuevo horno en esos flujos.	Modelación del proceso e identificación de cuellos de botella analizando tiempos y costos.	Semana 7: 9 de marzo de 2025
Realizar las respectivas correcciones y ajustes	Control de calidad y mejora continua	Control de calidad y mejora continua	Afinar el diseño basándose en resultados de simulaciones y análisis, asegurando que todo se alinee con	Documento con especificaciones claras para tener un control constante y asegurar la calidad.	Semana 9: 23 de marzo de 2025

			los objetivos establecidos.		
Preparación del diseño aprobado	Gestión de proyectos y documentación técnica	Gestión de proyectos y documentación técnica	Compilar el diseño final del horno y documentación necesaria para su aprobación..	Realización de especificaciones técnicas, prototipos y planos. Revisión de requisitos.	Semana 10: 30 de marzo de 2025
Ejecución de la redistribución	Gestión de operaciones	Gestión de operaciones	Llevar a cabo la redistribución del equipo y del espacio de trabajo en la planta, implementando el nuevo diseño aprobado.	Con el equipo de trabajo de cadenpal, reacomodar la compañía acorde a la distribución de planta propuesta y aceptada.	Semana 15: 4 de mayo de 2025

IV. DISEÑO DETALLADO

4.1 Diseño del horno

Con base en la información recopilada en el marco teórico (revisión de literatura y diseño conceptual), y en las actividades definidas en la metodología, se presenta a continuación el diseño de detalle del horno. Se inicia por la definición del ciclo térmico de los tratamientos de temple y revenido, así como también la profundidad de endurecimiento. A seguir se calcula el calor necesario para alcanzar la temperatura; las condiciones de enfriamiento para el temple; el diseño del sistema de posicionamiento y movimiento del pasador durante el tratamiento térmico

Por último, en las actividades definidas en la metodología, se presenta a continuación el diseño de detalle del horno. Se inicia por la definición del ciclo térmico del temple y revenido y la profundidad de endurecimiento. A continuación se calculó el calor necesario para alcanzar la temperatura; las condiciones de enfriamiento para el temple; el diseño del sistema de posicionamiento y movimiento del pasador durante el tratamiento térmico y el resultado de las simulaciones hechas a piezas expuestas a condiciones críticas a partir del uso de un software.

Es importante destacar que la justificación del diseño del horno se fundamenta principalmente en los incumplimientos y la garantía en la calidad de pasadores, y a su vez, en la demanda estimada de pasadores producidos mensualmente en la planta de Cadenpal. Se contemplaron aspectos esenciales como la configuración de las bobinas para el calentamiento, la demanda energética, y las consideraciones de seguridad y uso del horno.

Determinación del tiempo de enfriamiento a partir del diagrama TTT del acero 4140

Para contextualizar, un diagrama Temperatura - Tiempo - Transformación (TTT) de un acero es una representación gráfica del comportamiento de la microestructura y los cambios de fase de un material a medida que es enfriado desde la región austenítica, hasta la temperatura ambiente si es posible. Esto se hace según cada material específico. El diagrama en cuestión representa la ruta a seguir en términos de tiempo y temperatura durante el proceso de enfriamiento de un acero con una composición química específica. Su finalidad es lograr la microestructura deseada, es decir, un arreglo cristalino de los átomos que permita alcanzar las propiedades mecánicas requeridas en el material. Acorde a la ruta del diagrama TTT para un acero 4140 (ver **Figura XXXIII**) se define el tratamiento térmico de temple y revenido para los pasadores de las cadenas. Al elevar la temperatura de la pieza a valores entre 700°C y 900°C, se controla el tiempo de calentamiento, esto con el fin de alcanzar la fase de austenita. Ya durante el enfriamiento, para el tratamiento de temple, se busca transformar la austenita a martensita para lograr el templado en la pieza y que se puedan alcanzar valores de dureza entre 50 HRC y 55 HRC (dureza Rockwell C), por lo cual, se debe evitar entrar a regiones de transformación de bainita, ferrita y perlita, puesto que se puede incurrir en una pérdida de dureza. El tiempo de calentamiento por inducción depende de la masa del pasador y de la temperatura de austenización del acero 4140 que típicamente oscila entre 860°C y 900°C. Según el diagrama TTT del material (**Ver Figura XXXIII**), la formación de austenita ocurre rápidamente en este rango de temperaturas. [33].

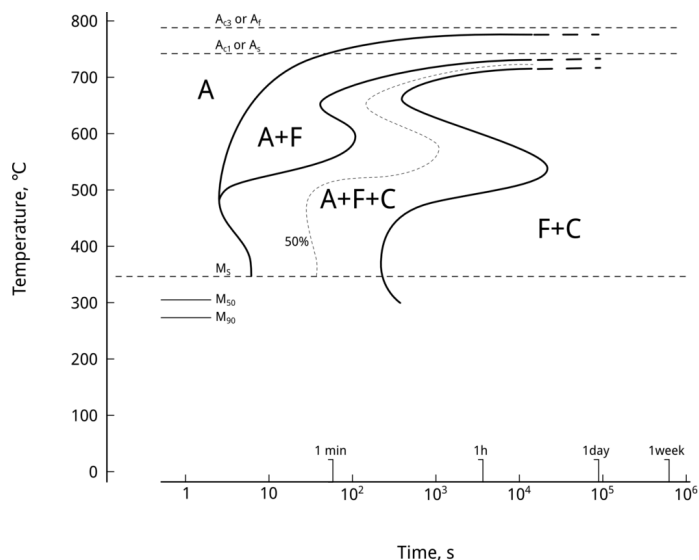


Figura XXXIII. Diagrama y curvas de transformación isotérmica del acero SAE 4140 [32].

En la literatura técnica sobre tratamientos térmicos por inducción y transformación de materiales se encontró un artículo de investigación hecho por Mariano Ianuzzi [35] acerca del efecto del níquel en la dureza y en la cinética de transformación de fases de aceros de baja aleación. El acero 4140 se considera de baja aleación (Cromo-Molibdeno). En el artículo se abordaron los resultados obtenidos después de utilizar níquel para mejorar la resistencia al agrietamiento por esfuerzos de tracción del acero 4140. Este tipo de desgaste también surge en ambientes que contienen sulfuros de hidrógeno, lo que propicia la corrosión. En complemento de lo anterior, el níquel mejora significativamente las propiedades de los aceros de baja aleación al aumentar su ductilidad y resistencia a la corrosión, lo que permite que las piezas sean más resistentes a la deformación y al agrietamiento. [33]. Lo anterior se suscitó con el objetivo de dar un apoyo de parte de la literatura técnica a estudios y otras alternativas de transformación de materiales para mejorar sus propiedades mecánicas cuando se someten a procesos de calentamiento a temperaturas por encima de los 900 °C.

También se hallaron aportes que evidencian que el tiempo de calentamiento típico en procesos de inducción para aceros como el 4140 suele estar entre 30 y 120 segundos, esto depende en gran medida del tamaño de la pieza y la frecuencia del horno. En el caso de los pasadores producidos en Cadenpal, son piezas en las que sus dimensiones oscilan entre 13 a 22 cm de longitud y diámetros entre 1.7 cm y 5.1 cm, por lo cuál se puede establecer que en la empresa se fabrica por lotes o grupos de tamaños. Por otra parte, el tiempo de calentamiento óptimo para la pieza más grande producida en la empresa suele estar en un rango entre 4 y 5 segundos [33]. Estos datos sobre las dimensiones de los pasadores fueron establecidos a través de los planos y dibujos de las piezas proporcionados por la gerencia de Cadenpal. En este proyecto se planteó un horno de media frecuencia debido a su tamaño y aplicación. Los hornos de alta frecuencia son de 10 kHz, los de media entre 300 Hz y 9 kHz y los de baja entre 50 y 300 Hz. Los hornos de media frecuencia son los que se utilizan en la industria para aplicaciones de tratamiento térmico [33].

Después del calentamiento, se continúa con la realización del tratamiento térmico de temple y enfriamiento de la pieza. Tras analizar los tiempos requeridos para el enfriamiento rápido de la pieza, se procedió a examinar la gráfica de la **Figura XXXIII**. A partir de esta, se determinó que el tiempo de enfriamiento necesario se situaba en un rango de 2,5 a 4 segundos máximo. Este intervalo resultó crucial para establecer los parámetros operativos del subsistema de enfriamiento y que a su vez permitieran seleccionar la solución más favorable disponible en el mercado. El rango de tiempo mencionado asegura que la microestructura de la pieza no se transforme en regiones de ferrita, ferrita más carburos, bainita y perlita. En cambio, el período de tiempo si asegura la transformación en regiones martensíticas. El proceso de enfriamiento debe realizarse de manera en la que la pieza alcance un máximo de 4 °C por segundo hasta llegar a una temperatura de 500 °C, que corresponde a la parte más saliente de la gráfica de transformación no deseada, la cual sería la fase de ferrita. Una vez alcanzada esta temperatura, se debe continuar enfriando de forma gradual hasta alcanzar un máximo de 350 °C en un plazo de aproximadamente 2,3 segundos, para posteriormente iniciar o ingresar en la fase martensítica, junto con una mayor composición de esta microestructura.

En la siguiente figura se presenta el mismo diagrama TTT correspondiente al acero 4140, pero esta vez con una línea roja (propuesta de curva de enfriamiento ideal) que muestra la tendencia de avance de temperatura y tiempo de enfriamiento con base en las condiciones establecidas para el alcance de la microestructura deseada,

es decir, la composición de regiones martensíticas. La línea azul permite el cálculo del tiempo y recibe el nombre de nariz del diagrama TTT, se coloca sobre la curva más sobresaliente. La nariz indica el límite de tiempo definido que no se debe exceder, con el fin de lograr el alcance del tratamiento térmico definido.

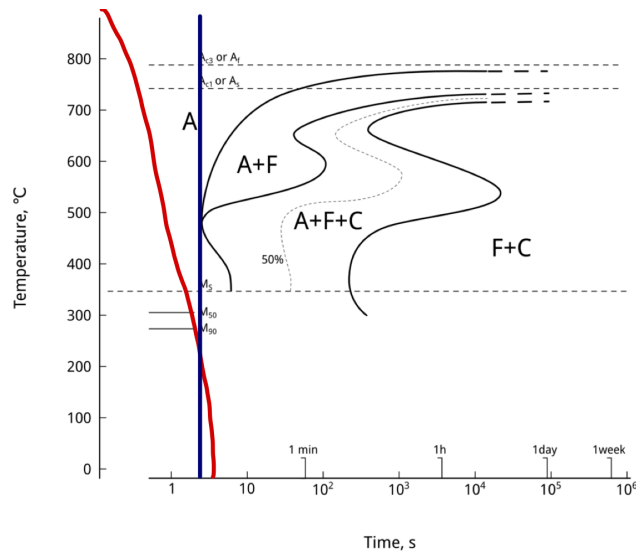


Figura XXXIV. Diagrama y curvas de transformación isotérmica del acero SAE 4140 [32].

Acorde al diagrama TTT de la **Figura XXXIV**, la fase martensítica inicia cuando se alcanzan temperaturas por debajo de los 350 °C, donde se obtienen las propiedades mecánicas deseadas. Según la gráfica, se observó que aproximadamente a 305 °C había un 50% de formación de martensita, mientras que alrededor de 285 °C la composición martensítica se eleva al 90%. Es importante aclarar que no se alcanzará el enfriamiento hasta 270 °C en toda la dirección radial de la pieza, pues la superficie del pasador será enfriada mucho más rápido que el centro del mismo objeto, esto hará que el centro se enfríe más lento alcanzando regiones con microestructuras ferríticas, bainíticas y perlitas de menor dureza pero ideales para aumentar la tenacidad en el núcleo del pasador.

Se puede afirmar que alcanzar una temperatura de 270 °C es la prioridad en el tiempo establecido, ya que es en este valor donde se logra obtener un 100% de composición martensítica en la microestructura de la pieza. Sin embargo, el objetivo es continuar la disminución de la temperatura hasta alcanzar los 80 °C. Debido a que en la temperatura anterior, la microestructura de la pieza ya se encuentra en completa fase martensítica, no es necesario ajustarse a un rango de tiempo límite, ya que se puede utilizar un tiempo deseado para completar el ciclo [32]. Al alcanzar este valor final de temperatura, el operario ya puede manipular con una pinza para retirar el pasador, montar otro y así reiniciar el ciclo de tratamiento térmico. Esta información validó el rango de tiempo necesario para lograr un enfriamiento rápido del pasador y subrayó la importancia de alcanzar una mayor composición de martensita, para la mejora de las propiedades mecánicas requeridas en el tratamiento térmico que se realizó previamente. El tiempo de enfriamiento también resultó determinante para calcular el caudal de agua requerido en este proceso.

Ciclo térmico para el pasador más crítico diseñado

En esta sección, se presenta el ciclo térmico correspondiente al acero AISI 4140, este ciclo consta de 3 etapas fundamentales para el proceso de tratamiento térmico aplicado a este material. En primer lugar, se encuentra la etapa de calentamiento hasta la temperatura de austenización, que oscila entre 850°C y 900°C, momento en el cual la estructura del acero se transforma en austenita. La segunda etapa corresponde al proceso de templado, en el cual la pieza se enfría rápidamente, generalmente en agua, aceite o aire, para transformar la fase austenita en martensita, logrando así un aumento en dureza y resistencia mecánica. Finalmente, se realiza el revenido, proceso en el cual la pieza se somete a un segundo ciclo de calentamiento a temperaturas más bajas, típicamente entre 150°C y 650°C, con el objetivo de reducir las tensiones internas, mejorar la tenacidad y ajustar la dureza final, dependiendo del rango de temperaturas utilizado.

En la **Figura XXXV** se presenta el ciclo térmico definido para el tratamiento de temple con agua para el acero 4140.

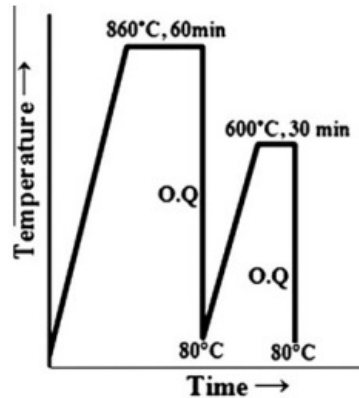


Figura XXXV. Ciclo térmico definido para el tratamiento de temple [39].

En complemento con el ciclo térmico del material, la gráfica anterior fue extraída de un estudio acerca del efecto de un tratamiento térmico simple o de doble temple y revenido en la microestructura y propiedades mecánicas de una muestra charpy de acero AISI 4140 que presenta la misma geometría de uno de los pasadores de Cadenpal (varilla con diámetro de 25 mm). En este estudio se abordaron distintas condiciones acerca del uso de distintas microscopías electrónicas de barrido para seguir la concentración de impurezas y los cambios microestructurales, y su relación con las propiedades mecánicas asociadas [39]. En el estudio se determinó que el tiempo necesario para calentar la muestra de acero 4140 desde la temperatura ambiente hasta alcanzar los 860 °C es de 10 minutos. Por otro lado, el tiempo de recalentamiento hasta 600 °C en el proceso de revenido es de 5 minutos. Es importante señalar que, en este estudio, a diferencia del proyecto de Cadenpal, el calentamiento no se realiza mediante inducción, sino a través de rodillos calientes, ya que forma parte de un proceso de laminado.

En resumen, el objetivo de realizar un tratamiento térmico de temple en la superficie es poder alcanzar una dureza máxima de 55 Rockwell C, por sus siglas en inglés, (HRC), que permita poder evitar el desgaste del pasador debido a las cargas de impacto que recibe provenientes de la cadena. Por esta razón, es necesario alcanzar un núcleo más blando mediante el calentamiento, lo que mejorará la tenacidad del material. Los pasadores de las cadenas están constantemente sometidos a esfuerzos de tracción, compresión y cizalladura. Por lo tanto, se busca que haya una buena tenacidad desde la superficie con aumento hacia el centro de la pieza, lo que permitirá absorber la energía generada por estas cargas durante el impacto y evitar así una ruptura fatal o prematura de la pieza. Esto se consigue con el análisis de un perfil de dureza para el acero 4140, perfil medido en escala Rockwell C. Los ensayos de dureza se realizan aplicando cargas mecánicas de manera progresiva, y, a su vez, se consideran condiciones como (diámetro de la pieza, tipo de indentador, profundidad de la indentación). El objetivo es obtener un valor práctico de HRC, compararlo con el valor teórico de la literatura y establecer un porcentaje de error o desviación entre la teoría y la práctica. [32].

Para lograr el alcance del tratamiento térmico por inducción y alcanzar las propiedades mecánicas deseadas, se estableció que la profundidad del calentamiento debe alcanzar un máximo de 4 mm desde la superficie lateral y gradualmente disminuir hacia el centro de la pieza. A continuación, se presenta un plano elaborado por el estudiante de Ingeniería Mecánica (Ver Figura XXXVI), que detalla la penetración del tratamiento térmico en la superficie radial del pasador, indicando la intensidad del calentamiento y su alcance, según las propiedades definidas que se desean obtener.

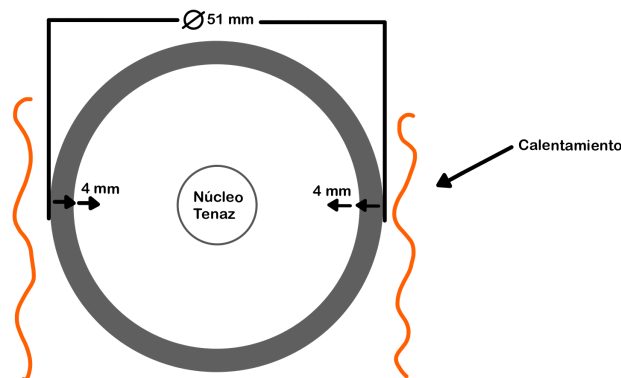


Figura XXXVI. Profundidad del calentamiento en la superficie radial del pasador

A partir de lo anterior, se puede determinar la cantidad de calor a extraer de la pieza para alcanzar la temperatura de 270 °C en los primeros 3-4 mm de profundidad en la superficie lateral de la pieza. Por ende, se definió en primer lugar la cantidad de agua que debería ser bombeada por el subsistema de enfriamiento o extracción de calor y expulsada hacia la pieza con el fin de enfriar lo más rápido posible hacia la región martensítica, evitando así la transición a otras fases. Posteriormente, se llevarán a cabo los cálculos relacionados con caudal, volumen de agua y presión.

A continuación se encuentra una sección que detalla una investigación que se hizo a partir de la literatura sobre ensayos y pruebas de medición de dureza para el acero AISI 4140, con esto se pudo determinar con mejor precisión o acercamiento al perfil de dureza que tiene el pasador más grande que se produce en Cadenpal (caso de estudio en ese proyecto).

Determinación de la profundidad del temple para el pasador de Acero AISI 4140

Para determinar la profundidad de temple del acero 4140, se tomó como base de la literatura un ensayo de temperabilidad Jominy para una pieza cilíndrica de este mismo acero. El ensayo Jominy es una prueba muy utilizada en metalurgia y ciencia de materiales, que permite determinar la dureza de un acero en función de la profundidad de templado. Esta prueba consiste en calentar la muestra hasta la temperatura de austenización del material, luego se enfría en un medio de templado como agua o aceite, y se mide la dureza a distintas profundidades para determinar la penetración de la templabilidad y evaluar la profundidad de la dureza [40]. Para la dureza requerida en el pasador, que se estableció entre 50 a 54 HRC (valores determinados por el laboratorio de metalografía en Pereira), se observó que se obtiene esta dureza para profundidades desde la superficie a partir de 0 in a 7/16 in (0.0 mm a 11.1 mm). La profundidad de temple efectiva para el acero 4140 templado puede estar entre 2–6 mm dependiendo del medio de enfriamiento y el diámetro. Otros autores recomiendan que piezas como pasadores de cadenas transportadoras, la profundidad puede ser del 20–25% del radio para tener un equilibrio entre la tenacidad interna y la dureza superficial [41].

Sobre estas determinaciones técnicas, para el pasador de 25 mm de diámetro, la profundidad recomendada según la ASM Internacional está entre 5 mm y 6.25 mm, que está dentro del rango encontrado por Kobasco N. Es importante resaltar que uno de los pasadores que se fabrica en Cadenpal, tiene dimensiones similares a la probeta para ensayos Jominy analizada en el estudio citado. Se recomienda que la temperatura de revenido sea 270°C [41]. .

Otro aspecto es que el ensayo Jominy al ser realizado con agua, aplicado en el acero 4140, permite verificar que es posible alcanzar durezas en el pasador desde 50 HRC a 55 HRC entre 0.0 mm y 6.25 mm de profundidad respectivamente. Según la **Figura XXXVII**, a esta profundidad, se tendría entre un 90% a 80% de martensita en su microestructura para obtener la dureza mínima esperada; el resto de la microestructura estaría compuesta mayoritariamente por bainita y en menor cantidad por ferrita. Por lo cual, es necesario alcanzar una alta composición de martensita y poder lograr así el templado. En la siguiente figura se muestran las curvas estándar de dureza del acero 4140 una vez se realizó el ensayo Jominy.

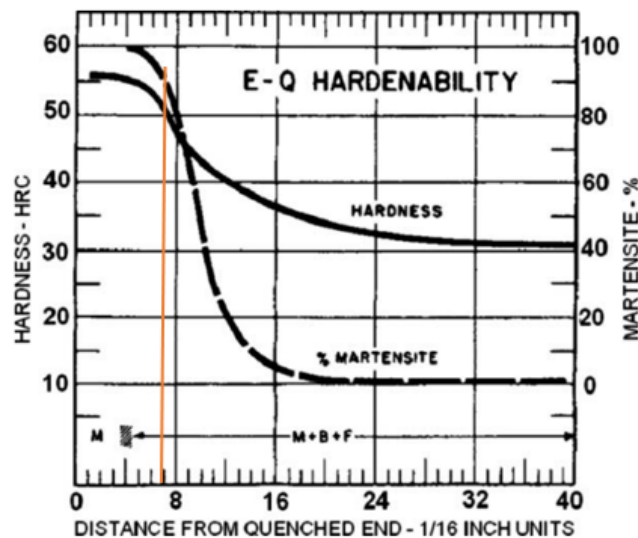


Figura XXXVII. Curvas estándar del ensayo Jominy para el acero AISI 4140 [40]

De acuerdo con la investigación, se encontró en un artículo un ensayo de temperabilidad Jominy

aplicado a una probeta de acero 4140, esta probeta tiene unas características geométricas y dimensionales muy similares a las de uno de los pasadores de Cadenpal, por lo cual, en el artículo se encontraron resultados de este ensayo aplicado a la muestra, tal como se puede apreciar en la siguiente figura. También se presenta una curva del comportamiento o cambio de la dureza según la longitud de la barra de la probeta, esto se da a medida que se realiza el ensayo. En la **Figura XXXVIII** se muestra el perfil de dureza del acero 4140 durante el ensayo de temperabilidad Jominy, al ser enfriado en agua [40].

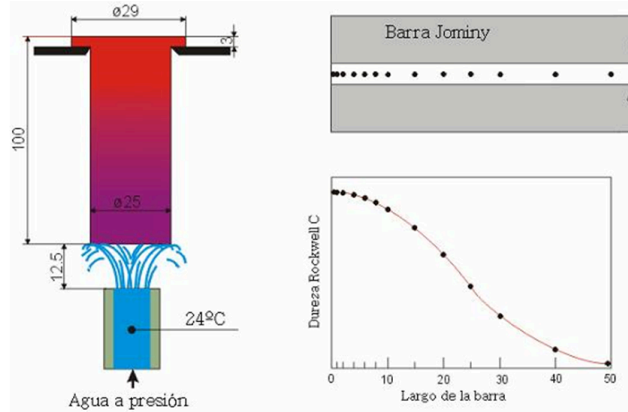




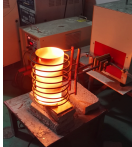

Figura XXXVIII. Ensayo de temperabilidad Jominy del acero y sus efectos en la dureza [41]

Seguido del proceso de templado, se realiza un revenido, que consiste en volver a calentar la pieza después del temple con el fin de obtener la dureza requerida y liberar tensiones residuales que fragilizan el acero. A partir de los ensayos consignados en la literatura y resultados de expertos, se encontró que lo más recomendable es que la temperatura de revenido para el acero 4140 sea de 270°C, y, a su vez, no se recomiendan durezas por encima de 56 HRC para este acero [40]. Al aplicar la teoría y estimaciones al caso del pasador producido en Cadenpal, se establece que lo más recomendable es disminuir la temperatura de revenido a 220°C, y así, por la gráfica anterior, se mantiene una dureza máxima de 55 HRC.

Análisis Morfológico de los subsistemas del horno

A partir de lo establecido acerca de los requerimientos de diseño para el horno de inducción, se establecieron los cinco subsistemas que conforman el horno. Estos se definieron con base en el análisis funcional de la máquina, consignados en las caja negra y transparente. En estos análisis se establecieron las distintas funciones que debe realizar el horno para poder llevar a cabo de manera eficiente el proceso de tratamiento térmico por inducción, por lo cual se realizó un análisis morfológico que permitió clasificar funciones que conforman cada uno de los subsistemas, y a su vez, se evaluaron cuatro alternativas o soluciones de la industria que puedan suplir cada una de las funciones requeridas. En las siguientes tablas (**Ver Tablas XXV - XXIX**) se presentan los análisis morfológicos realizados por cada uno de los subsistemas del horno.

Tabla XXV. Análisis morfológico del Sistema de Calentamiento

Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
Tipo de bobina	 Bobina solenoidal	 Bobina fija	 Bobina en espiral y en láminas	 Bobina tipo helicoidal

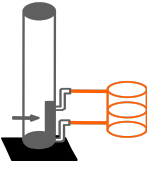
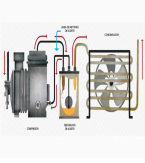










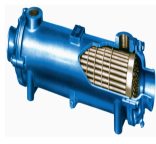

Ubicación de las bobinas	 <p>Bobinas fijas en un soporte en la parte superior del horno</p>	 <p>Bobina deslizantes o móviles</p>	 <p>Bobina en las paredes y en la parte inferior de la zona de calentamiento</p>	 <p>Bobina fijas en un soporte en la parte inferior del horno</p>
Material de la bobina	 <p>Cobre refrigerado por agua</p>	 <p>Cobre con revestimiento de níquel o plata</p>	 <p>Cobre con recubrimiento de grafito</p>	
Subsistema de enfriamiento del pasador	 <p>Refrigeración por aspersión</p>	 <p>Refrigeración por aire</p>	 <p>Refrigeración por aceite dieléctrico</p>	

Tabla XXVI. Análisis morfológico del tipo de Sistema de posicionamiento de pasadores

Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
Mecanismo de transmisión de potencia	 <p>Transportador de banda metálica y rodillos</p>	 <p>Tornillo de potencia</p>	 <p>Sistema de cremallera y motor</p>	 <p>Actuador Lineal</p>
Tipo de sujeción	 <p>Pinza mecánica</p>	 <p>Mordazas neumáticas</p>	 <p>Sistema magnético (Imán Industrial)</p>	 <p>Soporte cilíndrico</p>

Sistema de potencia	 Motor paso a paso	 Servo motor	 Motor neumático	 Sistema hidráulico
Sistema de sensado de posición y avance	 Sensor de proximidad inductivos	 Sensor de proximidad capacitivo	 Sensor de posición de cable o guaya	 Sensores de posición láser
Sistema de sensado de velocidad	 Sensor de velocidad lineal (velocímetro LED)	 Sensor de engranajes (para velocidad rotacional)	 Sensor de Efecto Hall	 Sensor óptico de velocidad
Sistema de sensado de control de temperatura	 Termopar tipo láser	 Sensor infrarrojo	 Sensor PT100	 Sistema de control PID

Tabla XXVII. Análisis morfológico del Sistema de extracción de calor

Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
Sistema de enfriamiento	 Chiller con circuito cerrado	 Torre de enfriamiento	 Intercambiador de tubos y coraza	 Radiador con ventilación forzada

		por aire forzado		
Tipo de fluido de trabajo	 Agua desionizada	 Aceite dieléctrico	 Refrigerante sintético	 Compresor de aire lubricado

Tabla XXVIII. Análisis morfológico de materiales y estructura del mecanismo























Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
Material del mecanismo	 Acero inoxidable	 Aluminio estructural	 Acero al carbono con pintura anticorrosiva	 Aleación de titanio
Sistema de ensamble de los componentes del mecanismo	 Uniones atornilladas	 Soldadura TIG	 Ensamble con pernos	 Ensamble con adhesivos industriales
Diseño de soporte del sistema de sujeción	 Base fija	 Base con ruedas industriales	 Base con amortiguadores	 Base con anclajes al piso

Tabla XXIX. Análisis morfológico del Sistema de Monitoreo y Control de temperatura, corriente, velocidad, etc.

Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
Controlador del sistema (PLC)	 PLC Allen Bradley CompactLogix	 PLC Siemens S7-1200	 PLC Omron CP1L	 Controlador Industrial Arduino

<p>Pantalla para colocar la interfaz HMI de interacción con el usuario</p>	 Pantalla táctil	 Panel de botones físicos	 Tablero de control con botones físicos y entradas de los dispositivos	 Tablero de control anclado al horno
<p>Protocolo de Comunicación</p>	 Ethernet/IP	 Modbus TCP	 Profinet	 CANopen
<p>Sistema de Monitoreo</p>	 Temporizador digital programable	 Alarma de emergencia	 Sensor de corriente y temperatura en tiempo real  Sensor infrarrojo de Arduino	 Diagnóstico remoto por IoT

Selección de propuesta morfológica de cada subsistema

A partir del análisis morfológico realizado, se establecieron criterios de evaluación para cada una de las alternativas propuestas en relación con las funciones de los subsistemas del horno. Estos criterios surgieron de la interconectividad entre los requerimientos del cliente y los requerimientos técnicos de ingeniería, lo que permitió justificar la selección de la opción más favorable en el mercado en términos de diseño del horno.

Algunos de los criterios de selección que se definieron para cada subsistema corresponden a costos de los dispositivos, tipo de materiales, capacidad de mantenimiento, montaje y calibración de los equipos, también se analizaron las opciones desde la ergonomía, la potencia requerida, el consumo energético (kilovatios necesarios para elevar la temperatura del pasador), seguridad, robustez del chasis, capacidad de operación del equipo y normatividad de uso. Estos criterios facilitaron la selección de los componentes más óptimos que conforman cada subsistema y a su vez garantizan la satisfacción de los requerimientos del cliente y los de ingeniería.

Se procedió con la aplicación de cada uno de los criterios mencionados. Por parte del diseñador se hizo un análisis y evaluación de ingeniería acerca de las especificaciones técnicas de cada alternativa comercial, en

complemento, se realizó una investigación de los costos de estos componentes. Al final de cada subsistema se incluyó un análisis de costos de instalación y servicio de cada uno de los equipos que lo componen. Es importante aclarar que, en este proyecto, no se van a instalar los componentes en la planta física de Cadenpal, simplemente el objetivo de ingeniería mecánica se limita a la selección de componentes del mercado y el diseño del mecanismo. Sin embargo, el análisis de costos se realizó con el fin de plantear un escenario de comparación que permita evaluar y determinar cuál alternativa resulta más conveniente en términos económicos y de ingeniería, ya sea si se diseña el horno o se compra.

A continuación se muestran los datos que se obtuvieron para cada subsistema:

1. Sistema de Monitoreo y Control

El horno debe contar con un sistema de monitoreo constante y control de variables involucradas en el proceso de tratamiento térmico. En este caso el sistema tiene una serie de entradas y salidas que se programan en un tablero de control. También se estableció la naturaleza de las señales, en la **Tabla XXX** se contextualiza acerca de los tipos de señal existentes y la definición de cada una. Lo anterior explica de mejor manera las razones en las que se clasificaron las señales del sistema.

Dado que la sección sobre el sistema de monitoreo y control fue elaborada por el estudiante de ingeniería mecánica, se detallaron minuciosamente cada uno de los subtemas relevantes. Esto se debe a que el lector externo también se encuentra en la misma profesión y el sistema de control aborda una gran cantidad de conceptos y variables pertenecientes al área de ingeniería electrónica.

Clasificación de señales físicas

La clasificación de señales físicas de entrada y salida (E/S) en el horno de inducción consiste en identificar y categorizar todos las variables del proceso de tratamiento térmico que interactúan con el sistema de control del horno. Llevar a cabo una clasificación de las señales es fundamental en la metodología de diseño, debido a que permite establecer de qué manera se va a implementar el monitoreo, supervisión, control y ejecución automática del proceso y pueden dividirse según su tipo, función y naturaleza física o electrónica. En primer lugar se establecieron cada una de las señales que recibe el horno de inducción, estas señales proceden de las variables a controlar del proceso, y a su vez estas señales son emitidas hacia un controlador lógico programable (PLC) que procesa las entradas recibidas en su memoria o CPU central para poder ejecutar un acción de control sobre el proceso o la máquina como tal.

Para contextualizar mejor acerca del control central del proceso, un controlador lógico programable o conocido por su siglas en inglés PLC, es un dispositivo electrónico utilizado para automatizar y controlar procesos industriales, maquinaria, producción, etc, mediante la ejecución de programas lógicos. Está compuesto por una unidad central de procesamiento (CPU), módulos de entrada y salida (E/S), una fuente de alimentación y, en algunos casos, un panel de operador. Existen diversas marcas de PLC, y cada una cuenta con sus propios estándares de programación. Utilizando un software licenciado específico de cada fabricante, se puede programar un PLC mediante cinco tipos de lenguajes de programación: Diagrama de Bloques Funcionales, Diagrama de Secuencias Funcionales, Texto Estructurado, Lista de Instrucciones y, el más empleado en la industria, Ladder. Estos lenguajes permiten a los ingenieros diseñar y optimizar controladores para diversas aplicaciones en la automatización industrial.

Una vez se introdujo el concepto de señales y la justificación de su implementación en el proceso, a continuación, en la **Tabla XXX** se hizo una descripción de los tipos de señales electrónicas existentes en los procesos industriales, se recopiló el comportamiento de cada clase de señal y más adelante se explicó la manera en que estas señales intervienen o inciden en el proceso de calentamiento por inducción.

Tabla XXX. Tipos de señales electrónicas

Tipo de señal	Descripción
Digitales	Envían una señal de activación o desactivación. Por ejemplo, un timer es una variable booleana: se considera energizado (paso de corriente) si su valor es 1 o desenergizado (no paso de corriente) si su valor es 0. Estas señales suelen tener un voltaje de entre 5 y 24 V.
Analógicas	Se determinan por la señal eléctrica que reciben, como

	los datos de un sensor de temperatura. Las señales analógicas operan en un rango de corriente de 4 a 20 mA.
--	---

Teniendo en cuenta que la configuración establecida es la de una sola bobina y un solo pasador, entonces se tienen las siguientes entradas y salidas del sistema:

1. Temperatura de la bobina (Entrada Analógica)
2. Temperatura de calentamiento del pasador (Entrada Analógica)
3. Temperatura de enfriamiento del pasador (Entrada Analógica)
4. Timer para las temperaturas (Entrada Digital)
5. Potencia para elevar la temperatura de la bobina (Salida Analógica)
6. Corriente eléctrica de la fuente de alimentación (Entrada/Salida Analógica)
7. Caudal del agua de enfriamiento (Entrada Analógica)
8. Presión del agua de enfriamiento (Entrada Analógica)
9. Velocidad del flujo de agua de enfriamiento (Entrada Analógica)
10. Volúmen de agua (Entrada Analógica)

De acuerdo con el análisis, las entradas y salidas del sistema se pueden clasificar en la siguiente tabla

Tabla XXXI. Listado de señales de todo el proceso de tratamiento térmico

Variable	Tipo	Dirección de la señal
Temperatura de calentamiento de la bobina	Analógica	Entrada
Temperatura de calentamiento del pasador	Analógica	Entrada
Temperatura de enfriamiento del pasador	Analógica	Entrada
Timer para las temperaturas	Digital	Entrada
Potencia para elevar la temperatura de la bobina	Analógica	Salida
Corriente eléctrica de la fuente de alimentación	Analógica	Entrada/Salida
Caudal del agua de enfriamiento	Analógica	Entrada
Presión del agua de enfriamiento	Analógica	Entrada
Velocidad del flujo de agua de enfriamiento	Analógica	Entrada
Volumen de agua de enfriamiento	Analógica	Entrada

- **Entradas:** 8 analógicas y 1 digital.
- **Salidas:** 2 analógicas.

Selección de componentes y Redundancia en Entradas y Salidas

Para asegurar flexibilidad y futuras expansiones, se recomienda ampliar en un 30% las entradas y salidas (I/O) adicionales, este valor se obtuvo a partir de la literatura sobre automatización y control, así como también se basó en recomendaciones de expertos en el área. Lo anterior permitiría en el futuro agregar sensores y controles extra sin necesidad de cambiar el sistema de control completo.

Actualmente el sistema actual cuenta con 9 entradas y 2 salidas, por lo cuál, se propusieron 3 entradas adicionales, lo que representa el 30% de la cantidad total de entradas, entonces, el total de entradas para el sistema de control a seleccionar es 14, por ende, se debe seleccionar un panel e instrumentos de control, que tengan cobertura con base en esa capacidad de variables. Para el diseño del tablero de control del horno de inducción, fue necesario tener en cuenta no solo los componentes seleccionados previamente, sino también su tipo de montaje y las necesidades de ventilación, distribución y cableado interno. En este sentido, se consideraron dos tipos de montaje fundamentales dentro de cualquier tablero de control industrial: el Carril DIN y las Borneras.

El carril DIN es una estructura que permite el montaje rápido y seguro de distintos dispositivos eléctricos como relés, contactores, temporizadores, protectores térmicos, entre otros. Es ampliamente utilizado en tableros eléctricos debido a su versatilidad, compatibilidad con múltiples dispositivos y facilidad de mantenimiento o sustitución de equipos. Generalmente en el mercado, este tipo de carril es hecho a base de aluminio o acero galvanizado pasivado, y a su vez tiene una perforación en la mitad del riel. Para el sistema de control de este proyecto se seleccionó un carril DIN del catálogo técnico de la empresa “Distribuciones Nevadis Colombia”, que cuenta específicamente con dimensiones de 7,5 mm de alto, 35 mm de ancho y 1 m de largo. (Ver **Figura XXXIX**).



*Figura XXXIX. Barra de metal de tipo carril DIN
Tomado de: <https://www.distribucionesnevadis.com>*

Por su parte, las borneras son los elementos encargados de organizar y facilitar las conexiones eléctricas dentro del tablero, permitiendo una mejor distribución de los cables y un mantenimiento más seguro. Para este proyecto, se seleccionó del mercado un tipo de bornera de tornillo, se encontró en un catálogo de la empresa “RS Electronics Components”, esta bornera seleccionada tiene dimensiones de 20 mm de alto, 12 mm de ancho y 20 mm de largo (dos polos). Por consiguiente, se requirió una cantidad estimada de borneras para al menos 20 puntos de conexión, lo cual representa un espacio lineal aproximado de 120 mm sobre el carril DIN. (Ver **Figura XL**).



*Figura XL. Borneras y sus tornillos para armar en un tablero
Tomada de: <https://www.didacticaselectronicas.com/>*

Además, se tuvo en cuenta la necesidad de ventilación interna debido a las altas temperaturas irradiadas a partir del calentamiento por inducción, por lo que se consideró la inclusión de rejillas laterales, y se dejó un espacio libre mínimo de 50 mm a cada lado del tablero para evitar sobrecalentamiento y facilitar futuras intervenciones o expansiones.

A continuación, (ver **Tablas XXXII - XXXVI**) se presentan los criterios de selección para cada una de las alternativas que se propusieron en el análisis morfológico respectivo a cada uno de los componentes que conforman el sistema de monitoreo y control del horno. Estas opciones fueron elegidas según los requerimientos técnicos de ingeniería y los del cliente, considerando criterios de selección previamente establecidos y mencionados. Se consultaron fuentes como MercadoLibre, Vía Industrial, Edelco y AliExpress para obtener referencias comerciales, precios, cotizaciones, catálogos de los componentes y costos totales de todo el sistema de acuerdo con las opciones más favorables del mercado.

Criterios de selección del Controlador Lógico Programable

Para la selección adecuada del PLC del sistema, se establecieron una serie de criterios de selección. Estos criterios se basaron en aspectos técnicos y funcionales, como las características del modelo, la memoria, la cantidad de entradas y salidas electrónicas, así como las dimensiones físicas, el tipo de montaje, el precio, la capacidad de expansión a través de módulos y el tipo de protocolo de comunicación entre el PLC con otros dispositivos de control. La elección del PLC se realizó considerando estos parámetros, asegurando que el equipo

cumpliera con los requerimientos del sistema.

Tabla XXXII. Características del Controlador Lógico Programable (PLC) seleccionado

Parámetro	Descripción
Modelo	PLC Allen Bradley Micrologix 850 2080-L50E-48QWBK
Características	5 entradas digitales 24V DC 5 salidas digitales 24V DC 9 entradas analógicas 0-10V DC
Memoria	14 KB
Fuente de alimentación conmutada 24 V 10 A – Mean Well NDR-240-24	125.2 x 100 x 113.5
Dimensiones del PLC en mm	100 x 110 x 75
Dimensiones de la fuente de alimentación en mm	127 x 72 x 108
Tipo de montaje del PLC	Carril DIN
Módulo de expansión de I/O	1769-OB16
Comunicación	PROFINET, PROFIBUS, GPRS, RS232, RS485
Precio PLC	\$4.927.386 COP
Precio módulo de expansión	\$1.200.000 COP
Justificación técnica de ingeniería	Ofrece capacidad de expansión y alta fiabilidad para aplicaciones industriales.

Criterios de selección de la interfaz HMI

Una interfaz Humano - Máquina (HMI) es una herramienta visual que permite la interacción entre el usuario y la máquina o sistema, facilitando el contacto directo con el proceso a controlar. Ofrece un diseño de alto rendimiento que permite al usuario manipular variables de control según sea necesario. Generalmente, estas interfaces son pantallas táctiles que presentan botones, elementos gráficos que representan los instrumentos de la planta, un panel que registra alarmas y eventos, etiquetas, textos y comandos.

La tabla que se muestra a continuación, presenta un modelo de pantalla HMI seleccionado a partir de la búsqueda de referencias comerciales y catálogos técnicos de pantallas existentes en el mercado. Esta búsqueda se llevó a cabo teniendo en cuenta los criterios de selección establecidos al inicio de la sección “Sistema de monitoreo y control”, lo que garantizó que las opciones consideradas cumplieran con los requisitos necesarios para un rendimiento óptimo y adecuado a las necesidades del sistema. A partir de las alternativas presentadas en el análisis morfológico, se propuso una pantalla de tipo táctil, esta tiene un costo más bajo debido a que se reducen la cantidad de componentes físicos, también tiene un diseño compacto y una pantalla mucho más grande con respecto a otras alternativas, lo que permite una visualización más completa y moderna del proceso.

Cabe resaltar que la selección corresponde al componente físico de la pantalla, pero la interfaz HMI de interacción con el usuario se diseña y programa por aparte, ese proceso es independiente de la pantalla tangible. Más adelante, en los costos de diseño e instalación, se incluyó este servicio de programación.

Tabla XXXIII. Pantalla seleccionada para proyectar la interfaz HMI

Parámetro	Descripción
Modelo	Pantalla táctil de Allen Bradley PanelView Plus 7 Performance - Referencia: 2711P-T10C22D9SPK
Características	Retroiluminación LED, puerto Ethernet y USB, Ranura micro SD
Sistema Operativo	Windows 10 IoT Core
Memoria	4 GB de RAM
Alimentación	24 V en DC
Precio	\$3.873.641 COP
Dimensiones en mm	254 x 254 x 80 (Requiere recorte en puerta del tablero: 189 x 138)
Tipo de montaje	Carril DIN
Justificación técnica de ingeniería	Permite una interacción intuitiva para supervisar y controlar el proceso térmico en tiempo real.

Criterios de selección del protocolo de comunicación

En un sistema de control, un protocolo de comunicación es un canal encargado del envío y recepción de señales y datos entre el controlador y los demás dispositivos de control, como sensores y actuadores. El protocolo de comunicación verifica que este proceso se realice de manera adecuada, en términos de cómo se envían los mensajes, cómo se corrigen los errores y cómo se asegura la seguridad de la comunicación. A continuación se presenta el módulo de comunicación que fue seleccionado para la implementación en el control de la comunicación del proceso de calentamiento en el horno de inducción. Este módulo fue escogido a partir de los criterios técnicos que se especificaron al inicio de la sección “Sistema de control y monitoreo”.

Tabla XXXIV. Selección del protocolo de comunicación

Parámetro	Descripción
Opción Seleccionada	Módulo de comunicación Ekip Com Modbus TCP I2-250221
Precio	\$3.071.900 COP

Peso	0.3 kg
Dimensiones	Alto: 0,03 Ancho: 0,15 Profundidad: 0,02
Justificación técnica de ingeniería	Protocolo ampliamente utilizado en la industria, eficiente para la comunicación entre PLC, sensores y actuadores.

Luego de la búsqueda de alternativas de módulos de comunicación adecuados y precisos se consideró la cantidad de variables a controlar para el proceso de calentamiento y el número de entradas y salidas que interactúan en el horno, por lo cuál, se eligió un módulo Modbus TCP de la marca ABB. A continuación, se presenta una ilustración del instrumento seleccionado.



Figura XLI. Módulo de comunicación seleccionado
Tomada de: Catálogo técnico de módulo de comunicación Modbus TCP de Interelectricas.com.co

Criterios de selección de los sensores de monitoreo

Un sensor de monitoreo es un dispositivo electrónico diseñado para detectar, recolectar y procesar en tiempo real datos que se envían a un controlador lógico programable. El PLC utiliza la información recibida para ejecutar acciones de control automáticas sobre un mecanismo o máquina en específico, lo que permite optimizar el control de un proceso determinado. En la industria existen 14 tipos de sensores, que se encargan de medir información cualitativa acerca de variables como:

- Temperatura
- Presión
- Humedad
- Nivel
- Intensidad lumínica
- Sonido
- Movimiento
- Velocidad
- Ultrasonido
- Proximidad
- Posición
- Óptica
- Color
- Magnéticos

Por otro lado, también existen los sensores inductivos y capacitivos. Los sensores inductivos son dispositivos que detectan objetos metálicos sin necesidad de contacto físico, mientras que los sensores capacitivos pueden detectar tanto objetos metálicos como no metálicos a través de cambios en la capacitancia del instrumento.

Para la experiencia de diseño del horno de inducción, se seleccionaron dos sensores específicos orientados a la recolección de datos sobre la temperatura, tanto durante el calentamiento como en el enfriamiento.

También se incluyeron sensores para medir la corriente eléctrica y la potencia requerida por la fuente de alimentación del sistema de calentamiento. En la siguiente tabla, se presentan todos los sensores de monitoreo necesarios para controlar las variables involucradas en el horno de inducción. Los sensores fueron seleccionados a partir de los criterios de selección mencionados anteriormente al inicio de la sección “Sistema de monitoreo y control”.

Tabla XXXV. Criterios y selección de los sensores de monitoreo

Tipo de Sensor	Modelo	Precio	Justificación	Dimensiones en mm	Tipo de Montaje
Sensor de temperatura de calentamiento	Termopar tipo láser TKTL 40	\$550.000 COP	Mide la temperatura de calentamiento del pasador hasta 860°C.	205 x 155 x 62	En un soporte metálico externo
Sensor de temperatura de enfriamiento	Termopar tipo láser TKTL 40	\$550.000 COP	Permite monitorear la temperatura después del tratamiento térmico.	205 x 155 x 62	En un soporte metálico externo
Sensor de corriente y potencia en el conductor	Sensor de corriente ACS712 en 30 A (por Efecto Hall)	\$65.000 COP	Mide el consumo de la bobina y controla la potencia aplicada.	31 x 13	Cables jumper unidos a borneras
Sensor de posición	Sensor de proximidad inductivo Referencia: Lj12a3-4-z/bx Npn	\$18.000 COP	Sensor inductivo de proximidad, detecta objetos metálicos.	64 x 20 x 20 Diámetro = 20	En un soporte metálico externo
Sensor de velocidad	Sensor de velocidad lineal (velocímetro) #74429-97 Harley Davidson	\$172.100 COP	Sensor de velocidad de cinta, línea o rotación.	Longitud del cable: 25 cm Diámetro de cuerpo: 1.5 cm	Cables jumper unidos a las borneras
Timer para control de calentamiento y enfriamiento	Temporizador digital programable	\$150.000 COP	Gestiona el tiempo exacto del tratamiento térmico.	75 x 50 x 70	Carril DIN
Sistema de alarma visual y sonora	Torre de señalización LED con zumbador 24V DC Marca Emas	\$280.000 COP	Notifica al operador sobre fallos en temperatura, corriente o tiempos fuera de rango.	300 x 60 Tomado de: “Signalling Devices Emas Catalogue”	Arriba del tablero unido a cables conectados a las borneras
Relé auxiliar	DNI 0215 – 24V / 40–30A	\$40.000 COP	Protege a los equipos de daños y fallas ante una posible sobrecarga eléctrica	-	Carril DIN

Criterios de selección de los cables y accesorios

Tabla XXXVI. Criterios de selección para los cables y accesorios

Elemento	Precio	Diámetro de los cables	Tipo de montaje
Cables del PLC	\$200.000 COP	6 – 7 mm	Usa canaletas 25x40 o 40x60 mm
Cables de comunicación ethernet/modbus	\$100.000 COP	6 – 7 mm	Usa canaletas 25x40 o 40x60 mm
Cables de alimentación y señales de entrada	\$150.000 COP	7 – 9 mm	Borneras en carriles DIN según la cantidad de cables

Una vez llevado a cabo la selección de cada uno de los componentes del sistema de monitoreo y control del horno de inducción, se llegó a una conclusión sobre su diseño. Debido al tamaño del tablero y a las dimensiones considerables de sus componentes, se establece que es mejor ubicar el tablero de control como parte externa del horno. Esto se debe a que el tablero requiere un espacio adecuado que permita la inclusión de todos los componentes y, además, es importante separarlo por razones de seguridad, para evitar que las altas temperaturas emitidas puedan llegar a perjudicar los instrumentos y ocasionar un desastre eléctrico en la planta. La longitud del brazo de la bobina, separará el tablero de control del lugar del tratamiento térmico sometido a un ambiente de calor y humedad. Por otra parte, como medida de seguridad, también se incluyó entre los componentes del tablero un relé para proteger los equipos ante una sobrecarga eléctrica (subidas o bajadas bruscas de tensión y corriente), y un relé auxiliar.

Finalmente, a partir de los componentes registrados en las tablas anteriores, se buscó una referencia comercial para un chasis de tablero de control que incluya cada componente y el cableado necesario para las conexiones eléctricas. Se buscó la mejor opción en términos de precio y cumplimiento con los requerimientos de dimensiones. La referencia del tablero de control seleccionada para el horno es: Tablero Metálico 800 x 600 x 250 mm Ip65 fabricado por la empresa “Vitel Energía: Tecnología Eléctrica” (Ver Figuras XLII y XLIII). Este tablero tiene un precio aproximado de 700.000 COP.

Es un armario eléctrico especialmente diseñado para proteger los equipos eléctricos en entornos industriales donde se manejan altas temperaturas, exposición a la intemperie, al polvo y al agua. (Información tomada del catálogo de la empresa y ficha técnica del tablero).



Figura XLII. Vista frontal del tablero de control



Figura XLIII. Vista lateral del tablero de control

Tomadas del catálogo y ficha técnica del tablero en Vitel Energía

Tabla XXXVII. Costo total del sistema de monitoreo y control del Horno

Componente	Precio (COP)
PLC Micrologix 850 Allen Bradley	\$4.927.386
Módulo de expansión	\$1.200.000
Pantalla HMI	\$3.873.700
Fuente de alimentación	\$500.000
Termopar tipo láser TKTL 40	\$550.000
Termopar tipo láser TKTL 40	\$550.000
Sensor de proximidad inductivo	\$300.000
Sensor de corriente y potencia	\$65.000
Sensor de velocidad lineal	\$172.100
Temporizador digital	\$150.000
Alarma LED Zumbador	\$280.000
Módulo de comunicación Modbus TCP	\$3.071.900
Cables y accesorios	\$400.000
Carriles Tipo DIN x10	\$144.000
Borneras x25	\$125.000
2 Relés auxiliares	\$80.000
Tablero de control	\$700.000
Total estimado	\$17.089.086

Costos de diseño, selección e instalación del sistema de control

Con el objetivo de facilitar la instalación del sistema de control del proceso en la planta y estimar costos reales, es fundamental considerar las actividades necesarias para poner en marcha el sistema automático de control. Para ello, se consultó a la empresa Omnicon, especializada en automatización y encargada de implementar proyectos. La empresa propuso que un ingeniero de automatización se encargue de la planeación, reconocimiento y clasificación de señales, diseño, selección, y programación del sistema. Además, la empresa dispone de un técnico encargado del montaje de los instrumentos en el tablero de control y de la conexión eléctrica en la planta.

A partir de lo anterior, Omnicon proporcionó una cotización por todas las labores que serían contratadas. En la cotización se incluyó el costo de transporte, tiempo de la gestión de compra de los equipos, salario, alimentación y seguridad durante el desplazamiento de los trabajadores a la planta. Para complementar el proceso, es necesario desglosar las tareas que los ingenieros deben realizar para montar en la planta el sistema de monitoreo y control, esto incluye:

- La elaboración de planos eléctricos y esquemas de cableado para la instalación
- Programación del PLC en el software Studio 5000 (Licenciado por la compañía).
- Diseño de la interfaz HMI del proceso en el software de Factory TalkView (Licenciado por la compañía).
- Montaje de los instrumentos y cableado lógico
- Conexión del tablero a la red eléctrica de la planta
- Realización de pruebas y simulaciones del tablero
- Documentación técnica para Cadenpal

Según la empresa consultada, estas tareas de instalación tomarán aproximadamente 35 días. En la **Tabla XXXVIII** se muestran las distribuciones de tareas y la cantidad de días para ser ejecutadas.

Tabla XXXVIII. Tareas de instalación del sistema de control y días de ejecución

Actividad	Días
Reconocimiento y clasificación de señales	1

Diseño de la arquitectura de control	3
Dimensionamiento del # de instrumentos	2
Selección de componentes	2
Adquisición de componentes	4
Montaje y armado del tablero de control	10
Traslado del tablero de control a la planta y conexión	1
Programación del PLC	5
Diseño de la interfaz HMI	3
Simulaciones y pruebas	3
Entrega de documentación al cliente	2
Total de días	36

Una vez establecidas todas las funciones y tiempos de ejecución de ellas, se entregó la cotización del servicio por parte de Omnicon, la cuál arrojó un costo de 5.000.000 COP.

Finalmente, el costo total de todo el sistema de monitoreo y control que abarca su diseño, selección de componentes, adquisición, ensamblaje e instalación, asciende a 22.089.086 COP.

2. Sistema de Calentamiento, Energía y Potencia del horno

Después del análisis morfológico que se realizó para el sistema de calentamiento de la pieza a tratar térmicamente, se establecieron unos criterios de selección con base en requerimientos técnicos de ingeniería y los del cliente.

Consideraciones y criterios para el diseño y selección del sistema de calentamiento

Para el diseño de la bobina de calentamiento y la selección del sistema de movimiento y posicionamiento de los pasadores, primero se realizó un análisis del calentamiento por inducción con base en esquemas obtenidos de la literatura. A partir de este análisis, se definió la configuración óptima de la bobina y el sistema de enfriamiento. Es importante destacar que, según el esquema de calentamiento seleccionado, se calculó y definió la mejor alternativa para el diseño y configuración del sistema de posicionamiento y avance de los pasadores a través de la bobina de inducción (ver **Figura XLIV**). Esta decisión consideró los requerimientos del cliente y criterios técnicos de ingeniería, que además priorizó la ergonomía, la reducción de costos, la facilidad de operación y mantenimiento, y a su vez, el uso de la menor cantidad posible de materiales y componentes mecánicos, como bujes, rodillos, engranajes, rodamientos y ejes que pudieran incidir en una complejidad de geometrías.

Como resultado, se determinó que la mejor opción para el posicionamiento de los pasadores es que estos sean móviles, mientras que la bobina de calentamiento y el sistema de enfriamiento permanecen fijos. De esta manera, el pasador se desplazará verticalmente durante todo el proceso de tratamiento térmico y luego por un anillo de enfriamiento dispuesto alrededor de la bobina, cubre su circunferencia, tal como se observa en la Figura XLIV. Este anillo cuenta a través de toda su circunferencia con varios orificios por donde salen chorros de agua que enfrían la pieza durante el proceso de temple. A continuación, se presenta la configuración de pieza entre la bobina de calentamiento y el anillo de enfriamiento, la cuál es la más utilizada en la industria de procesos de tratamiento térmico.

Configuración del sistema de calentamiento en la industria

En la **Figura XLIV** se representa el proceso de calentamiento por inducción, basado en la corriente inducida en el material conductor (pasador) y el efecto Joule, según la ley de inducción de Faraday. Para el caso del tratamiento térmico de temple, que involucra un calentamiento y enfriamiento acelerado de la pieza, la figura destaca dos anillos clave: el anillo superior e inferior. El anillo superior, de color café, es el inductor, el cual se conecta a una fuente de voltaje y genera la corriente necesaria para calentar la pieza. En este punto se lleva a cabo el tratamiento térmico por inducción. Por otro lado, el anillo inferior, de color rojo, está conectado a un sistema de

enfriamiento por agua. A medida que la pieza avanza en el proceso de calentamiento, el anillo inferior expulsa chorros de agua a través de pequeños orificios, enfriando el pasador progresivamente. Esta combinación de calentamiento y enfriamiento controlado da lugar a los tratamientos térmicos de templeado y posterior revenido con enfriamiento al aire.

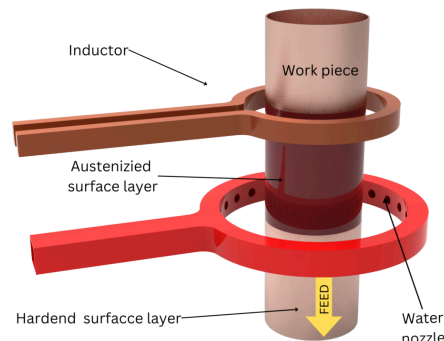


Figura XLIV. Calentamiento de un pasador a partir de la ley de inducción de Faraday y el efecto Joule [32]

Se debe considerar que el número de vueltas de la bobina determina la distribución del voltaje y la corriente, lo que afecta directamente la transferencia de calor en estado estacionario al pasador. Generalmente, un mayor número de vueltas en la bobina induce más corriente eléctrica en el pasador y por lo tanto mayor calentamiento, pero a su vez, un mayor número de vueltas aumenta la longitud del conductor, lo que también implica que se pueda incrementar la resistencia de la misma bobina. El aumento de la resistencia implica que para la misma corriente inducida, se disipa más energía en forma de calor, lo que resultaría en una pérdida de eficiencia térmica del ciclo. Por lo tanto, en el diseño y selección de un equipo de inducción, se busca un equilibrio en el número de vueltas de la bobina y no entrar en conflicto entre la corriente inducida y la eficiencia térmica del proceso.

A partir del análisis de la configuración de la bobina en relación con el pasador que la rodea, se busca generar un calentamiento homogéneo en el perímetro superficial del pasador, de manera gradual hasta el centro de la pieza en la dirección radial. Seguido de lo anterior, se realizó una búsqueda de bobinas de cobre que permitan el calentamiento por inducción, considerando la potencia requerida por el sistema. El objetivo es elevar la temperatura del pasador más crítico en geometría que es de 22 cm de longitud y 5,1 cm de diámetro (el más grande producido en Cadenpal y el que genera la mayor carga térmica) desde la temperatura ambiente hasta 860 °C. A partir de los cálculos realizados usando la teoría de inducción, se obtuvo un valor de potencia de 17,01 kW, los cálculos se pueden ver en la **Ecuación 6 de la sección resultados del diseño de detalle**.

Selección de la geometría de bobina seleccionada

En la industria existen diversos tipos de geometrías de bobinas de calentamiento por inducción. Con respecto a las alternativas de bobinas presentadas en el análisis morfológico, las bobinas con diseño helicoidal presentan una gran ventaja frente a los otros tipos de bobina, debido a que son las más utilizadas en la industria por su tamaño, garantiza el calentamiento uniforme de las piezas y su facilidad de conexión eléctrica a una fuente de alimentación. Las alternativas de bobina requieren adecuaciones especiales ya que por el lado de la bobina solenoide se requieren de actuadores de control adicionales, lo que incrementa los costos de su instalación, y por el lado de la bobina fija, esta no permite un desplazamiento ni sustitución, lo cual es fundamental para el proceso, ya que en la empresa se fabrican pasadores de diferentes tamaños, como se indicó anteriormente en los planos. Por ello, es necesario emplear una bobina intercambiable que pueda adaptarse a distintos tamaños en la fuente de alimentación, facilitando su ajuste según el pasador a calentar. Estos criterios particulares del sistema de calentamiento, permitieron descartar tipos de bobinas que no cumplan con las especificaciones técnicas y requerimientos del proceso de calentamiento para los pasadores producidos en Cadenpal.

Es importante considerar que el diseño de una bobina se realiza en función del uso o aplicación que se le vaya a dar a esa bobina en específico. Por ejemplo, si se va a calentar una olla en una estufa de inducción se utiliza una bobina tipo pancake (ver **Figura XLV**) o si es el caso de calentar un pasador completo, se utiliza un diseño de bobina helicoidal de longitud cilíndrica (ver **Figura XLVI**).



Figura XLV. Diseño de Bobina tipo pancake [32]



Figura XLVI. Diseño de Bobina tipo cilíndrica [32] .

Por lo tanto, se determinó que la mejor opción para el calentamiento por inducción es una bobina de tipo helicoidal con una longitud cilíndrica de cuatro espiras. Esta geometría permite que el pasador atravesase toda su longitud a través del agujero de la bobina de forma secuencial en la dirección axial, lo que facilita el calentamiento uniforme por toda la pieza y por ende mejora el alcance esperado del tratamiento térmico por inducción. Otras configuraciones, como las bobinas tipo pancake o rectangular, no son adecuadas para este diseño. La bobina pancake tiene un enrollado completamente circular y carece de un orificio que permita el paso del pasador, lo que resultaría en un calentamiento localizado en solo una de las caras de la pieza, en lugar de calentar todo el pasador desde la superficie hasta el núcleo.

Por otro lado, la bobina rectangular no es compatible con la forma cilíndrica del pasador, lo que provocaría también calentamientos localizados no deseados a medida que la pieza atravesase el orificio de la bobina. La transferencia de calor desempeña un papel fundamental en este proceso, considerando el espacio y el área de transferencia de calor. Si solo se calentara una parte del pasador, se irradiará más calor del necesario, lo que resultaría en una baja eficiencia energética, especialmente dado que los procesos de calentamiento por inducción suelen operar con una eficiencia del 90% [65]. Por lo tanto, para este proyecto, es esencial utilizar una bobina de longitud cilíndrica que garantice un calentamiento uniforme y eficiente hacia todo el pasador. Cabe recordar que la cantidad de espiras o número de vueltas que tiene la bobina son determinadas según el nivel de voltaje y corriente necesario para que la bobina produzca la cantidad de potencia requerida, y, a su vez, poder elevar la temperatura del pasador desde la temperatura ambiente hasta una temperatura final de 860 °C.

Justificación del tipo de bobina seleccionada

La bobina seleccionada para este proyecto es de tipo helicoidal, este tipo de bobina es adecuada para aplicaciones de media a baja frecuencia (se consideran valores que oscilan entre 3 a 50 kHz). El diámetro interno de la bobina se determinó mediante una estimación ideal, ya que en la literatura se recomienda que el diámetro sea de 5 a 10 mm mayor que el diámetro del pasador, con el fin de evitar el contacto directo entre las piezas, y poder facilitar la visualización del calentamiento en la pieza durante el proceso. En el contexto del proyecto de los pasadores de las cadenas, para la pieza más grande y crítica producida en la empresa, se propone un diámetro interno de la bobina que oscila entre 58 y 62 mm. Por otra parte, el número de espiras de la bobina se selecciona entre cuatro y ocho vueltas, considerando cargas de potencia media típicas en aplicaciones industriales. Para el caso de la potencia y corriente requerida para el proyecto (revisar los desarrollos de los cálculos de las **Ecuaciones 6 y 8** junto con sus resultados obtenidos), **estos cálculos se encuentran en la sección de resultados del diseño de detalle.**

Una vez establecidos los valores requeridos, para la bobina a seleccionar en este estudio, se estimó inicialmente un valor entre seis y ocho espiras de la bobina, que aseguran la transferencia de potencia y corriente requeridas para el calentamiento de la pieza y el alcance de la temperatura deseada. El diámetro del alambre de cobre necesario para formar estas espiras, considerando un diámetro típicamente utilizado en bobinas de inducción (por ejemplo, 2,5 a 4 mm), se calcula para permitir cuatro vueltas en una longitud de aproximadamente 220 mm. Se recomienda utilizar un alambre de cobre con un diámetro de aproximadamente 3,5 mm para mantener un equilibrio entre resistencia y facilidad de fabricación. [36].

Cabe resaltar que en este primer paso las medidas que se estimaron son acordes a los resultados presentados en la literatura para diseño de bobina helicoidales, aún no es una selección de una referencia comercial real a usar en el proyecto, para eso primero se debe realizar una serie de cálculos de inducción, de producción de pasadores, de tiempo, de cargas, de calor necesario en el pasador para elevar su temperatura hasta 860 °C, de corriente, de potencia, de campo magnético, de consumo de la fuente de alimentación de la bobina y los costos energéticos que incurrir en la planta.

Una vez se estableció la geometría adecuada, se elaboraron unos planos conceptuales por parte del estudiante de ingeniería mecánica. El plano de la **Figura XLVII** representa una vista isométrica del ensamble

entre la bobina y el pasador, en cambio el plano de la **Figura XLVIII** representa una vista superior del ensamble de la bobina sobre el pasador. Ambos planos muestran los diámetros de la bobina y del pasador, así como las distancias de separación especificadas. Lo anterior se ilustra en la siguiente figuras.

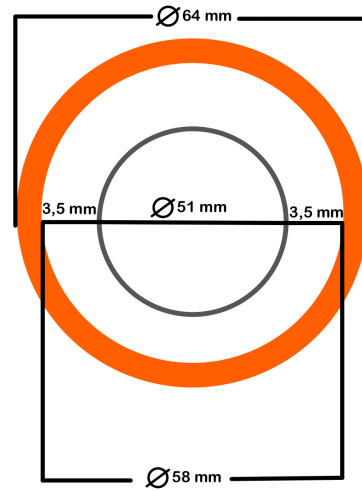


Figura XLVII. Plano estimado isométrico de la bobina y el pasador

Figura XLVIII. Plano estimado superior de la bobina y el pasador

Selección del material acorde para la bobina

Según la literatura, las bobinas para calentamiento por inducción son fabricadas a partir de una variedad de materiales que incluyen cobre y otros metales como acero galvanizado, hierro, aluminio. La elección del material es crucial para la eficiencia del proceso de calentamiento. El cobre es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones debido a su alta conductividad eléctrica, así como también su gran maleabilidad y ductilidad, entre otras propiedades mecánicas. Estas características facilitan, en aplicaciones como bobinas inductoras, la distribución uniforme de la corriente a lo largo de la bobina. Esto no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también minimiza el riesgo de que se generen puntos calientes localizados en el diámetro interno de la bobina, lo que podría llegar a afectar el material que se está calentando por inducción, evitar esto permite una mayor eficiencia en la generación de calor. Esto se traduce en tiempos de calentamiento más cortos y un mejor control de la temperatura, lo que es esencial para aplicaciones de precisión.

Otros materiales que se consideran, como el aluminio, ofrecen ventajas en términos de peso y costo, pero su conductividad eléctrica es significativamente menor en comparación con el cobre. Esto puede resultar en un calentamiento menos eficiente y una mayor necesidad de potencia para alcanzar los mismos niveles de temperatura, lo que incurriría en un mayor gasto energético y por ende aumento de los costos de la planta.

A continuación, en la **Tabla XXXIX** se consignaron los datos de conductividad térmica y eléctrica para cada uno de los materiales que se utilizan en la industria para fabricar una bobina. Cabe aclarar que las unidades de la conductividad eléctrica de un material pueden ser Ohmios sobre metro (Ω/m) o también Siemens sobre metro (S/m). Un siemens por metro equivale a un Watt por Amperio, es decir, unidades de potencia por corriente.

Tabla XXXIX. Conductividad térmica de los materiales de la bobina

Material	Conductividad Térmica (W/m·K)	Conductividad Eléctrica (S/m)
Cobre	401	$5,96 \times 10^7$
Aluminio	237	$3,78 \times 10^7$
Hierro	80.4	$1,53 \times 10^7$
Acero Galvanizado	17–45 (varía según el tipo y recubrimiento)	1.4×10^6

Según la tabla, el cobre tiene la mayor conductividad térmica con respecto a los demás materiales, por lo cual se buscó y seleccionó un diseño de bobina hecha de tubo de cobre hueco, refrigerado por agua para disipar eficientemente el calor generado durante el proceso de inducción. La bobina de cobre debe tener un recubrimiento que actúa como aislamiento térmico con propiedades dieléctricas. Este se encarga de proteger la bobina frente a la

exposición a altas temperaturas. El aislamiento puede estar hecho de materiales como fibra de vidrio, mica, o resinas epóxicas especiales.

En un análisis de criterios técnicos de ingeniería se determinó que, para los objetivos que se plantearon sobre el diseño del horno, y, a partir de los requerimientos establecidos para la bobina, es posible seleccionar en el mercado no solo la bobina, sino también su fuente de alimentación integrada. Esto significa que no sería necesario establecer una instalación eléctrica adicional en Cadenpal para suministrar corriente y potencia a la bobina, lo que incurriría en una disminución de costos operativos para la empresa, y por ende, en una simplificación del diseño. Por lo tanto se cumple con requerimientos del cliente. El mercado ofrece equipos de alimentación con características técnicas adecuadas que cumplen con las condiciones de arranque de la bobina. Para la selección del sistema de calentamiento y la fuente de alimentación, se detalló una sección que reúne cálculos con base en datos de la planta, suministrados por la gerencia de la empresa, estos cálculos de producción permitieron realizar estimaciones precisas acerca la parte térmica del proceso y con base en parámetros se puedan seleccionar alternativas del mercado acorde a las calculadas. A continuación se presenta la sección.

Resultados y justificación de ingeniería para la selección del sistema de calentamiento y fuente de alimentación.

Cargas Térmicas generadas por los pasadores

Tras recopilar información sobre el horno seleccionado para el diseño, los materiales aislantes y refractarios, y la cantidad de pasadores a tratar térmicamente por ciclo de trabajo se procedió al cálculo de cargas térmicas y la cantidad de calor generada por los pasadores. Para ello, se tomaron en cuenta los tiempos y temperaturas adecuadas del tratamiento térmico por inducción y temple. El cálculo inició con la clasificación de los pasadores en tres rangos distintos según sus dimensiones (longitud y diámetro). Los planos proporcionados por la gerencia de Cadenpal (**Ver Anexos 1-4**) evidencian una tendencia en la producción de pasadores dentro de los siguientes rangos:

- Primer Rango (Longitud = 8 - 13 cm), (Diámetro = 1.702 - 3.175 cm).
- Segundo Rango (Longitud = 14 - 19 cm), (Diámetro = 3.2 - 3.45 cm)
- Tercer Rango (Longitud = 20 - 22 cm), (Diámetro = 3.5 - 5.1 cm)

Análisis y estimación de producción mensual de pasadores y ciclos de T.T

Para calcular las cantidades de cargas térmicas que generan los pasadores ingresados al horno se partió del dato inicial de 3.600 unidades de pasadores producidas al mes en la empresa, este dato fue proporcionado por el dueño de Cadenpal. De acuerdo con las estimaciones de producción de la empresa, los cálculos indican que la empresa en Medellín, encargada del tratamiento térmico de pasadores, realizaría aproximadamente los siguientes flujos de operación:

$$3.600 \text{ pasadores} / 21 \text{ días} = 171 \text{ pasadores por día}$$

$$171 \text{ pasadores} / 8 \text{ horas laborales} = 22 \text{ pasadores/hora}$$

Haciendo las respectivas divisiones según la cantidad de días que se laboran, los requerimientos y órdenes de pedidos, horas laborales que se trabajan (8 horas) se estableció un rango de 22 pasadores/hora que se colocarían en el horno para ser tratados térmicamente en un ciclo de trabajo, con base en esto, se analizaron primero los pasadores de mayor masa de cada uno de los rangos ya que son los que van a tener una mayor tasa de transferencia de calor de estado estacionario durante el proceso debido a que van a demandar un mayor potencial de energía para ser calentados por inducción, como también, para ser enfriados de forma acelerada.

Se tiene en cuenta que un diseño mecánico se realiza teniendo un enfoque mucho más conservador, por esto, se elevó el dato de pasadores producidos a 4.500 unidades, esto anterior permite dimensionar un horno que acepte esa demanda estimada de pasadores en el caso de que la empresa busque expandirse o aumentar la producción (con el rediseño del proceso), y también esa estimación cumple con requerimientos técnicos de ingeniería como factores de seguridad, materiales adecuados, resistencias térmicas y eficiencia de la máquina.

De acuerdo con la cantidad de pasadores estimada, en función del diseño mecánico propuesto, se replicaron los cálculos realizados previamente, sin embargo, se tuvo en cuenta el valor de la producción mensual de pasadores en Cadenpal, así como también las estimaciones de los ciclos de trabajo de la empresa en Medellín encargada del tratamiento térmico de las piezas.

$$4.500 \text{ pasadores}/21 \text{ días} = 214 \text{ pasadores por día}$$

$$214 \text{ pasadores}/8 \text{ horas laborales} = 27 \text{ pasadores/hora}$$

La cantidad de pasadores tratados aumentó a 27, es decir, 5 pasadores más en comparación con la producción original que Cadenpal entrega a la empresa en Medellín. Esto equivale a 105 pasadores adicionales por mes que se podrían tratar. Con estos datos, se puede afirmar que la estimación para la propuesta de diseño mecánico es efectiva en términos de incremento en la producción de pasadores. Además, el diseño contribuiría a que Cadenpal aumente su volumen de producción y, en consecuencia, mejore su rentabilidad a largo plazo

Otros datos que se tienen en cuenta en los cálculos que se van a mostrar más adelante son la densidad del acero 4140 que es 7850 kg/m^3 y el calor específico del material que es de $480 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

Notación de los cálculos: VR# = Volúmen del rango del rango perteneciente al #

QR# = Cantidad de calor del rango perteneciente al #

= Número representativo del rango o grupo de pasadores que se menciona

Cálculo del volúmen del pasador más grande del primer rango (Ecuación 1)

$$VR1 = \pi * r^2 * h$$

$$VR1 = \pi * (0,015875 \text{ m})^2 * (0,13 \text{ m})$$

$$VR1 = 1,02924 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Cálculo de la masa del pasador más grande del primer rango (Ecuación 2)

$$m = \rho * V$$

$$m = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1,02924 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m = 0,81 \text{ kg}$$

Una vez obtenido el valor de la masa del pasador principal del primer rango descrito, producido en Cadenpal, se procedió a calcular su peso, representado por la letra W (Weight = peso en inglés) y expresado en Newtons (N). Esta fuerza genera un esfuerzo flector sobre el soporte donde reposa el pasador durante el movimiento del sistema. Más adelante se encontrará mejor desarrollado. A continuación en la ecuación 3 se presenta la fórmula que se utilizó para calcular el peso de cada pasador según su rango de tamaño.

Cálculo del peso en Newton (Ecuación 3)

$$W = m * g$$

Donde g representa la aceleración de la gravedad, y su valor es $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$$W = 0,81 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W = 7,95 \text{ N}$$

Luego de plantear el escenario donde el pasador requiere un calentamiento controlado hasta alcanzar una temperatura de $860 \text{ }^\circ\text{C}$, y luego, el pasador se enfría hasta una temperatura de $80 \text{ }^\circ\text{C}$, se procedió a realizar el cálculo de la cantidad de calor que absorbe la pieza para poder alcanzar los $860 \text{ }^\circ\text{C}$. En la **Ecuación 4** se realizó el cálculo de la cantidad de calor necesario en el pasador más grande perteneciente al primer rango descrito anteriormente pueda alcanzar los $860 \text{ }^\circ\text{C}$. Cabe aclarar que por mediciones de temperatura del pasador en condiciones normales (con respecto al proceso previo de maquinado que se le aplica, la temperatura de la planta,

el almacenamiento en bodega y en recipientes metálicos algo fríos, se obtuvo un valor de temperatura de 25 °C), este fue el valor inicial que se asumió en los cálculos a partir de las condiciones descritas. También se corroboró con el gerente de Cadenpal.

Cálculo de la cantidad de calor necesario en el pasador alcanzar los 860°C (Ecuación 4)

$$QR1 = m * c * \Delta T$$

$$QR1 = 0,81 \text{ kg} * 0,48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (860^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$QR1 = 324,65 \text{ kJ}$$

El valor que se obtuvo acerca de la cantidad de calor generado por el pasador representa el calor que el sistema de enfriamiento debe extraer de la pieza. Con este dato, se puede determinar el caudal de agua de enfriamiento necesario para remover ese calor del pasador.

Se repite el mismo proceso de cálculo para los pasadores mayores de los otros rangos obteniendo los siguientes valores de volumen, masa, calor y peso respectivamente.

Para facilitar la comprensión de las ecuaciones utilizadas, en las siguientes secciones de cálculos y resultados que abordan los rangos de tamaños de los pasadores producidos en la planta y otros cálculos asociados a los subsistemas, se menciona el número respectivo de la ecuación aplicada para cada cálculo. Ya sea para determinar volumen, masa, peso o calor. Con esto se identifican mejor los métodos que se utilizaron para los resultados presentados.

En los siguientes enunciados se presentan los resultados de los cálculos de volumen, masa, peso y calor o energía adquirida por cada pasador. Para dar mayor claridad al respecto, se muestran específicamente los resultados de los pasadores de mayor tamaño correspondiente a cada lote o rango producido en la planta. La metodología consistió en utilizar las ecuaciones planteadas al inicio de esta sección, limitándose a presentar únicamente los resultados finales para cada pasador. Se tomaron los de mayor tamaño de cada rango debido a que representan la condición más crítica para cada uno de los grupos a los que pertenecen.

Para el segundo rango (Aplicación de las ecuaciones 1, 2, 3 y 4)

$$VR2 = 1,828 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m = 1,44 \text{ kg}$$

$$W = 14,13 \text{ N}$$

$$QR2 = 577,15 \text{ kJ}$$

Para el tercer rango (Aplicación de las ecuaciones 1, 2, 3 y 4)

$$VR3 = 4,4942 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m = 3,53 \text{ kg}$$

$$W = 34,63 \text{ N}$$

$$QR3 = 1414,824 \text{ kJ}$$

Para el caso del análisis de carga y resistencia mecánica en el pasador más grande del tercer rango (condición más crítica), se aproxima el valor del peso obtenido a 35 N, con el fin de realizar un análisis más conservador del sistema de posicionamiento y movimiento del pasador.

Propuesta de diseño y configuración de nueve pasadores en los primeros veinte minutos

Para el diseño del horno se planteó el uso de tres bobinas de cobre de 220 mm de longitud, colocadas en

una configuración especial para cada rango, cada una de las bobinas se dimensionó especialmente para cada tipo de pasador, esto anterior teniendo en cuenta el porcentaje de distancia entre el diámetro de la pieza y el diámetro exterior de la bobina. Las bobinas cubren por completo toda la geometría del pasador, por lo cuál, el calentamiento es uniforme hacia toda la pieza. Para explicar un poco mejor esto se realizó un diseño preliminar (ver **Figura XLIX**) de la configuración de las tres bobinas. El ciclo de trabajo de 60 minutos se dividió en tres configuraciones iguales, en la que cada una contiene nueve pasadores de distintos rangos de tamaño para ser tratados térmicamente cada 20 minutos, y a su vez estos completan los 27 pasadores requeridos por hora. La nueva restricción determina que el tratamiento térmico individual por pasador se debe realizar en 2,22 min o 133 s. Esto condiciona la potencia necesaria para producir el calentamiento por inducción, pues el calentamiento se debe hacer en corto tiempo.

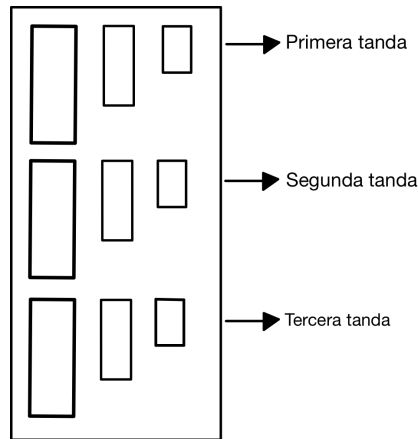


Figura XLIX. Configuración de los nueve pasadores/20 minutos en las tres bobinas configuradas

Sumatoria de calor generado por los nueve pasadores en un ciclo de tratamiento térmico de veinte minutos

(Ecuación 5)

$$\Sigma Q_{Total\ ciclo} = 3(QR1 + QR2 + QR3)$$

$$Q_{Total\ ciclo} = 3(324,65\ kJ + 577,15\ kJ + 1414,82\ kJ)$$

$$Q_{Total\ ciclo} = 6.949,86\ kJ$$

Calor generado por los 27 pasadores en un ciclo de tratamiento térmico de una hora

El resultado anterior se multiplicó por tres para poder cumplir con la configuración total de 27 pasadores tratados térmicamente en 60 minutos, y se obtuvo el siguiente valor

$$Q_{Total\ ciclo} = 6.949,86\ kJ * 3$$

$$Q_{Total\ ciclo} = 20.849,58\ kJ$$

Se multiplicó por 3 ya que esa configuración de 9 pasadores por 20 minutos se debe repetir 3 veces, es decir se triplica la carga térmica para poder completar un ciclo de una hora de trabajo.

Para retomar, durante los cálculos se consideraron los pasadores más grandes de cada rango, ya que producen la mayor carga térmica del producto. Diseñando con las cargas térmicas máximas, se atiende el caso más crítico al que puede enfrentarse el horno. Esto genera la cantidad máxima de calor que debe extraerse del sistema, permitiendo liberarlo y reiniciar el ciclo de tratamiento térmico.

Cálculo de la potencia requerida por el sistema de calentamiento

Para garantizar una eficiencia óptima del 90% en el ciclo térmico del horno de inducción, se realizó un cálculo detallado de la potencia requerida por el sistema de calentamiento. Cabe recordar que, debido a su conexión a la corriente eléctrica de la planta, la fuente de alimentación se encarga de suministrar la potencia necesaria al sistema de calentamiento. Este equipo es fundamental, ya que su capacidad determinará la extracción efectiva del calor generado durante el proceso y permitirá la adecuada refrigeración del agua utilizada para enfriar las piezas tras el temple. A partir de una búsqueda en la literatura sobre el diseño de hornos de inducción, se encontró que la eficiencia de estos ciclos térmicos suele oscilar entre 80% y 90%, lo que resalta la importancia de seleccionar un chiller con las especificaciones técnicas adecuadas. Este equipo debe ser capaz de manejar las cargas térmicas del sistema sin comprometer su rendimiento y garantizar un enfriamiento uniforme para evitar variaciones en las propiedades mecánicas de los pasadores. Por ello, es crucial analizar las opciones disponibles en el mercado y elegir una referencia técnica de chiller que cumpla con los requisitos de potencia, caudal de agua y estabilidad térmica, asegurando así la eficiencia del proceso y la calidad del tratamiento térmico aplicado. Como se explicó anteriormente por literatura, de acuerdo con la temperatura a la que se va a elevar el pasador, el tiempo que dura el ciclo de calentamiento es de 15 segundos (**Ver Figura XXXIV**), tomando como referencia el caso máximo del rango de tiempos para este material.

(Ecuación 6)

Donde P es igual a la Potencia que requiere el sistema para elevar la temperatura hasta 860 °C de nueve pasadores al mismo tiempo en un ciclo térmico de 20 minutos.

$$P = \frac{Q_{Total\ ciclo}}{\eta t}$$

$$P = \frac{6.949,86\ kJ}{0.90 * 15\ s}$$

$$P = 514,80\ kW$$

El valor calculado evidencia que, para que la bobina produzca el calentamiento requerido en un ciclo térmico de nueve pasadores en 20 minutos, necesita una potencia demasiado alta proveniente de la fuente de alimentación. Esto sería lo necesario para poder calentar los ocho pasadores al mismo tiempo. Esto incurriría en un gasto energético demasiado excesivo para la empresa, lo que incrementa los costos operativos. Por lo cual se realizó el cálculo del costo de la potencia requerida, y con base en ello, realizar ajustes en la cantidad de pasadores y justificar el establecimiento de cambios en las consideraciones de diseño.

Para determinar el costo total de la electricidad que genera el horno solo para ejecutar el ciclo de tratamiento térmico de 27 pasadores en una hora, en primer lugar se tiene que las instalaciones de Cadenpal se encuentran en una zona industrial de la ciudad de Palmira, las empresas de este tipo de zonas consumen demasiada energía para poder llevar a cabo sus procesos, por lo cual el costo del kWh para estas empresas es mucho más elevado que para una zona residencial. El costo del kWh es 924,37 COP. Con la siguiente fórmula se pudo calcular el costo de producir esa potencia energética requerida para poder cumplir con el ciclo de tratamiento térmico en una hora.

Para determinar el costo, primero se debe multiplicar por tres el valor de la potencia necesaria para elevar la temperatura de nueve pasadores hasta 860 °C en un ciclo térmico de 20 minutos. Este valor inicial fue de 514,80 kW (ver **Ecuación 6**), por lo que al triplicarlo se obtiene un total de 1544,4 kW. Este último valor corresponde a la potencia requerida por el sistema para tratar térmicamente 27 pasadores en una hora.

(Ecuación 7)

$$Costo = Consumo\ del\ horno * Precio\ del\ kWh$$

$$Costo = 1544,4\ kWh * 924,37\ COP/kWh$$

$$Costo = 1.427.597,03\ COP\ por\ hora\ de\ tratamiento\ térmico$$

Si se mantiene este valor, el costo total de una jornada de 8 horas sería 11' 420.776 COP, y al finalizar el mes, el costo final que genera el consumo energético del horno para el calentamiento total de 27 pasadores en una hora será de 342' 623.286 COP al final de un mes. A partir de esto, se puede descartar el primer diseño del horno y la configuración interna de los pasadores, ya que esta demanda energética generó un incremento significativo en los costos de la empresa. En este sentido, se encontró la necesidad de plantear un segundo diseño más eficiente en

términos energéticos, que no aumente demasiado los costos operativos del horno y que a su vez permita suministrar la suficiente potencia requerida para efectuar el calentamiento de las piezas.

A continuación, se presenta un rediseño en cuanto a la cantidad de pasadores. Es importante mencionar que la propuesta inicial de diseño se elaboró a partir de la consideración de criterios de ingeniería para poder cumplir con el flujo de pasadores producidos al mes y las horas trabajadas.

Justificación del planteamiento de un nuevo diseño y reorganización de cálculos

Los cálculos previos abordaron el diseño inicial propuesto para el horno de inducción y la configuración de las bobinas, lo que garantiza que el sistema pueda cubrir la demanda mensual de pasadores en Cadenpal. Sin embargo, en el mes de marzo se realizó una visita a la empresa, y, se sostuvo una reunión con el dueño, y se le hicieron varias preguntas acerca del proceso de tratamiento térmico que se realiza en la empresa de Medellín y la manera en cómo trabaja el equipo de inducción allá. A partir de la reunión surgieron varios puntos clave que contrastaron la propuesta inicial con la realidad del proceso de tratamiento térmico. Durante la conversación, se aclararon aspectos acerca del ciclo de trabajo del horno por pasadores, la cantidad de piezas por ciclo de calentamiento y el tamaño de las bobinas disponibles y su capacidad de operación. Un hallazgo importante fue que, a diferencia del diseño inicial que se estimó y propuso por parte del estudiante de ingeniería mecánica, que contemplaba el tratamiento de 27 pasadores por hora, la empresa que se encarga del tratamiento térmico en Medellín solo dispone de cinco bobinas para diferentes geometrías que posibilitan el tratamiento térmico de un pasador a la vez, es decir, se coloca solo una bobina en la fuente de alimentación, también se resaltó que ninguna bobina cubre por completo el pasador, es decir, el calentamiento no es uniforme a toda la longitud de la muestra, por lo cual es necesario definir una sección de longitud de calentamiento para hacer el análisis y los cálculos. El dueño explicó que calentar varios pasadores simultáneamente elevaría significativamente el consumo energético, aumentando los costos operativos de la planta. Debido a lo anterior, en Medellín solo se trata un pasador por ciclo, pero lo hacen de una manera muy rápida, por consiguiente, la empresa cumple con la cantidad estimada de pasadores que solicita Cadenpal. A partir de esta reunión, el diseño del sistema se ajustó con cálculos más alineados con la realidad operativa, considerando cargas térmicas y consumo de potencia, lo que permitió optimizar la eficiencia y viabilidad del horno.

La visita a la empresa también evidenció cambios importantes en la configuración inicial de las bobinas sumado a la revisión literaria de hornos de inducción. En la práctica del tratamiento térmico en Medellín, solo se utiliza una bobina fija para calentar un pasador a la vez, el cual se desplaza a través del mecanismo del horno, calentándose y enfriándose con agua de manera continua, en concordancia con la literatura para este tipo de geometrías [36], y con el diseño propuesto en este estudio. Asimismo, al repetir el análisis térmico inicial basado en el tratamiento de nueve pasadores por ciclo, se aplicó un criterio más riguroso, tomando como referencia el pasador de mayor volumen, masa y carga térmica. Los valores obtenidos en la **Ecuación 4 del tercer rango de pasadores** permitieron verificar la condición más exigente de operación del horno. Dado que este pasador es el más pesado, genera las mayores cargas térmicas. A partir de este nuevo valor, denominado como el calor que se genera en el pasador más grande del tercer rango, se calculó la potencia requerida para elevar su temperatura desde 25 °C hasta 860 °C.

Definición de la sección de pasador que se calienta a medida que se realiza el tratamiento térmico

En este apartado se definieron una serie de ajustes en términos de dimensiones acordes al calentamiento. Este reajuste se dio debido a que para este estudio se analizará el pasador más grande producido en la empresa frente a condiciones críticas, por lo tanto, las nuevas estimaciones se realizaron enfocadas netamente en ese pasador perteneciente al tercer rango de tamaños (ver página 72). En primer lugar, se especificó una sección de longitud y un diferencial de volumen propio del pasador, que se va calentando a medida que se realiza el tratamiento térmico, es decir, durante el proceso, no se hace un calentamiento uniforme a toda la longitud del pasador, sino que a medida que avanza la pieza a través de la bobina, este inductor va calentando una determinada porción de la longitud del pasador. De acuerdo con esto, se estima una longitud de 48 mm, es decir, se tomaría como un cilindro de esta altura, y se determinó el diámetro efectivo del pasador que va a recibir en mayor cantidad el calentamiento y T.T, este diámetro efectivo es de 44 mm (radio = 22 mm). A continuación, en la siguiente figura se presenta un gráfico con todas las dimensiones de la bobina que determinan el área de la sección de calentamiento definida para el pasador.

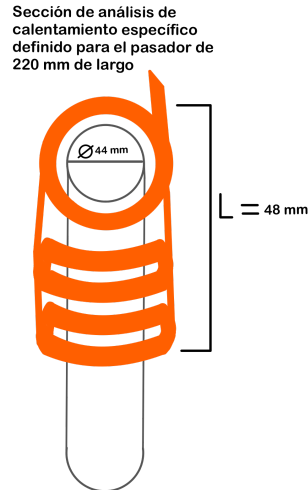


Figura L. Gráfico de las dimensiones de bobina que cubren un área de sección de calentamiento definida para el pasador

por lo cuál si se aplican las primeras ecuaciones de masa, volumen del cilindro y calor generado para esta nueva sección de cilindro, tenemos que:

$$V(SD) = \pi * r^2 * h$$

Donde SD: Sección definida

$$VR1 = \pi * (0,022 \text{ m})^2 * (0,048 \text{ m})$$

$$VR1 = 7,30 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$m = \rho * V$$

$$m = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 7,30 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$m = 0,5731 \text{ kg} \rightarrow$ Masa de esa sección de pasador que se está calentando

$$W = 0,5731 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W = 5,62 \text{ N}$$

$$Q(SD) = m * c * \Delta T$$

$$Q(SD) = 0,5731 \text{ kg} * 0,48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (860^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$Q(SD) = 229,70 \text{ kJ}$$

El valor calculado representa la cantidad de energía que se necesita para elevar la temperatura del pasador hasta 860°C. La longitud efectiva de calentamiento sería de 193 mm, este valor se hace al despreciar la longitud que contiene al orificio, la parte de chaflán del pasador, el ranurado y la chaveta. La pieza tiene principalmente 220 mm de longitud - 17 mm despreciables = 193 mm efectivos de calentamiento.

Nuevo cálculo de la potencia requerida por la fuente de alimentación para el proceso

Después de recalcular la carga térmica y la tasa de transferencia de calor en estado estacionario generada en el pasador luego de que la bobina induce un campo magnético sobre la pieza, se re ajusta y establece un ciclo calentamiento de 8,6 segundos [30], [32] para la sección definida (es un proceso sumamente rápido), este valor es mucho más acorde a la realidad de los procesos de inducción, y se obtuvo un nuevo cálculo de la potencia requerida por la fuente de alimentación. El actual valor de potencia energética asegura que el horno reciba la

energía necesaria para proveer de energía eléctrica a la bobina que rodea el pasador y permitir el tratamiento térmico por inducción. A su vez, el nuevo cálculo está mucho más cercano a la realidad, hay mayor precisión en el dato ya que se aterriza a una sola bobina. Se mantuvieron las mismas variables (tiempo y eficiencia del proceso) pertenecientes a la **Ecuación 6** y la misma fórmula, pero se reemplazó el calor total del ciclo de nueve pasadores por el correspondiente a la sección de calentamiento definida para el pasador de mayor tamaño fabricado en la empresa (**ver el cálculo anterior de potencia**), ya que esta es la condición más crítica de esfuerzo y carga térmica generada.

(Ecuación 6)

$$P = \frac{Q_{\text{pasador más grande}}}{\eta t}$$

$$P = \frac{229,70 \text{ kJ}}{0,90 * 8,6 \text{ s}}$$

$$P = 29,67 \text{ kW}$$

Una vez se obtuvo el valor de potencia que debe proveer la fuente de alimentación, se procedió a calcular la corriente eléctrica que debe fluir desde la fuente de alimentación hacia la bobina para generar el campo magnético y el calentamiento en el pasador por efecto Joule. En la siguiente ecuación se presenta el cálculo realizado para la obtención del valor de corriente en Amperios. Como se especificó anteriormente, la fuente de alimentación puede operar con un voltaje de aproximadamente 380 V (media frecuencia como se explicó atrás), este valor se reemplaza en la ecuación 8, junto con el valor de potencia obtenido previamente en la ecuación 6.

La relación entre potencia, voltaje y corriente se expresa mediante la siguiente ecuación (**ver Ecuación 8**) y al despejar esta fórmula se obtiene el valor de la corriente en amperios:

(Ecuación 8)

$$P = V * I$$

Dado que ya se conoce el valor de potencia y voltaje, se despejó la corriente:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{17.010 \text{ W}}{380 \text{ V}} = 44,76 \text{ A}$$

Este valor corresponde a la corriente eléctrica que la fuente de alimentación debe suministrar a la bobina para poder alcanzar el calentamiento deseado en la pieza, según las condiciones de tiempo y potencia requeridos por el sistema.

Cálculo del campo magnético para la inducción de corrientes de Foucault

Seguido de lo anterior, se procedió a la selección de la bobina de calentamiento en función de los valores de carga térmica del pasador y la potencia requeridos. Teniendo en cuenta los requerimientos energéticos, se realizaron los cálculos de inducción electromagnética a partir de la aplicación de la ley de Biot-Savart y de la Ley de Ampère para un conductor largo, recto y rectilíneo en campo magnético en el eje del conductor. Lo anterior conlleva a la selección de un diseño comercial de una bobina de cuatro espiras de tipo cilíndrica comercial hecha de cobre de alta conductividad eléctrica y permeabilidad magnética adecuada. En primer lugar, se realizó el cálculo del campo magnético que induce corrientes de Foucault sobre el pasador. En primer lugar se estableció que el campo magnético (B) se puede expresar según la siguiente ecuación $B = \frac{\mu_0 * I}{2\pi r}$, donde:

μ_0 : constante de permeabilidad del espacio libre (H/m), en este caso del aire

I: corriente eléctrica inducida (A)

r: distancia desde el conductor hasta el punto límite de campo magnético (m)

En primer lugar se calculó la distancia desde el conductor hasta el punto de interés del campo magnético, es decir, el valor de r, es importante aclarar que el punto de interés de formación de campo magnético es entre la bobina y el pasador. En vista de hacer un análisis más preciso, se tomó como referencia el extremo de la bobina pero en su diámetro interno, como se especificó en la **Figura XLVII**, la distancia entre el pasador y la bobina es de 3,5 mm por cada lado, por lo cual, el valor de r para este cálculo es 0,0035 m.

Una vez se obtuvieron todos los datos, se reemplazaron en la ecuación del campo magnético

$$B = \frac{(4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}) * 11,19 \text{ A}}{2 * \pi * 0,0035 \text{ m}}$$

$$B = 6,39 * 10^{-4} \text{ Teslas (unidad del campo magnético)}$$

Selección de la bobina inductora

A partir de las condiciones presentadas acerca de los tipos de bobinas y la geometría más adecuada que se utilizan en sistemas de calentamiento por inducción, así como también los cálculos realizados, materiales adecuados, costo, resistencia, potencia, conductividad eléctrica y campo magnético que requiere producir la bobina se establecieron unos criterios de selección del mercado. Como en el contexto de este proyecto no se requiere diseñar como tal la bobina, ni determinar dimensiones exactas, sino realizar un análisis técnico detallado acerca de los requerimientos de Cadenpal para el calentamiento de los pasadores y la demanda energética que requiere la planta para poder efectuar este proceso, con base en esto se buscó en referencias comerciales del mercado, una alternativa de bobina para que pueda cumplir con el alcance del tratamiento térmico definido y las propiedades mecánicas, en paralelo, a que también pueda suplir la demanda estimada de pasadores producidos en la planta.

Luego de una extensa búsqueda en fuentes comerciales como mercado libre, aliexpress, fabricantes chinos de fuentes de alimentación y catálogos de equipos eléctricos y de inducción de Estados Unidos. La marca del fabricante o diseñador de la bobina, no se tiene con precisión, ya que se encontró en un catálogo técnico en aliexpress, que actúa como intermediario y comercializa la bobina en Colombia. A continuación, en la siguiente tabla se muestran las especificaciones técnicas de la bobina seleccionada. Cabe resaltar que esta bobina seleccionada presenta unas medidas muy similares a las que se estimaron en la sección de justificación de la selección del tipo de bobina en la página 70.

Tabla XL. Especificaciones técnicas de la bobina seleccionada

Características	Descripción
Tipo de tubo	ZVS-tubo de cobre refrigerado por agua
Aplicación	Horno de media - alta frecuencia
Frecuencia	30 - 100 kHz
Potencia	25 - 30 kW
Número de vueltas	8
Diámetro Exterior	64 mm
Diámetro Interior	58 mm
Grosor del alambre de tubo de cobre	6 mm
Altura de la bobina	48 mm
Tipo de calentamiento	Sin cinta
Tipo de bobina	Cilíndrica - Helicoidal
Precio	\$27.300

La **Figura LI** presenta la bobina que se seleccionó del mercado para ser utilizada en el sistema de calentamiento por inducción.



Figura LI. Bobina de cobre seleccionada. Tomada de un catálogo de equipos de calentamiento en Aliexpress

Cálculo de la radiación térmica generada por el pasador hacia la bobina (Efectos en el sistema de calentamiento)

Durante el proceso de calentamiento del pasador, la pieza libera calor al entorno, generando un fenómeno de transferencia de calor por radiación. El pasador irradia calor hacia la bobina, que es el elemento más cercano a la pieza. Es importante resaltar en este punto que la bobina está diseñada para ser el emisor de campo magnético, no actúa como fuente de calentamiento. Como bien se mencionó en la sección de “Justificación de la geometría de bobina seleccionada” se planteó una separación de 3,5 mm a cada lado entre la bobina de calentamiento y el pasador. Dado que esta distancia es relativamente pequeña, es importante considerar la radiación térmica a la que la bobina está expuesta cuando el pasador alcanza los 860 °C, ya que esto podría dañar la bobina y otros componentes de los subsistemas. Es importante verificar el uso de aislamientos térmicos en caso de requerir alguno para la protección de los componentes. Por otro lado, se debe considerar que el análisis próximo a mostrar, es a partir de una sección del pasador, debido a que la bobina solo es irradiada por una cierta longitud de la muestra, la bobina no recibe al instante todo el calor total que emite la pieza.

A continuación, se presenta la **Ecuación 9**, que muestra la fórmula utilizada para calcular la radiación térmica emitida por el pasador hacia la bobina. Esta fórmula fue extraída del capítulo 12 del libro “Transferencia de calor y masa” de Yunus A. Cengel. [48].

(Ecuación 9)

$$Q_{rad} = \varepsilon * A_s * \sigma * (T_1^4 - T_2^4)$$

A continuación, en la **Tabla XLI** se especifican los datos para cada una de las variables

Tabla XLI. Datos necesarios para calcular la radiación emitida por el pasador

Variable	Descripción	Valor
Qrad	Calor transferido por radiación (W)	Se calcula a partir de la ecuación 11
ε	Emisividad térmica del material acero 4140	0.8 (obtenido por la literatura del material)
As	Área superficial del pasador (m ²)	Se calcula en la ecuación
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	5,67×10 ⁻⁸ W/m ² *K ⁴
T1	Temperatura del pasador en grados Kelvin	860°C = 1133,15K

T2	Temperatura de la bobina en grados Kelvin	40°C = 313,15K
----	---	----------------

Para poder obtener el calor de radiación que emite el pasador a la bobina, primero se calculó el área lateral del pasador que colinda con la bobina.

(Ecuación 10)

Para poder calcular esto, se utilizó la fórmula del área lateral de un cilindro

$$A_L = 2 * \pi * r * h$$

Se tiene que el diámetro del pasador más grande analizado es de 51 mm, su radio es 25,5 mm, y, según lo consignado en la **Tabla XLI** de las especificaciones técnicas de la bobina seleccionada, la altura de la bobina es de 48 mm, es decir, ese valor equivale a la porción de longitud del pasador que irradia calor a la bobina.

$$A_L = 2 * \pi * 0,0255 m * 0,048 m$$

$$A_L = 7,69 * 10^{-3} m^2$$

Una vez ya se tiene el valor del área superficial del pasador, se reemplazan todos los valores en la fórmula de radiación.

(Ecuación 11)

$$Q_{rad} = (0,8) * (7,69 * 10^{-3} m^2) * (5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}) * (1133,15^4 K - 313,15^4 K)$$

$$Q_{rad} = 571,753 W \approx 0,571 kW \rightarrow \text{Tasa de energía irradiada por unidad de tiempo}$$

Debido a la cantidad de calor irradiado por el pasador, es fundamental que la bobina tenga puntos de refrigeración durante el ciclo. En la industria se encuentran procesos que a medida que se calienta la pieza, se enfría la bobina. Para ello, se debe hacer circular agua por el interior de la bobina, lo que ayuda a refrigerar y protegerla del desgaste térmico prolongado. La ecuación de Stefan - Boltzmann da como resultado una potencia o cantidad de energía que se irradia por unidad de tiempo. En estos cálculos no se utilizó el factor de forma de energía entre las superficies, debido a que este factor se utiliza más cuando las superficies no están orientadas de manera ideal o cuando la geometría es compleja (ángulos, obstáculos, puntas o aletas, etc).

Selección de la fuente de alimentación para la bobina

Para seleccionar la bobina adecuada junto con su fuente de alimentación y potencia se consultó a WG Technology, una empresa colombiana ubicada en Bogotá especializada en la comercialización y fabricación de hornos de inducción, eléctricos, de fundición y en algunas ocasiones fabrica bobinas de calentamiento. Se organizó una reunión con el ingeniero responsable del área de equipos y manufactura, quien proporcionó información sobre los parámetros que la empresa utiliza para la fabricación de estos dispositivos y las condiciones de selección de componentes en caso de requerir. En la **Figura LII** se presenta un horno de inducción de la marca china Jin Lay, la referencia del equipo es JL-30 comercializado por la compañía mencionada. Al lado derecho de la imagen se muestra la fuente de alimentación y al lado izquierdo se presenta el equipo de inducción que soporta a la bobina.



Figura LII. Fuente de alimentación seleccionada del mercado según parámetros calculados. [29]

A continuación, en la **Tabla XLII** se muestran las especificaciones técnicas de la bobina y la fuente de alimentación de ella.

Tabla XLII. Especificaciones técnicas de la bobina y del equipo de alimentación

Especificaciones	Detalles
Temperatura máxima	1.300°C
Potencia	30 kW
Dimensiones (mm)	550 x 240 x 480
Capacidad	1-5 kg
Peso	35 kg
Ciclo de trabajo al 100%	Fuente en 40 °C
Precio	\$12.759.000 COP
Materiales ideales para calentar	- Aceros -Oro -Plata -Aluminio -Titanio -Cobre
Rango de operación de voltaje	380 V 50 - 60 Hz
Tipo de conexión eléctrica	Trifásica
Frecuencia de oscilación	30 - 100 kHz

La fuente de alimentación es un equipo de 550 mm de alto, 240 mm de ancho y 480 mm de profundidad, se puede considerar un equipo ligero y compacto que se puede movilizar y conectar en varias partes de la planta si así se dispusiera, no es un sistema que se encuentre precisamente ligado a un punto de conexión determinado, simplemente puede ser transportado y movido en varias etapas. Los requerimientos anteriores se cumplen con el uso de los equipos de la marca china seleccionada Jin Lay.

Materiales y aislamientos térmicos del equipo de inducción seleccionado

El equipo seleccionado está fabricado en diversos materiales metálicos, poliméricos y cerámicos. Entre las propiedades de los materiales con los que generalmente estos equipos de inducción están contruidos se encuentran la resistencia térmica, dureza, tenacidad, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, propiedades magnéticas. La estructura o carcasa exterior está compuesta de láminas de aluminio cubiertas con pintura electrostática (recubrimiento que protege contra la corrosión). La carcasa interna del equipo también está compuesta por las mismas láminas de aluminio y en algunos casos de acero estructural, debido a que soportan altas temperaturas y protegen contra el calor intenso generado por cada uno de los componentes electrónicos de la tarjeta PCB y los cables eléctricos por donde fluye la corriente. La corriente disipa la energía en calor hacia las otras piezas internas del equipo, por lo cuál, los cables pueden llegar a obtener una elevada temperatura, y más en

sistemas de inducción que se trabaja a temperaturas muy altas. Cabe mencionar que los componentes electrónicos del sistema se encuentran en un panel rectangular ubicado más arriba de donde se encuentra el generador de energía eléctrica que conecta la bobina con la red eléctrica de la planta, para evitar un cortocircuito en el sistema. Las paredes de este panel interno se encuentran aisladas térmicamente del generador por una manta térmica de espuma de poliuretano, este actúa más como aislante, no como refractario, puesto que el equipo seleccionado no está fabricado con materiales refractarios de ninguna clase. Las condiciones de seguridad térmica ofrecidas por el equipo facilitaron la selección de la alternativa presentada por parte del área de Ingeniería Mecánica.

Recubrimientos para los materiales que conforman la carcasa del equipo de inducción seleccionado

Es importante precisar esta sección, ya que si se van a caracterizar los materiales que conforman la carcasa principal del equipo de inducción utilizado en el proceso de calentamiento de los pasadores de Cadenpal, es fundamental especificar las técnicas de recubrimiento aplicadas a estos materiales, además, estas técnicas usadas buscan maximizar la vida útil de los materiales y equipos del sistema de calentamiento y más adelante el de enfriamiento, con esta información, la gerencia de Cadenpal puede establecer planes de mantenimiento preventivo y correctivo a largo plazo (tal como se determinó en los requerimientos del cliente), lo que conduce a una reducción de costos significativa. Esto permitirá destacar el comportamiento de los materiales según las funciones que desempeñan dentro de la estructura del equipo y cómo las cargas a las que están sometidos pueden provocar desgaste mecánico y erosionar las superficies o capas del material expuesto. Por ello, estos materiales cuentan con recubrimientos específicos que protegen las piezas contra la corrosión, el desgaste mecánico y el deterioro térmico. Caracterizar los aislamientos térmicos del equipo de inducción es fundamental ya que reciben cantidad de carga térmica en su estructura. Por eso esta sección detalla qué incidencia tiene la parte térmica del equipo de inducción en todo el sistema del horno.

Para comprender mejor acerca del proceso de pintura electrostática, este consiste en bañar una pieza o lámina de metal, especialmente de materiales como aluminio, acero, cobre o titanio, con partículas de pintura cargadas eléctricamente mediante un electrodo, lo que permite que las partículas se adhieran uniformemente a la superficie mediante la atracción electrostática. Este método se usa para lograr un buen acabado superficial que permita proteger la pieza contra la corrosión y los impactos. La pintura electrostática se clasifica principalmente en dos tipos: la de polvo y la líquida electrostática, siendo la primera la más común por su impacto ambiental reducido y eficiencia en la aplicación. Los materiales de pintura que se utilizan para ambos tipos incluyen resinas, pigmentos, agentes antióxido y solventes.

En relación a los equipos de inducción, como se mencionó anteriormente, estos tienen una carcasa compuesta de láminas de aluminio o en algunos casos de acero que son recubiertas con pintura electrostática. El equipo seleccionado para este proyecto contiene láminas de aluminio. Por esto se determinó que este proceso de recubrimiento superficial tiene una gran importancia en la caracterización de los materiales que componen el equipo de inducción y su impacto en el comportamiento térmico del dispositivo, ya que actúan como aislantes y refractarios. De acuerdo a las especificaciones técnicas del equipo de inducción, la pintura con la que se recubren las láminas de aluminio de la carcasa es a base de etil silicato de aluminio, este tipo de pintura se utiliza en aplicaciones y equipos que operan a altas temperaturas, como hornos, chimeneas o calderas.

A continuación, en la **Tabla XLIII** se presentan los valores numéricos de las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales mencionados anteriormente que conforman las piezas del equipo de calentamiento. En esta tabla se muestra en mayor detalle la implicación de cada material en el equipo, los valores de sus propiedades que determinan su escogencia para la fabricación del equipo de inducción y el uso de aislamientos térmicos y, si es el caso, materiales refractarios.

Tabla XLIII. Valores de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales que componen cada pieza del equipo de alimentación y bobina (Sistema de Calentamiento)

Componentes	Materiales	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Conductividad térmica (W/m·K)	Resistencia a altas temperaturas	Dureza
Estructura externa	Láminas de aluminio	70	125	11 Aleaciones (400)	160 a 205	Hasta 250 °C	15 HB
Pintura electrostática	Etil silicato de aluminio	No se considera, es una pintura	No se considera, es una pintura	No se considera, es una pintura	1	800 a 1000 °C	-
Carcasa interna (parte de aluminio y parte de	Manta térmica de espuma de poliuretano (aislante)	Varía según el espesor y área de la pieza	Varía según el espesor y área de la pieza	Varía según el espesor y área de la pieza	0,03	Hasta 1200 °C	-

poliuretano)							
Bobina de inducción	Cobre	110	210	70 - 120	401 Conductividad eléctrica del cobre: 58 MS/m	Hasta 1085 °C	35 HB
Aislamientos de los cables	Polietileno de baja densidad	1.08	30	No tiene definida porque es un polímero termoplástico	0.34	Hasta 290 °C	Resistencia eléctrica: 10 Ω; Tensión de operación: 12V a 24V
Tarjeta PCB	Fibra de vidrio con recubrimientos en estaño	54	1300	550	0.040	Hasta a 1648 °C	-
Generador eléctrico (Estator y rotor)	Acero al silicio de grado M19 con imanes de neodimio	200	400	350	15	150 °C	210 HB

Toda la información sobre los materiales y sus propiedades fue obtenida de Matweb, un sitio web dedicado a proporcionar datos sobre diversos materiales metálicos, poliméricos y cerámicos.

Sistema de enfriamiento para la bobina en particular

Después de seleccionar el equipo del sistema de calentamiento, se determinó la necesidad de enfriar la bobina debido a los efectos del calentamiento en ella, por lo cual, a través de una serie de tuberías dispuestas en el equipo de inducción, se da un flujo de agua proveniente de un pequeño sistema de enfriamiento propio para el equipo de inducción. Este sistema humedece la bobina con un caudal muy pequeño, prácticamente despreciable en algún tipo de cálculo para este estudio. El enfriamiento es necesario porque la bobina puede recibir calor por radiación procedente de la pieza cuando ésta alcanza una temperatura de 860 °C, por consiguiente, se debe garantizar una extracción de esa fracción de calor irradiada hacia la bobina, para mantener una temperatura estable en el inductor. Es importante recordar que, debido a la inducción electromagnética, el elemento que se calienta es el pasador, no la bobina en sí. Sin embargo, la corriente inducida en la bobina, proveniente del generador eléctrico, puede elevar la temperatura de las puntas de la bobina que van ancladas al panel de la fuente. A su vez, el equipo de inducción seleccionado del mercado trae incorporado el sistema hidráulico.

A continuación, en la **Figura LIII**, se presenta el equipo del sistema de refrigeración de tipo circuito cerrado, ya que el refrigerante se encuentra aislado.



Figura LIII. Sistema de refrigeración de tipo circuito cerrado de la marca Himmelwerk [42]

Mediante una serie de tuberías que atraviesan el equipo de inducción que soporta la bobina, se transporta el caudal de agua de enfriamiento para el inductor, por lo cuál, este dispositivo se encuentra en la parte trasera del equipo de inducción, con el objetivo de evitar que entre en contacto con el generador eléctrico y se pueda ocasionar un riesgo eléctrico debido a la cercanía entre los circuitos y el agua. La bobina está recubierta con un caucho blanco hecho a base de polietileno con resina epóxica, lo que actúa como aislante eléctrico que evita que el agua al entrar en contacto con la bobina produzca un arco eléctrico o una descarga. También, se puede destacar que la bobina y demás componentes eléctricos tienen un sistema de puesta a tierra y regulación de cargas mediante dispositivos de seguridad, como un fusible, un pequeño transformador de corriente y un interruptor diferencial, para evitar un riesgo eléctrico en caso de que ocurra alguna anomalía en la corriente y el

voltaje.

Por otro lado, el sistema tiene dos tuberías de polietileno unidas a cuatro pernos atornillados al chasis exterior del equipo de inducción, y su vez, el sistema de enfriamiento se controla a través de un pequeño panel de control con botones físicos dispuestos en la vista frontal superior del equipo de inducción.

A su vez, las tuberías se conectan con un sistema de refrigeración cerrado que almacena el agua, este sistema refrigera el convertidor, el circuito externo y la bobina inductora. Este sistema también mantiene la calidad del agua refrigerante. La **Figura LIV** presenta una vista trasera del equipo de inducción donde se visualiza la posición de los tubos de enfriamiento del sistema.

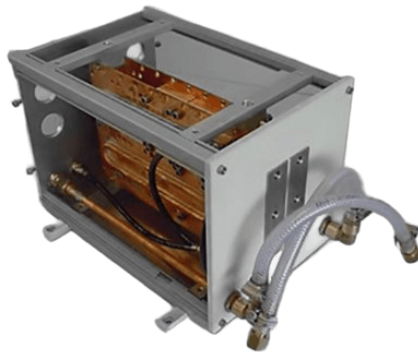


Figura LIV. Tubos de enfriamiento de la fuente de alimentación marca Himmelwerk [42]

Configuración de la conexión entre los dispositivos que conforman el equipo de inducción

Por consiguiente, se estableció una configuración o esquema que permite la interconexión adecuada de la fuente de alimentación. En particular, se buscó garantizar una transferencia de calor adecuada desde la bobina del horno de inducción hacia el chiller, que se encargará de controlar la temperatura del material tratado. En la **Figura LV**, se presenta un esquema de conexión física entre los distintos equipos que representan el sistema de calentamiento en conjunto, este esquema ilustra la distribución de las líneas de transmisión, las conexiones eléctricas y de control del proceso de tratamiento térmico por inducción y temple.

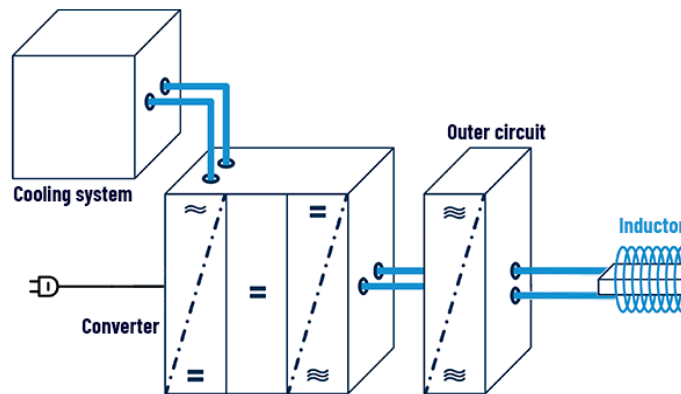


Figura LV. Esquema de interconexión entre los dispositivos que conforman el equipo de inducción [42]

Según el anterior esquema de conexión, se tiene un convertidor eléctrico que transforma la corriente eléctrica directa en alterna o viceversa, esto lo hace en forma de voltaje o frecuencia, con el fin de poder adaptar la energía eléctrica a las necesidades de la fuente de alimentación. Esta configuración o esquema de interconexión proviene del fabricante, y, como se mencionó anteriormente, los equipos están protegidos internamente contra el origen de arcos eléctricos o fallas en caso de que los componentes entren en contacto con el agua. Se ve que las tuberías provenientes del sistema de enfriamiento atraviesan el convertidor, sin embargo, las tuberías no entran en contacto con los componentes del convertidor, internamente se encuentran aisladas.

Instalación del sistema de calentamiento

Una vez seleccionado el sistema de calentamiento, se planteó el escenario hipotético en el que Cadenpal adquiere e instala el equipo en la planta. A diferencia de la instalación del sistema de control, que requirió planificación, modelado, diseño, selección, montaje y pruebas, la instalación del sistema de calentamiento consiste

únicamente en realizar la conexión, el arranque seguro y la puesta en funcionamiento de la fuente de alimentación. Este proceso es más sencillo, lo que conlleva a costos de instalación más bajos que el sistema de control.

En primer lugar, se realizaron tres consultas vía telefónica a la empresa WG Technology acerca de las distintas consideraciones que como empresa tienen a la hora de realizar la instalación de un equipo de inducción en una determinada planta, esto con el fin obtener una contextualización más clara acerca de la instalación del equipo.

Debido a que este es un escenario hipotético, WG Technology no contó con medidas precisas de la planta, valores o costos, pero, al comentarle la idea y las especificaciones del proyecto, la empresa compartió sus consideraciones basadas en su experiencia en proyectos similares y proporcionó unas estimaciones al respecto.

Su ingeniero de procesos indicó que para llevar a cabo una correcta instalación es necesario conocer la potencia y corriente nominal requerida por el sistema (**ver resultados de las Ecuaciones 6 y 8 en la sección de resultados del sistema de calentamiento**), luego, se debe analizar el tipo de instalación eléctrica y sus fases, ya sea monofásica, bifásica o trifásica, según el equipo seleccionado. De acuerdo con las especificaciones técnicas del equipo seleccionado, la conexión es trifásica, es decir, la corriente fluye en tres direcciones distintas de cableado, cabe recordar que la fuente de alimentación seleccionada es de 25 kW (se considera de alta potencia). La empresa también determinó que a partir de la corriente se puede dimensionar la cantidad de conexiones eléctricas y el tamaño de los cables requeridos, la empresa recomendó utilizar cables de referencia #8 AWG.

Los cables #8 AWG son cables eléctricos de tamaño medio, utilizados comúnmente en instalaciones residenciales e industriales para transportar corrientes de hasta 40-55 amperios, dependiendo del tipo de aislamiento y condiciones de uso. Son adecuados para conexiones de carga moderada y aplicaciones donde se requiere una buena conductividad eléctrica, como lo es el caso del proyecto de los pasadores

En la siguiente figura se muestra una ilustración de un carrete comercial que contiene casi 9 metros de cable #8 de tipo AWG, este es el tipo de cable que se debe adquirir para la instalación de las conexiones de la fuente de alimentación.



Figura LVI. Carrete de cable #8 tipo AWG. Tomada de catálogo de Homecenter

Como se estableció que el equipo requiere una conexión trifásica, se procedió a la búsqueda y selección comercial de un tablero eléctrico con estas especificaciones. En la **Figura LVII** se presenta el tablero elegido que tiene un costo de 338.400 COP, y su valor se encontró en el catálogo técnico en la página de Edelco.



Figura LVII. Tablero eléctrico trifásico a utilizar. Tomado de catálogo de Homecenter

En la **Tabla XLIV** se detallan las especificaciones técnicas y los costos asociados a los componentes necesarios para la adquisición y posterior montaje eléctrico de la fuente de alimentación, facilitando así una visión integral del equipamiento requerido.

Tabla XLIV. Costos de los equipos asociados al montaje eléctrico del horno

Equipo	Precio
Tablero eléctrico trifásico marca Legrand	\$338.400 COP
Carrete de Cable Aislado N° 8 AWG Cobre Color Negro	\$6.600 COP

A partir de los resultados, el costo total de los equipos de conexión asciende a 345.000 COP. A esto se suman los viáticos de los técnicos encargados de la instalación, quienes viajan desde Cali. La cotización para el servicio de instalación, incluye el transporte, alojamiento, revisión de conexiones eléctricas de la planta, gestión de compra de los equipos, pruebas

Según la empresa consultada, las tareas de instalación tomarían aproximadamente 26 días en total. En la **Tabla XLV** se muestran las distribuciones de tareas y la cantidad de días para ser ejecutadas.

Tabla XLV. Tareas de instalación del sistema de calentamiento y días de ejecución

Actividad	Días
Levantamiento de planos eléctricos y medidas de la planta	1
Determinación de corriente y potencia requeridas	1
Diseño de bobina y selección de la fuente de alimentación	1
Adquisición de los equipos y envío a Colombia	17
Transporte de la fuente de alimentación hasta la planta	2
Revisión de conexiones y montaje final	1
Arranque seguro y pruebas	1
Entrega de documentación al cliente	2
Total de días	26

Una vez establecidas todas las funciones y tiempos de ejecución de ellas, se entregó la cotización del servicio por parte de WG Technology, la cuál arrojó un costo de 4.500.000 COP, considerando la participación de tres técnicos especializados para la instalación. Este monto cubre la revisión, certificación y aseguramiento del correcto funcionamiento del sistema de inducción de 25 kW.

Finalmente, el costo neto de todo el sistema de calentamiento que abarca su diseño, selección de componentes, adquisición, ensamblaje e instalación, asciende a 17.631.300 COP.

3. Sistema de Enfriamiento acelerado del pasador

El siguiente sistema que se seleccionó para el diseño del horno fue el de enfriamiento, este sistema es fundamental para el funcionamiento del horno debido a que se encarga de reducir drásticamente la temperatura del pasador después del calentamiento, lo que permite llevar a cabo el proceso de tratamiento térmico de temple. En los requerimientos del cliente se especificó la implementación y uso de un chiller en el diseño del horno, el cliente aseguró que por temas de costos y operatividad energética, la mejor opción para el sistema de enfriamiento es un chiller, ya esta parte se había calculado previamente por parte del área de ingeniería industrial.

Para contextualizar acerca del dispositivo que se seleccionó a partir de la cantidad de calor por extraer, se

establece que un chiller, también conocido como sistema de enfriamiento industrial, es un dispositivo utilizado para remover calor de una pieza, líquido o espacio mediante un ciclo de refrigeración. En el contexto de hornos de inducción, un chiller se utiliza para enfriar el agua que cae sobre los pasadores, por lo cuál el agua experimenta una transferencia de energía y cambio de temperatura al tener contacto con los pasadores en extrema fase de calentamiento, por ende, el agua eleva su temperatura y es necesario enfriar de nuevo el fluido para que pueda ser reutilizado en un nuevo ciclo de tratamiento térmico.

Los chillers son esenciales para mantener la eficiencia y la seguridad de equipos industriales, evitando el sobrecalentamiento y garantizando un funcionamiento óptimo. Existen diferentes tipos de chillers, que incluyen modelos de compresión de vapor, absorción y termoeléctricos, cada uno con aplicaciones específicas según las necesidades del proceso. En este proyecto se va a seleccionar en el mercado un tipo de chiller que cumpla con las características de caudal, presión, columna de agua, potencia del intercambiador de calor en función del cambio de temperatura y la cantidad de transferencia de calor entre el agua y los pasadores.

En primer lugar, antes de la selección del sistema, se establecieron unos parámetros para el cálculo del flujo másico de agua que se requiere para poder extraer el calor de la pieza, estos cálculos se encuentran en la sección de **resultados de cálculos de extracción de calor**. En primer lugar se especificó la masa de la pieza, que ya se calculó anteriormente. Seguido de lo anterior, se dimensionó un anillo de enfriamiento homogéneo que recubre los 360° del pasador, junto con sus orificios internos por donde debe fluir el caudal de agua para la extracción de calor del pasador, el tamaño de cada uno de los orificios determina el área efectiva de circulación del agua de enfriamiento.

Se determinó la cantidad de calor generado que el sistema debe remover del pasador cuando se eleva su temperatura a 860 °C, una vez se tenga este valor, se determinó el cambio de temperatura del agua una vez entra en contacto con el pasador. Para esto, se calculó la temperatura final del agua después de la transferencia de energía del pasador al fluido, esto se hizo desde un análisis de convección forzada. El objetivo del cálculo de la temperatura final del agua permite tener una claridad acerca de la cantidad de calor que se removió del pasador, a partir de este parámetro se buscó la referencia comercial del chiller y se seleccionó el equipo de enfriamiento. La cantidad de calor a remover determinó la potencia requerida por la bomba del chiller, a partir de esto se pudo determinar la capacidad de la bomba para poder elevar la presión del fluido y el caudal de agua que la bomba puede producir.

Cálculo de la cantidad de calor a remover para la sección definida anteriormente en el pasador más grande producido (tercer rango)

Por otra parte, también se calculó la cantidad de calor que se necesita remover durante los primeros 2 - 3 segundos para alcanzar el objetivo del tratamiento térmico definido y evitar la caída en regiones ferríticas, bainíticas y perlíticas que puedan incurrir en pérdida de dureza y tenacidad para la pieza. Este análisis también se aplicó para la sección de pasador definida anteriormente.

$$QR3 = m * c * \Delta T$$

$$QR3 = 0,5731 \text{ kg} * 0,48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (860^\circ\text{C} - 270^\circ\text{C})$$

$$QR3 = 162,301 \text{ kJ}$$

El valor que se obtuvo representa la cantidad de calor que se debe remover en ese corto lapso de tiempo para disminuir la temperatura de la pieza de 860 a 270 °C (región y temperatura acorde según el diagrama TTT del material).

Cálculo de la cantidad de calor que se debe remover del pasador durante el proceso de temple

Para realizar este cálculo se utilizó la temperatura intermedia de enfriamiento de 80°C, establecida a partir de la literatura. Esto corresponde a la temperatura a la que se desea reducir el pasador durante el tratamiento térmico de temple, como se muestra en el diagrama de la **Figura XXXIV**. Con base en esto, más adelante se determinó la cantidad de calor que el agua de enfriamiento del chiller debe extraer para alcanzar el objetivo del tratamiento térmico definido. Para esto, se aplica la misma ecuación 4 de calor generado o perdido en una pieza y se toma la masa de la sección definida atrás.

(Ecuación 12)

$$Q_{a\text{remover}} = m * c * \Delta T$$

$$Q_{a\text{remover}} = 0,5731 \text{ kg} * 0,48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (80^\circ\text{C} - 860^\circ\text{C})$$

$$Q_{a\text{remover}} = 0,5731 \text{ kg} * 0,48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (-780^\circ\text{C})$$

$Q_{a\text{remover}} = -214,57 \text{ kJ} \rightarrow$ Cantidad de energía térmica a extraer por parte del chiller según el objetivo del T.T, calor total de la sección definida para el pasador

El signo negativo en la diferencia de temperaturas indica que el calor se está removiendo del pasador, es decir, es un proceso de enfriamiento. La diferencia en los signos no afecta la cantidad total de energía necesaria, sino que indica la dirección del proceso térmico, en este caso, reducción de temperatura de la pieza.

Anillo de enfriamiento

Para la extracción de calor de la pieza, se utiliza un anillo de enfriamiento, esta es una pieza clave para el sistema debido a que permite el flujo de agua de enfriamiento hacia el pasador a través de unos orificios dispuestos alrededor de su circunferencia exterior tal cómo se muestra en la siguiente figura. En el diámetro externo del anillo se ubican varias perforaciones que cumplen principalmente dos funciones, la primera es que en 3 orificios se conectan una serie de tuberías provenientes de un equipo de enfriamiento de agua y otros 2 orificios que permiten la unión entre el anillo y sus dos ejes de soporte atornillados a una pared estructural. Se buscó en varias referencias comerciales del mercado un anillo de enfriamiento que pueda cumplir con las características del enfriamiento deseado y poder alcanzar el objetivo del tratamiento térmico definido. El anillo seleccionado pertenece a la empresa Endumetales, y no tiene un nombre técnico comercial, solo simplemente se maneja un estándar de diseño del anillo en función de las condiciones de enfriamiento del proceso a tratar.

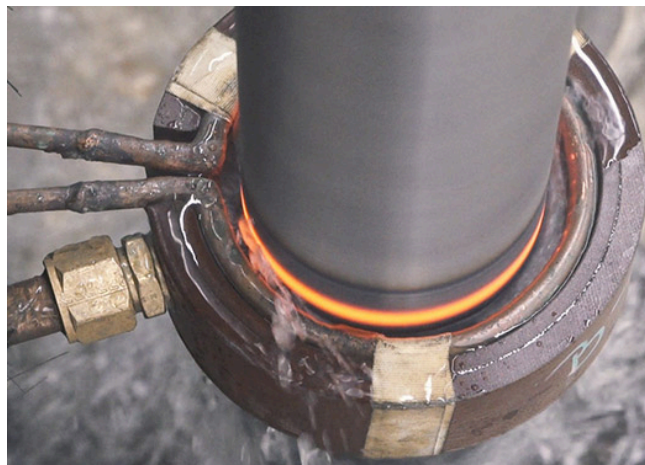


Figura LVIII. Anillo de enfriamiento seleccionado del mercado [46].

Tabla XLVI. Especificaciones técnicas del anillo de enfriamiento seleccionado

Características	Dimensiones (mm)
Diámetro externo	130
Diámetro interno	115
Cantidad de orificios internos de enfriamiento	40
Diámetro de los orificios	6
Altura	20
Cantidad de orificios externos acoplados a los ejes de soporte	2
Diámetro de los orificios externos acoplados a los ejes	5

Se procedió a calcular la cantidad de flujo másico de agua de enfriamiento que el chiller debe suministrar en ese rango de tiempo (máximo 3 segundos). A continuación se muestran los cálculos realizados para este apartado.

(Ecuación 13)

$$Q = m * c_p * \Delta T$$

Donde:

Q = Calor que se debe remover (en kJ)

m = flujo másico (en kg/s)

Cp = Capacidad calorífica del agua a presión constante

ΔT = Cambio de temperatura (en °C)

De acuerdo con lo anterior, a partir de investigaciones en catálogos, se estimó un valor de temperatura inicial del agua cuando sale del chiller para enfriar la pieza puede alcanzar los 10 °C. Nota adicional: Se sabe que el símbolo real del flujo másico es m y un punto arriba, solo que en este caso, no se pudo colocar el punto arriba por configuración del documento de drive.

Para el desarrollo de la ecuación 15, ya se tiene el valor de Q, lo mismo la capacidad calorífica del agua, la temperatura final (80 °C) a la que el agua debe llegar para remover toda esa cantidad de calor en una porción o diferencial de longitud de la pieza, también se consideró la temperatura inicial y el tiempo en el que se debe realizar el proceso.

Ecuación de transferencia de calor en función del flujo másico

(Ecuación 14)

$$Q = \frac{m}{t} * C_p * (\Delta T)$$

$$214,57 \text{ kJ} = \frac{m}{t} * (4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}) * (90^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$$

$$214,57 \text{ kJ} = \frac{m}{t} * (4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}) * (80^\circ\text{C})$$

$$214,57 \text{ kJ} = \frac{m}{t} * (334,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$\frac{214,57 \text{ kJ}}{334,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \frac{m}{t}$$

$$\frac{m}{t} = \frac{0,641 \text{ kg}}{1 \text{ s}}$$

$$\frac{m}{t} = 0,641 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \rightarrow \text{Caudal másico necesario para enfriar la sección definida de calentamiento del pasador por segundo (en un ciclo de 8,6 segundos)}$$

Cálculo del caudal volumétrico de agua

Es necesario obtener el valor del caudal (Q) debido a que determina el flujo de volumen de agua por unidad de tiempo del ciclo de enfriamiento, por lo cuál, para poder calcular el caudal, en primer lugar se calculó el área de un solo orificio del anillo de enfriamiento, se recuerda que tiene un radio de 3 mm, por lo tanto, el valor de área obtenido es de 28,27 mm², y son 40 orificios en total, por lo cuál el área total efectiva de salida o expulsión de los chorros de agua alrededor del anillo es 1130,8 mm².

Para encontrar el caudal volumétrico, en primer lugar se realizó el siguiente cálculo:

(Ecuación 15)

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = \frac{0,641 \text{ kg/s}}{1000 \text{ kg/m}^3}$$

$$V = 6,41 * 10^{-4} \text{ m}^3 \rightarrow \text{Volúmen}$$

Al hacer la conversión a caudal volumétrico se tiene que:

$$Q = 6,41 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \rightarrow \text{Caudal Volumétrico}$$

Al hacer la conversión de unidades a L/s se tiene que el caudal volumétrico es igual a:

$$Q = 0,641 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

El caudal por cada uno de los 40 orificios expresado en cada una de las dos unidades es:

$$Q = 0,0160 \frac{\text{L}}{\text{s}} / 40 \text{ orificios} \rightarrow 1,6025 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \rightarrow \text{Por cada orificio}$$

Lo anterior corresponde a la cantidad de litros de agua que se deben expulsar por cada uno de los orificios del anillo de enfriamiento a medida que avanza la muestra en esa sección de longitud de calentamiento definida.

Y, al convertir L/s a L/min se tiene que:

$$Q = 0,641 \frac{\text{L}}{\text{s}} * 60 = 38,46 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

A partir de la sección de definición del tratamiento térmico deseado para la pieza, se estableció que el tiempo de enfriamiento principalmente debe ser 3 segundos para evitar la caída en regiones martensíticas y poder cumplir con el objetivo del T.T en la pieza, los primeros 3 segundos del proceso de enfriamiento son cruciales ya que también determinan la velocidad necesaria por el sistema mecánico para poder mover el pasador y que se cumpla con lo definido en el T.T y en la producción estimada de la empresa.

Para hallar el valor de la distancia x de la salida del orificio hasta la superficie del pasador, en primer lugar se tomó como referencia el diámetro interno del anillo de enfriamiento, este diámetro es de 115 mm y se tomó el diámetro efectivo utilizado anteriormente, su valor es de 44 mm, pero se le suman los 5 mm de profundidad que debe alcanzar el tratamiento térmico en la pieza. Por ende, al restar 115 - 49 se obtiene 66 mm, esta es la distancia o posición que debe recorrer el flujo de agua inmediatamente sea expulsado por un orificio del chorro hasta llegar a la pieza y tener una profundidad de enfriamiento de 5 mm, recordemos que el objetivo del enfriamiento no es llegar hasta el núcleo del pasador. Estos datos son cruciales para determinar la velocidad del chorro en un oficio determinado para ese tramo de tiempo.

Teniendo el dato del área y caudal necesario para el enfriamiento de la pieza, se calculó la velocidad necesaria por cada uno de los orificios del anillo para poder cumplir con estas dos variables. Para esto, se aplicó la siguiente ecuación de mecánica de fluidos:

(Ecuación 16)

$$Q = v * A$$

$$\frac{Q}{A} = v$$

El área de un orificio de 6 mm de diámetro es:

$$A = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A = \pi * (0,003)^2$$

$$A = 2,8274 * 10^{-5} m^2$$

Se retoma la ecuación de velocidad, se reemplazaron los valores y se hizo el cálculo

$$v = \frac{1,6025 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{2,8274 * 10^{-5} m^2}$$

$$v = 0,566 \frac{m}{s} \rightarrow \text{Velocidad del chorro de enfriamiento que debe salir por cada orificio}$$

A partir de lo anterior, también se tiene que la velocidad de avance del pasador en la dirección axial a través de la bobina y el anillo de enfriamiento es como máximo 5.6 mm/s. Debido a que el anillo es de menor altura que la bobina, el tiempo para recorrer sus 20 mm de altura a la velocidad de 5.6 mm/s es 3.6 s, esto significa que cada milímetro del pasador estará sometido a 3.6 s de enfriamiento, (recordemos que el calentamiento se hace en 8,6 segundos).

Seguido de esto, se calculó la tasa de transferencia de calor por convección forzada local por impacto de chorro, para la extracción para la sección de longitud definida. Para este cálculo se aplicó el caso de flujo aplicado a cilindros y esferas. Por lo cuál se utilizaron los datos, fórmulas y tablas del libro de transferencia de calor de Cengel. En primer lugar se calculó el número de Reynolds para establecer qué tipo de flujo tiene el fluido.

(Ecuación 17)

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

Donde:

- ρ = Densidad del agua (kg/m^3)
- v = Velocidad del agua en el anillo de enfriamiento (m/s)
- D = Diámetro interno del orificio de salida del anillo de enfriamiento (m)
- μ = Viscosidad dinámica del agua ($Pa * s$) o $kg/(m * s)$ a $10^\circ C$

Al reemplazar los variables en la ecuación se tiene que:

$$Re = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 0,566 \frac{m}{s} * 0,006 m}{1,307 * 10^{-3} \frac{kg}{m * s}}$$

$$Re = 2598,316$$

Seguido del cálculo que se obtuvo, si un número de Reynolds se encuentra entre 2300 y 4000, se considera un flujo en estado de transición, es decir, se encuentra muy cercano a los parámetros de flujo turbulento.

Luego, se halló el coeficiente de transferencia de calor del agua (h) a partir del cálculo del número de Nusselt, que es un parámetro que relaciona la convección con la conducción.

A partir del caso de flujo cruzado en cilindros y esferas presentado en el libro de Cengel se tiene que el número de Nusselt promedio para los flujos a través de cilindros se puede expresar en forma compacta como:

(Ecuación 18)

$$Nu_{cilindro} = \frac{h * D}{K} = C * Re^m * Pr^n$$

Donde:

- Nu = Número de Nusselt
- Pr = Número de Prandtl, por tablas de la literatura se determina (adimensional)
- h = Coeficiente de transferencia de calor del agua
- D = Diámetro interno del orificio de salida del anillo de enfriamiento (mm)
- k = Conductividad térmica del agua a 10 °C (Temperatura estimada del agua proveniente del chiller)

Las constantes C y m se determinan a partir de una tabla del libro acerca de las correlaciones empíricas para el número de Nusselt promedio, para convección forzada sobre cilindros circulares y no circulares en flujo cruzado, la tabla expone que si se el numero de Reynolds se encuentra en el rango entre 40 a 4000 (el rango en el que se encuentra el Reynolds calculado), el número de nusselt se calcula mediante la siguiente fórmula

$$Nu = 0,683 * Re^{0,466} * Pr^{1/3}$$

Para calcular el número de Prandtl del agua a 10 °C, se requiere el calor específico del agua a 10 °C (4.190 J/kg * °C) su viscosidad dinámica (1,307 x 10⁻³ Pa/s) y la conductividad térmica (0,580 $\frac{W}{m * K}$) y se aplica la siguiente fórmula:

(Ecuación 19)

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k}$$

Al reemplazar los valores en la fórmula tenemos que:

$$Pr = \frac{4.190 \frac{J}{kg * ^\circ C} * 1,307 * 10^{-3} \frac{Pa}{s}}{0,580 \frac{W}{m * K}}$$

$$Pr = 9,44$$

Una vez se obtuvo el número de Prandtl, se retomó la ecuación 14, para el número de Nusselt y se reemplazan los valores

$$Nu = 0,683 * 2598,316^{0,466} * 9,44^{1/3}$$

$$Nu = 56,319$$

Al despejar la ecuación y reemplazar los variables en la ecuación se tiene que:

(Ecuación 20)

$$\frac{Nu * k}{D} = h$$

$$\frac{56,319 * 0,580 \frac{W}{m * K}}{0,006 m} = h$$

5444,17 $\frac{W}{m^2 * K} = h \rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al pasador durante el enfriamiento

Se calculó el área superficial del cilindro definido en esa sección de pasador para la convección forzada, se recuerda que el diámetro efectivo de análisis es 44 mm.

(Ecuación 21)

$$A_s = 2 * \pi * r^2 + 2 * \pi * r * h$$

$$A_s = 2 * \pi * (0,022 m)^2 + 2 * \pi * (0,022 m) * (0,048 m)$$

$$A_s = 9,676 * 10^{-3} m^2$$

Finalmente se aplicó la ecuación de transferencia de calor para la remoción de calor por convección

(Ecuación 22)

$$Q = h * A_s * \Delta T$$

$$Q = h * A_s * (T_s - T_\infty)$$

$$Q = 5444,17 \frac{W}{m^2 * K} * 0,009676 m^2 * (860 \text{ }^\circ\text{C} - 10 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$Q = 5444,17 \frac{W}{m^2 * K} * 0,009676 m^2 * (1133,15 \text{ }^\circ\text{K} - 283,15 \text{ }^\circ\text{K})$$

$Q = 44776,12 W \approx 44,776 kW \rightarrow$ Tasa de transferencia de calor de extracción por convección (Potencia térmica)

Selección de la bomba

Para el contexto de este proyecto se debe calcular una bomba hidráulica y con base en los resultados seleccionarla de un fabricante y verificar una bomba adecuada que cumpla con los parámetros del diseño y las condiciones de mecánica de fluidos requeridas. En primer lugar se debe contextualizar acerca de una bomba, este es un dispositivo que se encarga de elevar la presión de un fluido de trabajo (principalmente energía de presión interna), las bombas se utilizan para impulsar líquidos a través de tuberías. Existen 3 tipos de configuraciones o disposición de cierta cantidad de bombas utilizadas en sistemas industriales, estas configuraciones son:

- En serie (aumento de la presión)
- En paralelo (aumento del caudal)
- Mixto

Para la selección adecuada de una bomba hidráulica se deben considerar las dos clasificaciones de bombas que existen en la industria, estas son:

- **Bombas de desplazamiento positivo:** No tienen un límite de presión máxima de impulsión, por lo cuál, para garantizar el funcionamiento seguro de este tipo de bombas, se utiliza una válvula de seguridad que deriva la salida de caudal en caso de obstrucción del conducto. Este tipo de bombas se clasifican a su vez en otros dos subgrupos, las rotatorias y recíprocas. En el primer grupo se encuentran las bombas de engranajes, aspas, tornillo, cavidad progresiva, leva y tubo flexible, mientras que en el segundo grupo se encuentran las de émbolo, pistón, paletas y diafragma respectivamente.

- **Bombas dinámicas o de presión límite:** Permiten el impulso de fluido sólo hasta determinada presión, y pueden funcionar por un tiempo relativamente largo sin averías con el conducto de salida cerrado. En este grupo se encuentran las bombas de flujo radial (centrífugas), de flujo axial (de hélice impulsora) y de diafragma con resorte.

El objetivo principal de análisis en una bomba es la potencia y energía que se le transmite al fluido para poder elevar su presión, a mayor presión que se le solicite a la bomba, ella entrega menos caudal, lo que disminuye su eficiencia. La bomba asume las cargas por altura, velocidad y presión de movimiento del fluido. La naturaleza del fluido se caracteriza por su temperatura, gravedad específica, viscosidad y tendencia a corroer o erosionar las partes de la Bomba y su presión de vapor a la temperatura del bombeo.

Un sistema hidráulico es el conjunto de tuberías y accesorios que forman parte de la instalación de un equipo de bombeo. Cuando se requiere seleccionar una bomba, en general se debe calcular la resistencia al flujo de líquido que ofrece el sistema completo a través de sus componentes (tuberías más accesorios). Para la selección adecuada de la bomba se deben tener en cuenta ciertas condiciones operativas del equipo, como lo son las siguientes:

- Naturaleza del líquido por bombear
- Caudal (máximo, mínimo, normal)
- Presión de succión (mínima, normal)
- Presión de descarga
- Altura diferencial o manométrica
- Carga total sobre la bomba (término h_b) en la ecuación de Bernoulli
- NPSH disponible → Factor de Cavitación
- Tipo de sistema de impulsión
- Materiales preferentes del dispositivo
- Tipo de sellado
- Tipo de fuente de potencia (motor eléctrico, motor diesel, turbina de vapor y otros).
- Tipo de accionamiento (si es con motor tener en cuenta el voltaje, corriente, torque, velocidad, y frecuencia)
- Limitaciones de espacio, peso y posición.
- Condiciones ambientales como humedad, temperaturas altas y bajas, presión atmosférica, etc
- Costos de operación, adquisición e instalación de la bomba
- Cumplimiento de las normas ANSI e ISO

Los parámetros o criterios establecidos para la selección del equipo son: determinar la naturaleza del líquido a bombear, la capacidad requerida, la carga total de la bomba, el tipo de sistema, el tipo de fuente, las limitaciones de espacio, peso y posición, las condiciones ambientales, los costos de adquisición e instalación y el costo de operación de la bomba. También se debe considerar la carga de succión, que es la energía del fluido al llegar al punto de succión, la carga de impulsión, que es la energía del fluido en el punto de salida de la bomba y la carga total, que es la diferencia entre la de impulsión y la de succión. Finalmente se debe encontrar un valor óptimo de eficiencia mecánica del dispositivo. La eficiencia es la relación de la potencia transmitida por la bomba al fluido entre la potencia de entrada que se suministra a la bomba.

$$\varepsilon = \frac{\text{Potencia transmitida al fluido}}{\text{Potencia de entrada a la bomba}}$$

Por literatura técnica acerca de los chillers y equipos de enfriamiento industrial estos en su mayoría utilizan bombas de tipo centrífuga, debido a que es un tipo de bomba hidráulica que convierte la energía mecánica en energía cinética mediante un impulsor giratorio, más conocido como rotor. Esa energía cinética se transforma en presión al dirigir el fluido hacia el exterior del impulsor y dentro del sistema de tuberías. Este tipo de bombas es adecuada para grandes caudales y sistemas de baja a media presión, no trabaja bien con aire o gases (necesita tener líquido presente) y requiere fluido limpio no abrasivo para evitar el desgaste del impulsor. Los chillers utilizan una bomba centrífuga para circular el agua helada desde el evaporador del chiller hasta el sistema y para retornar el agua calentada al chiller y enfriarla nuevamente.

Consideraciones del tanque de agua

Se debe utilizar un tanque metálico rectangular que reciba la caída de agua de enfriamiento por gravedad al momento de realizar el tratamiento térmico de temple en la pieza considerando el caudal de agua que se tiene.

Esto también se plantea debido a que por seguridad no se puede regar el agua en el piso de la planta, se debe evitar esto a toda costa. Otra razón es que el agua de T.T tiene una temperatura final demasiado alta debido a la transferencia de calor que sufre cuando entra en contacto con el pasador, incluso, se da un fenómeno de evaporación o cambio de fase, es decir, cierta cantidad de la masa de agua que se utilizó para el enfriamiento del pasador se evapora rápidamente debido a las altas temperaturas que obviamente exceden de sobremanera el punto de ebullición del agua (100 °C), también, el agua podría quedar con residuos de metal, limaduras y escoria debido a que el pasador se puede agrietar producto del choque térmico, por estos motivos no se puede considerar la reutilización de esta agua ya que no se puede fluir agua que esté a altas temperaturas en una bomba, puesto que se tendría un proceso ineficiente e incluso podría afectar la vida útil del equipo de bombeo. El caso de evaporación o cambio de fase requiere un cierto proceso de varias modelizaciones y análisis de cambio de masa de agua a gas, por lo cual se considera un caso de transferencia de calor más complejo y avanzado. Cabe recordar que el objetivo de este estudio no es el enfoque en los efectos del calentamiento producidos en el agua, este proyecto se enfoca principalmente en el diseño mecánico de un horno de inducción para tratamientos térmicos, especialmente el sistema mecánico de movimiento del pasador, pero la idea no consiste en la profundización acerca de la evaporación o cambios de fase y los efectos de este calentamiento en el agua inyectada a la muestra.

Con lo anterior, se plantea hacer una perforación en el tanque, de 35 mm de diámetro cada una, con el objetivo de colocar tuberías que permitan la salida del agua proveniente del tratamiento térmico hacia un desagüe de la planta o simplemente que esas tuberías se conecten a otro sistema de la planta. Por otro lado, la planta cuenta con un tanque adicional de reserva de agua que se encuentra conectado al acueducto de Palmira y provee de agua a ciertos procesos y sistemas de la empresa que la requieren. En paralelo, se dimensionó y diseñó el tanque que va a actuar como depósito de agua durante el proceso de enfriamiento del pasador. A continuación se detalla mejor el diseño del sistema hidráulico para el enfriamiento acelerado del pasador.

Configuraciones de tuberías en el sistema hidráulico, cálculos y pérdidas

En el diseño planteado, se cuenta con dos puntos claves que utilizan tuberías, es decir, se acoplan en sus orificios. El primer punto es un orificio externo del anillo de enfriamiento por el que se conecta o une al chiller mediante una tubería que va a permitir el paso del flujo de agua de enfriamiento. El fluido entra por esos orificios, lo que permite que ingrese por el canal interno del anillo y a su vez se expulsa a través de los 40 orificios de la cara interna de la pieza y se disparan los chorros hacia el pasador para cumplir con el proceso de enfriamiento acelerado de la muestra. A continuación, se presenta un plano que representa la configuración o el diseño hidráulico que se propuso para la succión y bombeo del agua limpia proveniente de un depósito de la planta hasta las tuberías del intercambiador de calor de tubos del chiller, la temperatura del agua de este tanque es de 25 °C. Se utilizó la tabla de agua saturada para encontrar el valor de la viscosidad dinámica del agua a esta 25 °C, esta tabla se encontró en el libro de “Transferencia de calor y masa de Cengel”.

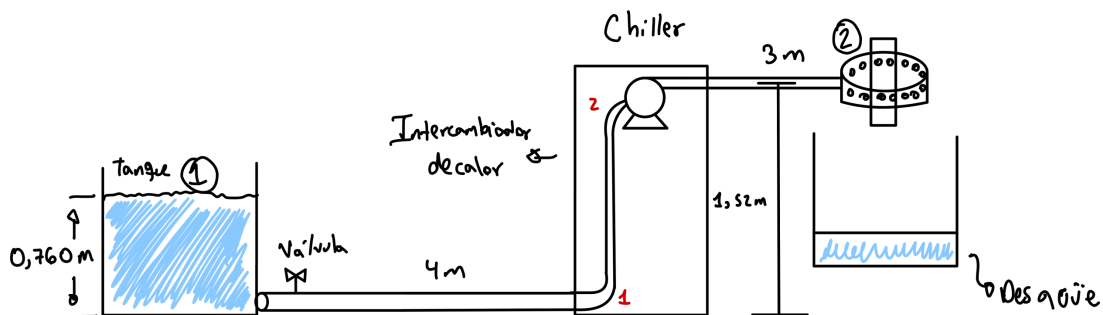


Figura LIX. Esquema de la tubería que conecta al chiller con el depósito de agua de la planta

Debido a que el nivel del agua está por encima de la bomba (0.760 m), se tiene una altura de succión positiva, lo que evita el fenómeno de cavitación y permite que el agua entre con facilidad a la bomba sin que se lleguen a formar burbujas de vapor o gas en el interior del fluido. También, el tanque está abierto a la presión atmosférica.

Es importante precisar que esta velocidad que se calculó, no solo es la velocidad de enfriamiento, sino que también corresponde a la velocidad de avance del pasador durante el calentamiento, ya que a partir de la investigación hecha, se ha podido observar que en los procesos de inducción en la industria, ambos procesos (calentamiento - enfriamiento) se realizan en paralelo, enfocados en una sección de longitud de calentamiento definida para la muestra. Ambos procesos se hacen en el mismo instante de tiempo y velocidad.

Luego del planteamiento del esquema de bombeo, se procedió con la realización de los cálculos de

energía total del fluido a través de la aplicación de la ecuación de Bernoulli y Darcy - Weisbach, que se detallan a continuación:

(Ecuación 23)

En primer lugar se calculó la velocidad del fluido en el tramo de tubería de salida del tanque hasta la bomba, se toma este tramo porque es el que contiene las pérdidas (una válvula de mariposa), la velocidad se halló con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{A}$$

El área de la tubería de 35 mm de diámetro es:

$$A = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A = \pi * (0,0175)^2$$

$$A = 9,6211 * 10^{-4} m^2$$

Se retoma la ecuación de velocidad, se reemplazaron los valores y se hizo el cálculo

$$V = \frac{6,41 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{9,6211 * 10^{-4} m^2}$$

$$V = 0,666 \frac{m}{s} \rightarrow \text{Velocidad de flujo a través de la tubería de 35 mm de diámetro}$$

Es importante tener en cuenta que la velocidad en la entrada y salida de la bomba es prácticamente igual debido a que es un flujo constante y el diámetro de las tuberías es igual en todo el trayecto. A continuación se retoma la ecuación de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

Al reemplazar los variables en la ecuación se tiene que:

$$Re = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 0,666 \frac{m}{s} * 0,035 m}{0,891 * 10^{-3} \frac{kg}{m * s}}$$

$$Re = 26161,61$$

Seguido del cálculo que se obtuvo, si un número de Reynolds es mayor a 4000, se considera un flujo de tipo totalmente turbulento, es decir, que oscila bruscamente y en varias direcciones a través de todo el tramo de tuberías del sistema hidráulico diseñado.

(Ecuación 22)

Primero se calcularon las pérdidas por fricción localizadas a partir de la ecuación de Darcy - Weisbach

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

- hf = Pérdida de carga por fricción
- f = Factor de fricción de Darcy

- L = Longitud de la tubería (7 m horizontales y una tubería vertical de 1,52 m) Total de longitud real de tubería (8,52 m)
- D = Diámetro interno de la tubería (0,035 m)
- v = Velocidad media del fluido (0,0747 m/s)
- g = Aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

El valor obtenido pertenece a un flujo turbulento en ese punto de análisis, se buscó en el libro de mecánica de fluidos de Cengel la fórmula de factor de fricción en este tipo de flujo.

(Ecuación 24)

Ecuación de Colebrook

$$f = -2.0 \operatorname{Log}\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\operatorname{Re}\sqrt{f}}\right)$$

Donde:

- ε = Rugosidad absoluta de la tubería de acero inoxidable ($\varepsilon = 0,15$ mm)

Al reemplazar los términos en la ecuación y resolverla en una calculadora gráfica se obtuvo lo siguiente:

$$f = 0,0325$$

Se retoma la ecuación de Darcy - Weisbach para pérdidas por fricción y se reemplazan los valores

$$hf = 0,0325 * \frac{8,52 \text{ m}}{0,035 \text{ m}} * \frac{(0,666 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$hf = 0,178 \text{ m} \rightarrow \text{Pérdida de carga por fricción en tuberías}$$

A partir de lo anterior, se realizó el cálculo de pérdidas por accesorios en la tubería. Según la figura LIX, en el sistema hidráulico se tienen como accesorios 1 válvula de mariposa y 2 codos. Las pérdidas por accesorios se calcularon con la siguiente ecuación:

(Ecuación 25)

hL = Pérdidas por fricción y accesorios (m) → En el sistema hay 2 codos ($k = 0,21$), y una válvula de mariposa ($k = 1$). Por otra parte, el trayecto de flujo se expone a un caso de pérdida de entrada cuando un flujo entra a un conducto de un depósito estático, como se observa en la siguiente figura.

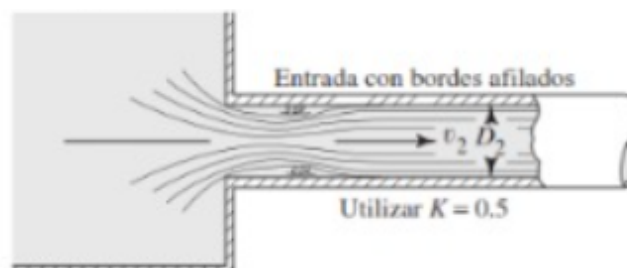


Figura LX. Caso de pérdida de entrada cuando un flujo entra a un conducto de un depósito estático
Tomada del libro de Mecánica de fluidos

Según lo anterior, para este tipo de pérdidas se utilizó un valor de k de 0,5

También, se consideraron pérdidas por parte del chiller, pero, debido a que este equipo tiene varios codos, un intercambiador de calor, una válvula para estrangulamiento en el ciclo de refrigeración, etc, en este caso, no se tomaron unas pérdidas del chiller demasiado exactas ya que hay que considerar todo lo anterior y para esto se deberían tener los planos reales del chiller y los elementos desglosados que componen el equipo. El valor de constante de pérdida de carga para un intercambiador de calor tipo chiller, específicamente los de casco y tubos o tipo placas, no está tabulado universalmente con un único valor porque depende del fabricante y del diseño hidráulico (número de pasos, diámetros, deflectores, rugosidad interna, etc.). Sin embargo, se pudo estimar a partir de bibliografía técnica e ingeniería de fluidos aplicados, por lo cuál se tomó una constante k de pérdidas igual a 10, se tomó el k más crítico o grande, con el fin de tener un cálculo de pérdidas más conservativo.

$$hL = \Sigma kL * \frac{v^2}{2g}$$

$$hL = (2(0,21) + (1) + (0,5) + (10)) * \frac{(0,666 \frac{m}{s})^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$hL = 11,92 * \frac{(0,666 \frac{m}{s})^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$hL = 0,2694 m$$

La pérdida total del sistema es $h_f + h_L = 0,45 m$

Para los anteriores cálculos se utilizó la misma velocidad de descarga o la que circula por todo el tramo debido a que la tubería es de diámetro constante y el flujo es continuo y está en régimen permanente.

Luego se procedió a calcular la energía total del fluido a partir de la ecuación de Bernoulli

(Ecuación 26)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_b = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{Total}$$

Donde:

- P_1 = Presión en el punto 1 → Tanque abierto (Presión atmosférica) → $P_1 = 0$ (absoluta)
- P_2 = Presión en el punto 2 → Orificio y anillo de enfriamiento abiertos a la atmósfera → $P_2 = 0$ (absoluta)
- V_1 = Velocidad del fluido en el punto de referencia 1 = 0, no hay velocidad en ese punto, el sistema no se moviliza
- V_2 = Velocidad del fluido en el punto 2 = 0,0355 m/s
- z_1 = Altura con respecto a una referencia (el piso) (0,760 m)
- z_2 = Es 0 si la bomba y la salida de descarga están a la misma altura, además la entrada de la carga de descarga al chiller es prácticamente al nivel del suelo
- h_b = Altura de energía agregada por la bomba (m)
- h_L = Pérdida total del sistema = $7,01808 * 10^{-4} m$
- g = Aceleración de la gravedad ($9,81 m/s^2$)
- γ = Peso específico del agua ($9810 N/m^3$)

Reemplazando valores en la ecuación y cancelando algunos términos se tiene que:

$$0,760 m + h_b = \frac{(0,666 m/s)^2}{2 * 9,81 m/s^2} + 1,52 m + 0,45 m$$

El valor de la altura geométrica es la diferencia entre las alturas piezométricas (alturas de presión de más elevación) de los puntos de referencia con respecto al nivel de referencia establecido en el suelo. Para este sistema, la altura geométrica es $1,52 m - 0,760 m = 0,76 m$.

$$hb = \frac{(0,666 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} + 0,76 \text{ m} + 0,45 \text{ m}$$

$$hb = 1,23 \text{ m}$$

En la industria, especialmente cuando se tienen procesos de líneas temple por inducción, se utilizan sistemas de enfriamiento por chorros que utilizan boquillas pequeñas, como en el caso del anillo de enfriamiento con múltiples orificios pequeños, se emplean caudales reducidos junto con presiones o alturas elevadas. La razón principal de esta configuración es que el objetivo no es transportar grandes volúmenes de agua, sino generar un chorro de alta velocidad que penetre eficazmente la capa límite térmica (superficie radial) del pasador. Además, este modelo también busca incrementar el coeficiente de transferencia de calor a través del impacto directo del chorro, lo cual permite reducir considerablemente el tiempo de enfriamiento, logrando disminuir la temperatura de la pieza desde 860 °C hasta 270 °C para cumplir con el T.T definido, esto en apenas unos 3 - 5 segundos. Así, el uso de presiones altas con caudales bajos es fundamental para generar el proceso de enfriamiento rápido, aprovechando la alta velocidad del chorro, el caudal volumétrico a través de una tubería del mismo diámetro del orificio o boquilla de salida del chorro, con el fin para mejorar la eficiencia térmica sin necesidad de incrementar la columna de agua en el tanque.

Cálculo de la potencia requerida por la bomba para efectuar el trabajo de bombeo del fluido a las tuberías del anillo de enfriamiento (Potencia útil entregada al fluido)

Se aplicó la siguiente ecuación:

(Ecuación 27)

$$\text{Potencia hidráulica de la bomba} = \rho * g * Q * H$$

Donde:

- ρ = Densidad del agua (1000 kg/m³)
- g = Aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
- Q = Caudal de agua (6,41 * 10⁻⁴ m³/s)
- H = Altura manométrica (1,16 m)

Se reemplazaron los valores calculados y se tiene que:

$$W_b = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 6,41 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1,23 \text{ m}$$

$$W_b = 7,73 \frac{\text{kg} * \text{m}^2}{\text{s}^3}$$

$$1 \text{ Watt} = 1 \frac{\text{kg} * \text{m}^2}{\text{s}^3}$$

Por lo tanto la potencia que debe tener la bomba del chiller a seleccionar es = 7,73 W = 0,00773 kW

$$1 \text{ kW} = 1,34102 \text{ hp}$$

$$9,7894 * 10^{-3} \text{ hp}$$

Ese valor calculado representa la potencia útil transmitida al fluido. Se puede considerar un sistema de bajo caudal y baja altura, como un circuito cerrado pequeño.

Fenómeno de Cavitación presente en la bomba

Este fenómeno ocurre cuando la presión de succión en la entrada de la bomba es demasiado baja, por lo cual se forman burbujas en el fluido, como si se hirviera. Este fenómeno sucede si se toma el fluido desde una

parte muy abajo o si hay pérdidas de energía excesivas en la línea de succión, la presión en la bomba sería suficientemente baja como para hacer que se formaran burbujas de vapor en el fluido.

Los efectos que se pueden llegar a presentar si sucede la cavitación en la bomba es que, si se forman burbujas de vapor en el puerto de succión debido a una presión baja en exceso, estas colapsarían cuando lleguen a las zonas de presión más alta. El colapso de las burbujas liberaría grandes cantidades de energía, lo que afectaría las aspas del impulsor y ocasionaría la erosión y desgaste rápido de su superficie. Se produce mucho ruido, altas vibraciones, se reduce la vida útil del equipo y hasta la carcasa de succión de la bomba puede llegar a la falla crítica.

El factor de cavitación o más conocido como NPSH (Net Positive Suction Head, o Cabeza Neta Positiva de Succión) es un parámetro que se calcula en una bomba con el fin de determinar y asegurar que la bomba pueda operar de manera eficiente y sin cavitación. Es un parámetro crítico en el diseño y selección de bombas. Para garantizar este rendimiento adecuado, el NPSH de succión disponible (NPSH_A) debe ser igual o mayor que el NPSH requerido (NPSH_r) por la bomba para asegurar que no se produzca cavitación y que la bomba opere en condiciones seguras y eficientes. Una vez se conoce el valor del NPSH de succión disponible en el sistema, se compara con el NPSH requerido por la bomba, por lo tanto, se puede determinar si esa bomba es apta para las condiciones de operación específicas en el sistema hidráulico diseñado. Para minimizar los riesgos de cavitación, se deben ajustar los niveles de succión, la altura del líquido y las pérdidas en las tuberías por fricción y accesorios. A continuación, en la siguiente ecuación, se calculó el valor de NPSH disponible para la bomba encontrada y se verificó su adecuada selección.

(Ecuación 28)

$$NPSH_A = h_{sp} + h_s + h_f + h_{vp}$$

Donde:

- h_{sp} = Carga de presión estática (absoluta) sobre el fluido en el almacenamiento (m o ft)
- p_{sp} = Presión estática (absoluta) sobre el fluido en el depósito → Presión atmosférica en Palmira (101300 Pa)
- h_s = Diferencia de elevación desde el nivel del fluido en el depósito a la entrada de succión de la bomba
- h_f = Pérdida de carga en la tubería de succión
- h_{vp} = Carga de presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (m o ft)
- p_v = Presión de vapor (absoluta) del agua a la temperatura a que se bombea (10°C) → $p_v = 1227,6$ Pa → Valor encontrado en las tablas de termodinámica y propiedades para el agua saturada en el libro de Cengel

Reemplazando valores y términos en la ecuación tenemos que

$$NPSH_A = \frac{p_{sp}}{\gamma} + (z_2 - z_1) + h_f + \frac{p_{vp}}{\gamma}$$

$$NPSH_A = \frac{101300 \frac{N}{m^2}}{1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}} + 0,76 m + 0,45 m + \frac{1227,6 \frac{N}{m^2}}{1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$NPSH_A = 11,661 m \rightarrow \text{Factor de cavitación}$$

A partir de este valor calculado, se busca el NPSH requerido por el fabricante, para comparar estos valores y verificar la operación del equipo. La bomba debe requerir una cantidad de NPSH que sea menor que lo que se tiene disponible para asegurar una operación sin cavitación.

Debido a que inicialmente se tienen los datos de la cabeza de altura H (1,23 m) y el caudal Q (2,30 m³/h), se procedió a buscar en catálogos técnicos de fabricantes las curvas características o de rendimiento de las bombas. En primer lugar, se construyó una serie de datos en Excel para el cálculo de la cabeza de la bomba (H_b) en función del caudal (Q), es decir, se hicieron varias iteraciones de caudal y así establecer la carga de la bomba correspondiente a cada caudal modificado y establecido. Este proceso se realizó replicando todas las fórmulas y

cálculos realizados para el sistema hidráulico, (Darcy, Reynolds, fricción, accesorios, velocidad, Bernoulli, potencia, etc). Se automatizaron las fórmulas en una hoja de excel, se colocaron los respectivos valores y se obtuvo el mismo resultado de cabeza de la bomba. A partir de lo anterior, se graficó el valor del caudal en m³/h (eje x) vs el valor de la cabeza de la bomba en m (eje y) para establecer el cambio en la curva ascendente. Seguido de esto, se trató de superponer la curva obtenida sobre la curva de una bomba comercial, con el fin de encontrar el punto de operación (punto de intersección) del equipo. Lo anterior se muestra en la siguiente figura.

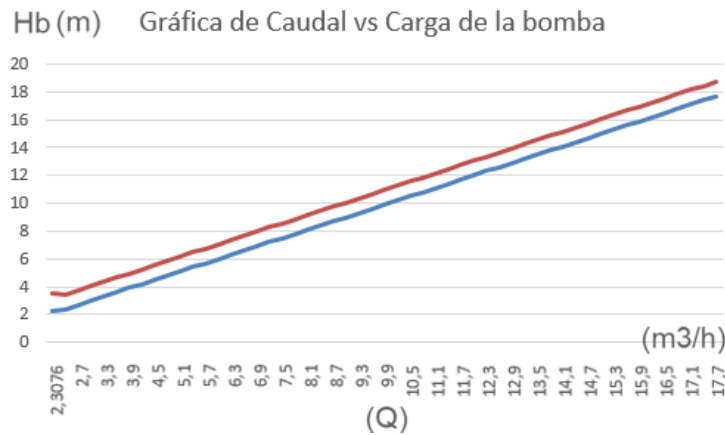


Figura LXI. Gráfica hecha en Excel sobre el caudal vs cabeza o carga de suministro de la bomba

En la búsqueda se encontró una bomba de la marca fabricante Vogt, y la referencia es Serie N Type 125 - 200, en el catálogo técnico se proporcionó la curva característica del equipo, se realizó un trazo de color azul que permitiera ubicar el punto de operación y su cruce con la curva, esto teniendo en cuenta los ejes x-y. El trazo indica que efectivamente la bomba genera exactamente la presión necesaria para vencer la altura total del sistema y mantener el caudal deseado, también muestra que el sistema planteado no está forzando a la bomba a trabajar fuera de su diseño, por lo cuál, si el punto de operación cae cerca o encima de la curva, se está logrando una operación más eficiente y precisa por parte de la bomba, se cumplen con las condiciones requeridas. Con esto se puede establecer la selección de esta referencia de bomba, junto con sus demás especificaciones de potencia, velocidad, eficiencia del motor, etc, para la búsqueda de un sistema de enfriamiento (chiller), que cumpla con estos parámetros. Teniendo en cuenta que el chiller tiene varios elementos que ocasionan pérdidas, como codos, válvulas, tubos, intercambiadores, tuberías, etc, pero que son desconocidos por parte de este estudio, se utilizó un factor de seguridad de 1,5 (valor ajustado en 1,845 m) para la cabeza de la bomba o carga requerida, para poder suplir estas pérdidas estimadas, para cumplir con los requerimientos operativos y que el equipo seleccionado sea el más adecuado.

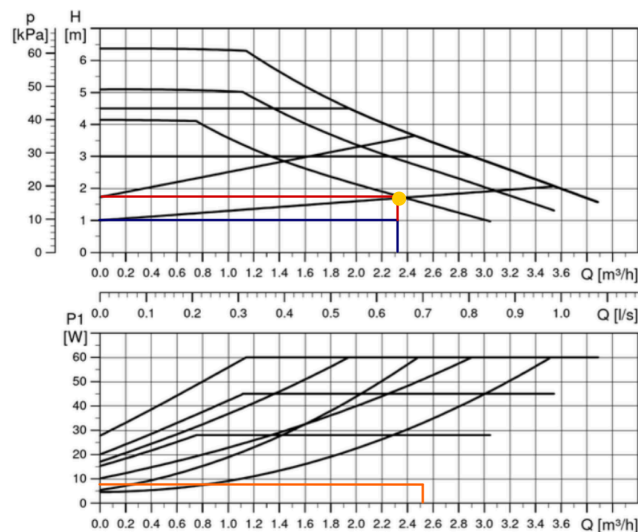


Figura LXII. Curvas Características de rendimiento de la bomba de referencia Vogt serie N tipo 125 - 200.

La línea de color rojo de la gráfica de arriba determina el punto de operación de la bomba sobreestimado, con factor de seguridad. El punto rojo es el punto mínimo que la bomba debe alcanzar para garantizar el

funcionamiento del equipo incluso con pérdidas. Por otro lado, la línea azul determina la intersección del punto de operación real de la bomba, con la carga obtenida en los cálculos a partir de los datos del diseño. Se puede observar que el punto de operación en la línea azul está por debajo de la curva más baja. En complemento, la línea naranja determina la intersección del punto de operación con la potencia de la bomba, es una potencia muy baja ya que las condiciones de caudal y altura de carga son relativamente bajas también. Y, finalmente, el punto amarillo que se encuentra entre la unión de dos curvas, marca el punto de operación de la bomba seleccionada. Este punto viene a partir de superponer la gráfica que se realizó en Excel a la gráfica del fabricante o catálogo comercial.

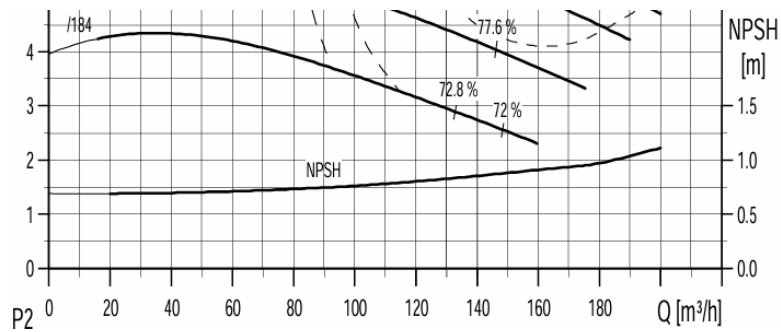


Figura LXIII. Curvas Características del factor de cavitación requerido por la bomba

La gráfica de NPSH requerido para la bomba seleccionada muestra que ese valor máximo de la curva es menor al que se obtuvo en los cálculos (11,590 m), por lo cuál, con este valor de la gráfica, se garantizan que las condiciones operativas de la bomba cumplan con el fenómeno de cavitación.

Una vez se confirmó la referencia de bomba a utilizar mediante la gráfica de curva característica, se especificaron en mayor profundidad las características técnicas del dispositivo. A continuación se muestra la bomba seleccionada.



Figura LXIV. Vista de la bomba de referencia Vogt serie N tipo 125 - 200 seleccionada.

El tipo de bomba que se seleccionó es muy útil en circuitos cerrados de enfriamiento, como el caso del chiller que recircula agua fría en un sistema cerrado. Es una bomba centrífuga en la que el fluido entra axialmente pero es impulsado radialmente (en 90°) por el impulsor, esto produce mayores presiones a caudales moderados o bajos. En este caso, una bomba de flujo axial no serviría mucho ya que están diseñadas para mover grandes volúmenes de agua con muy baja presión (relativamente menos de 1 metro de cabeza).

Tabla XLVII. Especificaciones técnicas de la bomba seleccionada

Característica	Descripción
Tipo de bomba	Centrífuga
Modelo	Vogt serie N tipo 125 - 200 de 6 polos
Velocidad nominal (rpm)	900
Distancia entre conexiones de manguera (Entrada/Salida) (mm)	130
Caudal máximo (m ³ /h)	4.0
Altura máxima (m)	7
Presión máxima de trabajo (kPa)	70

Conexión Roscada (mm)	47.8
Norma de rosca	(ISO 228-1)
Temperatura permisible del líquido que bombea (°C)	-10 a 95
Potencia máxima (W)	60
Altura máxima del NPSH (m)	1,3
Eficiencia	0,5 = 50%
Voltaje de la fuente de alimentación (V)	230 V, una sola fase
Clase de protección eléctrica	IP44
Masa (kg)	1.9
Frecuencia (Hz)	50

Ciclo térmico en el que opera el sistema de extracción de calor

El sistema de enfriamiento que fue seleccionado es una máquina térmica, es decir, es un dispositivo que opera bajo ciclos térmicos más conocidos como ciclos de refrigeración por compresión de vapor. Este ciclo consiste en varias etapas donde se intercambia energía térmica para lograr el efecto de refrigeración o acondicionamiento del ambiente o de un proceso específico. En el contexto de este proyecto, para la refrigeración de los pasadores después de que se calientan por inducción, y a su vez, se encarga de la remoción del calor generado en cada una de las piezas.

Etapas o fases del ciclo de refrigeración por compresión de vapor

Para entrar en mayor profundidad acerca del ciclo térmico del chiller, un ciclo de refrigeración es un proceso termodinámico que consiste en la extracción del calor presente en un determinado espacio que se desea mantener frío, y a su vez, se disipa ese calor en otro espacio por separado. Por ejemplo, un aire acondicionado de un salón de la universidad extrae o remueve el calor presente en el aula y lo disipa dentro del sistema hacia los alrededores del campus. Lo anterior permite que se mantenga el espacio en una sensación fría para las personas ahí presentes. Para lograr esto, se utiliza un refrigerante que circula por el ciclo de refrigeración del dispositivo a medida que pasa por diferentes etapas que son:

- **Evaporación:** El refrigerante en el evaporador absorbe calor y se evapora, enfriando el espacio.
- **Compresión:** El vapor de refrigerante se comprime en el compresor, elevando su presión y temperatura.
- **Condensación:** El vapor caliente pasa por el condensador, cediendo su calor al ambiente externo y se condensa.
- **Expansión:** El líquido pasa por la válvula de expansión, disminuyendo su presión, y vuelve al evaporador para repetir el ciclo.

Componentes principales del ciclo de refrigeración por compresión de vapor

Los componentes que integran un ciclo de refrigeración son los siguientes:

- **Compresor:** Aumenta la presión y la temperatura del refrigerante en su estado gaseoso.
- **Condensador:** En este intercambiador de calor, el refrigerante cede calor al ambiente, se condensa y pasa a estado líquido.
- **Válvula de expansión:** Disminuye la presión del refrigerante líquido, preparándolo para absorber calor.
- **Evaporador:** Aquí, el refrigerante en estado de baja presión y temperatura absorbe calor del espacio a enfriar, evaporándose en vapor.

A su vez, el chiller tiene otros componentes que conforman el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, tales como sensores de alta y baja presión, que monitorean constantemente el cambio de la presión del fluido refrigerante cuando este recorre todo el ciclo, también cuenta con una bomba hidráulica encargada de elevar la presión del agua de enfriamiento y hacer que fluya por tres cables que van conectados al anillo de orificios que

rodea el pasador, a su vez, la bomba también se encarga de succionar el agua cuando esta se encuentra en el tanque que se encuentra debajo de la pieza, una vez se realizó el temple. En este caso, la bomba también va conectada a una tubería del anillo de enfriamiento. Cabe mencionar que para estas tuberías se desprecian tanto las pérdidas, debido a que no hay fricción, como los accesorios, ya que no tienen codos ni bridas. A continuación, en la **Figura LXIII** se presenta un esquema del ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

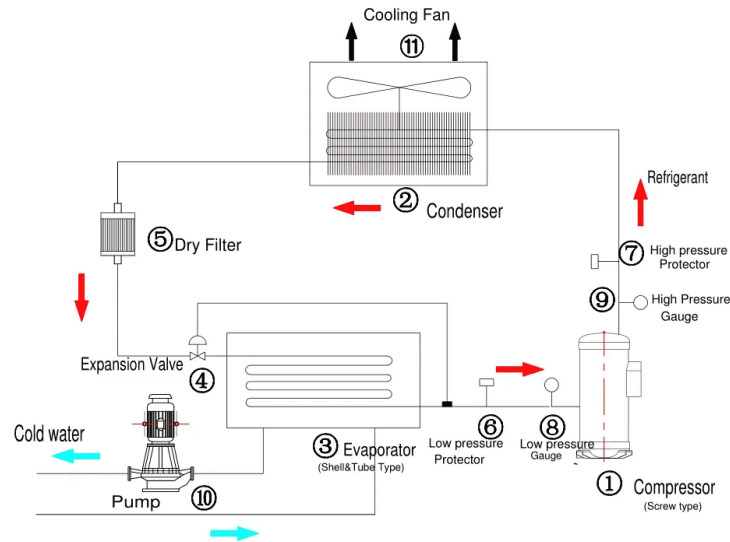


Figura LXV. Esquema del ciclo de refrigeración del chiller seleccionado [44]

Una vez se realizaron los cálculos que justifican la referencia de equipo a encontrar, se seleccionó un chiller de la empresa Mecalor, ubicada en Bogotá Colombia, se revisaron varios catálogos técnicos de estos equipos y se encontró una opción económicamente favorable y que a su vez cumplía con la cantidad de calor a extraer del pasador. Seguido de esto, si el chiller tiene la capacidad de remover la cantidad requerida de calor, la bomba podrá proporcionar el caudal de agua necesario para la extracción.

A continuación, en la siguiente tabla se presentan los parámetros técnicos de la referencia de chiller que se escogió.

Tabla XLVIII. Especificaciones técnicas del chiller seleccionado

Especificación	Detalle
Capacidad de remoción de calor en kcal/h	5.000 a 75.000 kcal/h
Capacidad de remoción de calor en kJ/h	20.920 a 313.800 kJ/h
Capacidad de remoción de calor en kJ/s	87,17 kJ/s
Capacidad de enfriamiento en kW	10,47 kW
Coefficiente de Rendimiento COP	3,83
Capacidad de caudal de agua	8.5 kg/s
Altura manométrica	30 cm
Máxima potencia de la bomba	10 W
Eficiencia energética de la máquina	Alrededor del 80 - 90%
Precio	\$10.600.750 COP
Control de operación	Microprocesador de fácil operación anclado al

	sistema de monitoreo y control
Facilidad de instalación	Sí
Tipo	Compacto, ideal para procesos pequeños y laboratorios

Debido a que en los datos técnicos del catálogo del fabricante la cantidad de calor que puede remover el sistema de enfriamiento se proporcionó en kilocalorías, se realizó la conversión a kilojoules, para establecer todos los datos en una misma unidad, teniendo en cuenta que los cálculos de calor generado en el pasador (**ver en la sección de resultados del diseño de detalle la Ecuación 4, donde se precisan los cálculos de conversión de unidades**) se presentaron en kilojoules. Para complementar, el chiller seleccionado utiliza agua desionizada, ya que este fluido tiene una alta resistividad eléctrica (de 182,000 $\Omega \cdot m$), por lo cuál se considera un mal conductor eléctrico, y a su vez esto evita que se produzcan arcos eléctricos en la bobina, al momento de entrar en contacto con el sistema de calentamiento.

El chiller es un ciclo de refrigeración básico, con eficiencia del compresor. Por el catálogo técnico del equipo se conoce que el refrigerante es R134a, se pueden consultar los datos de entalpía y entropía en las tablas de termodinámica, pero por parte del fabricante, no se tiene exactitud de las temperaturas y presiones de trabajo del ciclo, dependen de ciertos factores, tampoco se encontró mayor información acerca del intercambiador de calor, se sabe que es de tubos de 6 pasos. Hay que tener en cuenta que no se realizaron cálculos del ciclo de refrigeración debido a que no había necesidad debido a que en el catálogo técnico de la máquina, se especificó el valor del coeficiente de operación. Con este dato es suficiente para calcular el consumo energético del dispositivo. Lo demás ya viene calculado por parte del fabricante, este equipo se seleccionó con el caudal de la bomba y la capacidad que tiene para la cantidad de calor a remover.

En la siguiente figura se presenta la ilustración del chiller de Mecalor que fue seleccionado para este proyecto. La referencia del equipo es Compact Chiller MSA/W.



Figura LXVI. Referencia de Chiller de la empresa Mecalor seleccionado [43]

Cálculo del consumo energético del equipo según los requerimientos del proceso de T.T

Con el fin de establecer un análisis de energía térmica útil que se le debe suministrar al equipo para que pueda operar según lo esperado, se calculó el valor del consumo energético del chiller según las condiciones del proceso de T.T de este estudio, y con base en eso, buscar una referencia en el mercado. Primero se estableció el coeficiente de rendimiento (COP) para la máquina de extracción de calor, $COP = 3,83$, recordemos que el COP se entiende como la relación entre la energía térmica producida y el consumo eléctrico del equipo. Por ende, el cálculo del consumo energético se expresa mediante la siguiente ecuación.

(Ecuación 22)

$$\text{Consumo energético} = \frac{\text{Capacidad de enfriamiento en kW}}{COP}$$

$$\text{Consumo energético} = \frac{10,47 \text{ kW}}{3,83}$$

Consumo energético = 2,73 kW

Materiales y aislamientos térmicos del equipo de extracción de calor

Los materiales que conforman el equipo de enfriamiento principalmente son materiales metálicos y algunos poliméricos. En la **Tabla XLIX** se muestran en detalle las partes que conforman el sistema de enfriamiento y los materiales respectivos para la fabricación de cada componente.

Tabla XLIX. Materiales de los componentes del chiller y la función de cada una de las piezas del equipo

Componente del chiller	Función del componente	Material de fabricación
Carcasa	Dar resistencia mecánica frente a impactos y cargas, sostiene todos los componentes	Acero Inoxidable 320 recubierto con pintura electrostática que protege contra la corrosión
Paneles externos	Evita sobrecalentamientos en el equipo y evita emisiones de calor al exterior	Aislamiento térmico de espuma de poliuretano
Compresor	Comprime el refrigerante para circulación de calor	Aleaciones de cobre
Condensador	Disipa el calor del refrigerante al ambiente	Cobre con aletas de aluminio
Evaporador	Absorbe calor del medio enfriado	Bronce
Válvula de expansión	Controla el flujo del refrigerante	Cobre
Bomba de circulación	Circula el líquido refrigerante de enfriamiento	Acero inoxidable; Impulsor de latón
Tuberías	Conductividad térmica y resistencia	Cobre
Aislamiento Térmico	Minimiza pérdidas térmicas; mejora eficiencia	Espuma de poliuretano de alta densidad
Componentes Eléctricos y de Control	Control de funcionamiento y seguridad	Fibra de vidrio para, componentes electrónicos de la PCB Polipropileno para relés, termostatos y sensores
Sistema de Ventilación	Circulación de aire en el condensador	Carcasa con aletas de aluminio

En esta ocasión, no se consignaron valores cuantitativos para las propiedades mecánicas de cada material, ya que ambos equipos (fuente de alimentación y chiller) están fabricados en su mayor parte con los mismos

materiales, incluyendo estructura, componentes eléctricos y electrónicos, láminas, paneles de control, etc. Por ello, en la **Tabla XLIX** solo se muestran los componentes del chiller y los materiales que se utilizan en la industria para poder fabricarlo. Los materiales actúan como aislantes térmicos y eléctricos, lo que permite la protección de los operarios de la planta frente a una descarga eléctrica tanto a través de las conexiones del equipo como del chiller como tal, ya que las paredes internas de la carcasa del dispositivo están recubiertas por una manta de espuma de poliuretano de alta densidad, al ser un polímero, su conductividad eléctrica es muy baja, con un valor aproximado entre 0,02 y 0,03 S/m (unidades de siemens sobre metro). Por otro lado, la resistividad eléctrica del aislante es de $10^{16} \Omega \cdot m$ (unidades de siemens sobre metro).

Instalación del sistema de Enfriamiento y costos del proceso

Una vez seleccionado el equipo, se planteó nuevamente el escenario hipotético de los dos subsistemas anteriores (control y calentamiento), en el cual Cadenpal adquiere el chiller para su instalación en la planta. Para ello, se consultó a la empresa Mecalor, la cuál es reconocida por ser fabricante, comercializadora e instaladora de sistemas de enfriamiento (la misma del equipo seleccionado). Dado la experiencia de esta empresa, se solicitó una asesoría para obtener información precisa sobre las consideraciones de servicio y los criterios técnicos de ingeniería que la empresa tiene en cuenta a la hora de realizar la instalación del dispositivo. Estas consideraciones conforman las tareas que Mecalor debe realizar para ejecutar la fase de instalación. Por consiguiente, en la **Tabla L** se presentan las consideraciones y el orden de los días establecidos para cada actividad.

Tabla L. Consideraciones necesarias y días de ejecución para la instalación del chiller

Consideración	Descripción	Días de ejecución	Costo estimado
Condiciones del sitio de instalación	Evaluación del área de montaje, el soporte estructural, accesibilidad a la planta y ventilación para el equipo.	2	\$1.100.000 COP
Evaluación técnica de la capacidad del equipo	Verificar que la capacidad del chiller en kW sea suficiente para enfriar el pasador en el tiempo y velocidad requeridos	2	\$1.300.000 COP
Condiciones ambientales de la planta	Evaluación y control de la humedad, temperatura para proteger el equipo contra el polvo, agua filtrada y cargas térmicas	2	\$1.500.000 COP
Requerimientos eléctricos	Verificar en la planta el voltaje, fases, tableros adecuados, protecciones y cantidad de energía estable disponible.	1	\$1.450.000 COP
Sistema de tuberías y conexiones	Suministrar suficiente cantidad adecuada de agua de enfriamiento. Establecer rutas de tuberías, aislamientos	1	\$1.300.000 COP

	térmicos, válvulas y accesorios del sistema hidráulico.		
Transporte y logística	Planificar traslado de técnicos de instalación, desde Bogotá a Palmira, embalaje seguro del equipo, montaje en sitio. y gestión de viáticos	2	\$3.000.000 COP
Normatividad y permisos de operación	Gestionar permisos ambientales, energéticos y de operación según las regulaciones en el Valle del Cauca	1	\$150.000 COP
Calidad y equipo de soporte	Capacitar personal, gestionar inventario de repuestos y establecer soporte técnico y planes de mantenimiento del equipo	3	\$534.000 COP
Entrega de Documentación al cliente	Realizar la documentación adecuada del proyecto, pruebas y funcionalidad	1	\$220.000 COP
Ofrecimiento de garantía	Debido a la representación nacional de la empresa esta ofrece garantía de 3 años para el equipo	-	-
Total de días	-	15	\$10.554.000 COP

Una vez establecidas las actividades relacionadas con la instalación del chiller por parte de la empresa Mecalar, esta procedió a cotizar las horas de trabajo en el proyecto, los servicios de transporte del sistema, viáticos de dos técnicos que la empresa asigna para la instalación del equipo. Aunque la misma empresa consultada es la fabricante del equipo, debe establecer unos requerimientos y emitir una orden de pedido para solicitar el ensamble del equipo en su bodega.

La cotización final por toda la gestión de la empresa, incluyendo las actividades listadas en la tabla y los días de ejecución, fue de 10.554.000 Es importante aclarar que la empresa realizó estimaciones y proyecciones basadas en los datos proporcionados por el estudiante de ingeniería mecánica. Además, la empresa llevó a cabo cálculos para mantener los márgenes de ganancia y rentabilidad del proyecto, pero no proporcionó detalles específicos sobre los cálculos o fórmulas que utilizan para costear sus servicios, esto debido a que esa información es confidencial.

Finalmente, el costo neto de todo el sistema de extracción de calor que abarca su análisis, cálculos, selección del equipo, adquisición, montaje de conexiones y tuberías de enfriamiento e instalación, asciende a \$20.554.000 COP.

4. Sistema de posicionamiento y movimiento del pasador

Después de realizar el análisis morfológico de las alternativas para el sistema de posicionamiento del pasador, se establecieron unos criterios de selección a partir de la definición de los requerimientos del subsistema especificados tanto por el cliente, como los de ingeniería. Se definió una comparativa entre ambos tipos de requerimientos. Los criterios facilitaron la evaluación y elección de la mejor opción para el mecanismo de transporte del pasador a través del sistema térmico.

Los requerimientos del cliente acerca del sistema de movimiento y posicionamiento del pasador dentro de la bobina son:

- Capacidad para sujetar el pasador más grande, y a su vez, pasadores de diferentes dimensiones.
- Capacidad de mover el pasador a través de la bobina.
- Estructura compacta y ligera
- Los componentes del mecanismo no deben colisionar entre sí y la pieza debe tener suficiente espacio de avance.
- Velocidad de avance que permita una mayor precisión en el tratamiento térmico en la pieza.
- Alta resistencia mecánica para la carga aplicada y condiciones de fatiga y desgaste.
- Costo de adquisición e instalación asequible
- Resistencia a altas temperaturas.
- Facilidad de montaje y movilidad del sistema
- Facilidad de mantenimiento

Los requisitos técnicos acerca de los eslabones y piezas que conforman el mecanismo del sistema de movimiento y posicionamiento del pasador dentro de la bobina son:

- Movimiento del pasador en dirección axial a través de la bobina
- La carrera del mecanismo debe ser máximo de 500 mm (220 mm de longitud del pasador y 30 mm adicionales para retirar la pieza = 250, y en diseño mecánico siempre se dimensiona la carrera con base en el doble de la longitud recorrida.)
- Estructura con masa no mayor a 600 kg ya que se debe soportar el peso del pasador y del agua de enfriamiento
- Debe tener una velocidad lineal de avance mayor o igual a 5,6 mm/s
- El soporte sujetador debe resistir una carga de mecánica máximo de 70 N (sumatoria peso del pasador y del soporte que lo sujeta)
- Resistencia térmica a temperaturas iguales o mayores a 860 °C, máximo hasta 900 °C
- Uniones atornilladas y sujeciones mecánicas y soldadas en las piezas del mecanismo
- Planes de mantenimiento preventivo con una duración entre 6 y 8 horas

A partir de lo anterior, los criterios de diseño se basaron en la precisión del posicionamiento y agarre de la pieza, también con base en la velocidad de avance del sistema, el control del movimiento, tipo y costo de materiales, si es o no autoblocante el mecanismo, el tipo de motor, las dimensiones de las piezas de trabajo, mantenimiento de los componentes, resistencia térmica, etc. Se buscó un mecanismo que fuera funcional, completo y, al mismo tiempo, ergonómico y fácil de adaptar a las dimensiones del pasador y la bobina.

Para evaluar estos criterios de diseño, se establecieron rangos o escalas de rendimiento entre (bajo - medio - alto). En este caso, es más conveniente utilizar valoraciones cualitativas en lugar de una escala numérica, por ejemplo de 1 a 5, ya que resulta muy difícil calificar de manera precisa un mecanismo o sistema desde la industria sin antes haber sido diseñado y probado. Aunque las referencias del mercado traen consigo unas especificaciones técnicas y características, en sí se requieren más configuraciones, programaciones, cálculos y acotaciones antes de poder evaluarlas adecuadamente. Por ello, las valoraciones cualitativas permiten una apreciación más realista y acorde para la ingeniería, sobre todo antes de un diseño.

Estos valores se determinaron a partir de una búsqueda de alternativas comerciales para cada uno de los mecanismos establecidos en el análisis morfológico, que podrían servir como una alternativa para el mecanismo de posicionamiento de pasadores. Se indagaron los catálogos técnicos y las referencias de estos mecanismos que se encuentran disponibles en el mercado. Las valoraciones se dieron luego de analizar cada elemento y la incidencia de los criterios establecidos en dichos elementos, por ejemplo, un sistema hidráulico puede tener un alto costo con respecto a las demás alternativas, pero a su vez, también puede tener una media o baja precisión de posicionamiento. Una baja precisión en el posicionamiento de la muestra se establece en máximo 1 mm de error dado que ni la cabeza ni el agujero pasante del pasador se tratan térmicamente, o más bien, no es el enfoque principal realizar el tratamiento térmico en dichos puntos mencionados.

A continuación, en la **Tabla LI** se presentan los criterios de selección que se establecieron para elegir la opción y referencias más favorables del tipo de mecanismo encargado del posicionamiento y transporte de los pasadores

Tabla LI. Criterios de selección para el mecanismo de posicionamiento y transporte de los pasadores

Criterios	Piñón-cremallera	Tornillo sin fin (Actuador Lineal)	Sistema hidráulico	Sistema neumático
Precisión de posicionamiento	Alta	Muy alta	Media	Baja
Velocidad de respuesta	Media-Alta	Baja	Alta	Alta
Facilidad de control del movimiento	Alta	Alta	Media con una válvula y sensor	Media
Ubicación del actuador fuera del horno	Si	Si	No	Si
Autoblocante	Si (Se puede controlar con motor)	Si	Si (con acople escalonado)	No
Costo	92.000 COP	690.980 COP	812.900 COP	7.900 COP
Resistencia a altas temperaturas	Hasta 1510 °C	Hasta 1510 °C	Hasta 1150 °C	Hasta 1370 °C
Resistencia a ambientes húmedos, presión y corrosión	Si	No	Si	No
Dificultad en el mantenimiento del mecanismo	Baja	Medio-Alto	Alto	Medio
Complejidad de montaje	Baja	Media	Alta	Media
Ruido y vibraciones	Bajo	Muy bajo	Medio	Medio-Alto
Tamaño y espacio requerido	Compacto	Largo (husillo)	Robusto con bomba y mangueras	Compacto
Reversibilidad (puede ir adelante y atrás fácilmente)	Si	Si	Si	Si

Luego de evaluar el cumplimiento de cada uno de los criterios de diseño por parte de las alternativas de mecanismos propuestas. Se determinó que el mecanismo de piñón cremallera es la opción que cumple con mayor satisfacción o ponderación alta cada uno de los ítems presentados, por lo cual se escogió este sistema para ser utilizado en el posicionamiento y transporte del pasador durante el proceso de tratamiento térmico a través del horno de inducción. Este mecanismo a diferencia de sus pares en comparación, tiene una mayor precisión con respecto a los demás, y cumple con ciertas condiciones de diseño mecánico.

Selección del mecanismo de piñón - cremallera

El mecanismo de piñón - cremallera es un ensamble mecánico que consta de un engranaje recto de tamaño pequeño denominado piñón, y este se engrana con una barra dentada lineal conocida como cremallera. Al girar el piñón, sus dientes se acoplan con los de la cremallera, generando un desplazamiento lineal. La precisión del movimiento depende de la calidad del maquinado con el que se fabricaron las piezas y la geometría de ambos componentes. Para poder establecer una correcta relación entre el piñón y la cremallera se utiliza el perfil de involuta que permite al piñón entrar en contacto con los dientes de la cremallera.

La función principal del mecanismo es desplazar el pasador a lo largo del eje Y (movimiento vertical). Primero, eleva el pasador hasta el inicio de la bobina, que sirve como punto de partida del proceso. Al encender la fuente de alimentación de la bobina, se induce la corriente y se calienta el pasador. A medida que esto ocurre, el mecanismo desciende en función del tiempo de calentamiento y la velocidad de enfriamiento. Es necesario ajustar el torque y la velocidad del motor según los requisitos del movimiento, para poder controlar el avance de la muestra.

Después, el pasador atraviesa un anillo que contiene los orificios por donde sale el chorro de agua para enfriar rápidamente la pieza. Mientras tanto, el mecanismo continúa su movimiento descendente hasta alcanzar la parte inferior del horno. Finalmente, al llegar a su punto de origen, se completa el tratamiento térmico por inducción y el enfriamiento.

Es importante destacar que la ubicación del motor que mueve el mecanismo debe ser externa al horno. Esto se hace para evitar que el calor irradiado por el pasador y la bobina cause desgaste térmico en las piezas del motor o se lleguen a producir cortocircuitos al contacto con los componentes eléctricos del motor. Por lo tanto, la opción más segura es situar el motor por fuera del horno. En complemento, también se podría incurrir en otro riesgo si los componentes eléctricos se humedecen al entrar en contacto con el agua de enfriamiento, esto también generaría riesgos de cortocircuitos y sobrecargas eléctricas hacia los operarios que manipulen el motor.

A continuación, se presenta una ilustración del mecanismo seleccionado para el posicionamiento y transporte de los pasadores a través del horno de inducción.



Figura LXVII. Ejemplo del sistema de cremallera y piñón acoplado a un servomotor

Para comprender mejor el mecanismo de cremallera y piñón, se realizó un análisis mecánico del sistema, el cual presenta dos tipos de movimiento. El primero es circular: cuando el piñón gira debido al movimiento del eje acoplado al servomotor. El segundo es rectilíneo: a medida que el piñón gira, también desplaza de forma lineal la cremallera a lo largo del eje axial. Este movimiento lineal se genera por la relación de transmisión y el perfil de involuta de los dientes del piñón y la cremallera. La interacción entre estos dientes permite que el piñón empuje a los dientes de la cremallera, provocando su avance lineal. Gracias a este mecanismo, se produce el movimiento necesario para aplicar o controlar el desplazamiento del soporte del pasador. En la siguiente figura se presenta una vista isométrica con la representación de cada uno de los movimientos descritos, junto con la dirección o sentido de estos en el sistema.

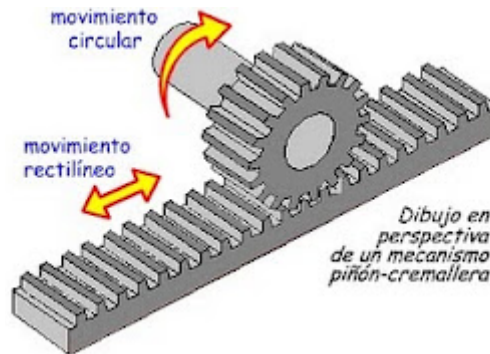


Figura LXVIII. Representación de los movimientos rectilíneo y circular del mecanismo de cremallera piñón

Una vez se seleccionó el mecanismo, se procedió con la búsqueda de alternativas comerciales y catálogos de fabricantes, se encontró en Mercadolibre Colombia, un mecanismo de piñón - cremallera con un precio de 92.000 COP. El piñón y la cremallera tienen 20 y 31 dientes respectivamente, y ambos componentes los venden juntos ya que tienen la misma relación de engranaje, por lo cual se acoplan fácilmente y permiten establecer el movimiento adecuado. Para el horno y el movimiento de los pasadores, no se necesita una cremallera o un piñón de dimensiones específicas ya que solo se requiere movimiento, no transmisión o potencia en el mecanismo, por esta razón, no se adentra mucho en las especificaciones de los componentes o una geometría determinada. Ambas piezas están hechas en acero inoxidable. El mecanismo seleccionado del catálogo comercial pertenece a los que se utilizan en aplicaciones de puertas corredizas, lo cual, en una analogía, es muy similar al sistema de posicionamiento, necesita un mecanismo que impulse el pasador a través de la dirección axial.

En la siguiente tabla se presentan datos acerca de las dimensiones para el piñón y la cremallera, cabe resaltar que con base en estas medidas pertenecientes a la opción seleccionada del mercado, se diseñaron las

piezas en un software de modelado CAD, que más adelante se muestran los diseños.

Tabla LII. Dimensiones de los componentes

Características del elemento de máquina	Dimensiones en mm
Material	Acero inoxidable estándar
Diámetro del piñón	79,58
Número de dientes del piñón	20
Ancho del diente del piñón	3,302
Paso del piñón	9,319
Espesor del piñón	44,07
Diámetro interno del piñón	22,983
Material	Acero inoxidable estándar
Longitud de la cremallera	350
Número de dientes de la cremallera	31
Ancho del diente de la cremallera	2,63
Paso de la cremallera	8,6
Espesor de la cremallera	30
Altura de la cremallera	35,247 mm

Finalmente, después de haber llevado a cabo la selección de cada componente del sistema de posicionamiento del pasador, a continuación se presenta un bosquejo a mano, realizado por el estudiante de ingeniería mecánica, donde se precisa el diseño del mecanismo y la configuración del sistema de sujeción de la muestra que va a ser transportada. Este diseño muestra la posición vertical de la cremallera y el movimiento lineal que debe generar el eje del motor para poder elevar o descender el sujetador cilíndrico que contiene el pasador. El sujetador del pasador está unido mediante tornillos a otros dos ejes que conectan el pasador con un perfil de unión anclado a la cremallera, es decir, cuando la cremallera se mueve, empuja ese perfil de unión, impulsando así hacia arriba o abajo el mecanismo que sostiene al pasador. Este movimiento depende de la dirección de giro del motor según lo requerido en el proceso (calentamiento o enfriamiento). (Ver Figura LXIX).

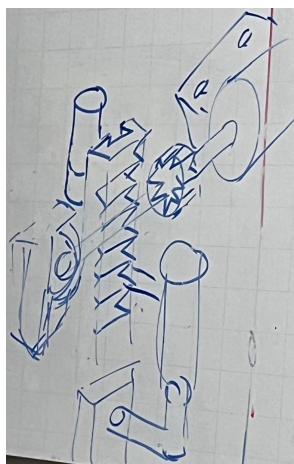


Figura LXIX. Diseño conceptual preliminar del sistema de cremallera y piñón acoplado al movimiento del pasador

En el diseño conceptual preliminar que se presentó anteriormente, se muestra que el sistema de cremallera - piñón junto con el motor se encuentran arriba o por encima del perfil de unión.

En la siguiente figura se muestra un bosquejo conceptual de la estructura del mecanismo encargado de la sujeción de los diferentes pasadores para que se pueda desplazar a través de la dirección axial. Este dibujo fue realizado por el estudiante de Ingeniería Mecánica.

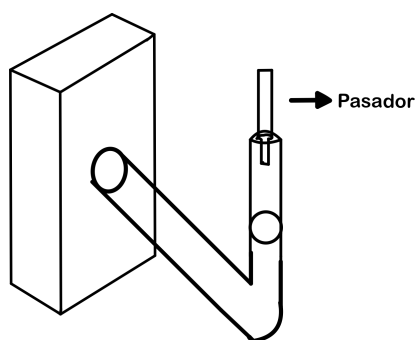


Figura LXX. Bosquejo de la estructura del sistema de sujeción del pasador y su movimiento

El diseño de la **Figura LXX** se diferenció del inicial en que este no tiene los dientes de la cremallera apuntando hacia adentro del mecanismo, ya que al producirse el movimiento lineal, tanto la cremallera como el piñón del motor podrían colisionar con los eslabones del mecanismo. El primer boceto fue un diseño conceptual como primera idea, pero haciendo una revisión más detallada de la configuración del sistema, se producirían problemas en el movimiento entre los componentes. por lo cuál se optó por un rediseño del sistema, en el que se modificó la ubicación del sistema cremallera - piñón.

En la parte trasera del perfil de unión y la cremallera, se encuentra una guía deslizante que permite que la cremallera se desplace linealmente a través de ella, al tiempo que moviliza el perfil de unión que sostiene el mecanismo de sujeción y movimiento del pasador a través del anillo de enfriamiento y de la bobina. Dentro de la guía hay un eje recto acoplado a un pequeño carrito de desplazamiento, este carrito tiene una serie de rodamientos internos, con el fin de permitir el deslizamiento lineal del carrito por toda la longitud de la guía. Este carrito se atornilla a un punto de la cara trasera de la cremallera. Por lo cuál se buscó en catálogos técnicos de referencias comerciales sobre este tipo de guías, para poder ser seleccionada y acoplada al movimiento de la cremallera. En la siguiente figura se muestra la guía deslizante que se seleccionó del mercado.



Figura LXXI. Guía de deslizamiento lineal seleccionada [45]

Las especificaciones técnicas de la guía de deslizamiento lineal que se seleccionó se encuentran detalladas en la siguiente tabla

Tabla LIII. Especificaciones técnicas de la guía de deslizamiento lineal

Producto	Valores
Marca comercial del catálogo	Createc 3D
Referencia	Guía lineal MGN12 1MT
Carro de desplazamiento	MGN12H
Precio	\$119,760 COP
Longitud	500 mm
Ancho	12 mm

Reajuste del sistema de Estructura y chasis del horno

En el semestre 2025-1, se desarrolló la metodología de diseño del horno, donde se enfocó en los hornos que emplean sistemas de calentamiento por inducción para realizar procesos de tratamientos térmicos. Un hallazgo clave fue que en la industria, los hornos para tratamientos térmicos generalmente no están equipados con una estructura cerrada, es decir, la bobina y las piezas a calentar se encuentran expuestas al aire. Esta configuración permite que la bobina esté conectada únicamente a la fuente de alimentación, mientras que el mecanismo que posiciona y mueve el pasador en la dirección axial está soportado por una estructura metálica independiente. Además, si se plantea un diseño hipotético con chasis que recubre el horno, la carga térmica que se genera al calentar el pasador, se disipa en el medio y se debe extraer de donde circula, para evitar la acumulación de calor dentro de un posible chasis. Esto hace que el proceso sea más ineficiente, ya que si el calor generado se acumula en los materiales de la estructura que conforman las paredes del chasis se produce mayor consumo de energía, de tiempo de tratamiento de las piezas y de costos operativos. Al realizar el tratamiento térmico al aire libre, no se acumula calor dentro del horno, evitando la degradación de componentes internos.

En la búsqueda de alternativas industriales para este sistema de posicionamiento y movimiento axial, se encontró un diseño en el que el mecanismo se encuentra al aire libre y no acoplado en el interior de un chasis, se tomó como base un diseño de un artículo perteneciente al estado del arte citado en este estudio. Este diseño se presenta en la siguiente figura.



Figura LXXII. Sistema de posicionamiento y movimiento axial de una muestra en un horno de inducción encontrado en la industria [40]

Además, se llevó a cabo una búsqueda y selección de materiales refractarios y aislantes térmicos adecuados para el mecanismo de movimiento axial. Se consideraron aceros inoxidable, aluminio estructural, aceros al carbono tratados con pintura anticorrosiva, así como aleaciones de titanio, zinc y plata para la estructura del horno. Si se opta por una opción abierta, no serían necesarios los aislantes térmicos, ya que solo se utilizarían en el caso que se necesite cubrir la bobina con una manta de fibra de vidrio.

Con base en la realidad de las industrias que operan con sistemas de calentamiento por inducción y los antecedentes observados, se concluyó que es más viable priorizar el sistema mecánico de posicionamiento y movimiento axial del pasador, en lugar de limitarse principalmente a un chasis que englobe todo el horno, sin restarle importancia al chasis. Esto se debe a que el objetivo principal de un horno en la industria es el proceso de calentamiento y enfriamiento, en sinergia con la fuente de alimentación y el movimiento de diversos componentes. Por lo tanto, el diseño contempla la elaboración del sistema de movimiento y posicionamiento, así como del sistema de enfriamiento de la pieza. Además, se desarrolla la estructura considerando las dimensiones de los componentes anteriores, dado que esta no soporta el cuadro de control ni la fuente de alimentación.

Para el sistema estructural se planteó el diseño de una pared estructural ya sea en perfil en I, C o L para que pueda soportar dos ejes que sostienen el anillo de enfriamiento y también que permita sostener el motor eléctrico que moviliza el mecanismo de piñón - cremallera y la guía de deslizamiento lineal. El objetivo del diseño de detalle de esta pared es permitir el soporte de todo el sistema mecánico, a la vez que la pared tiene en su cara inferior una base anclada al piso mediante 4 pernos, lo que brinda resistencia. Otro componente del sistema estructural es el diseño de un soporte cuadrado que sostiene el tanque de agua y resiste el peso del agua.

El mecanismo de piñón - cremallera permite el movimiento de un gancho sujetador del pasador de forma axial y por tanto, del pasador a través de la bobina, sin embargo, este mecanismo no está vinculado como tal a la posición de la bobina. Seguido de lo anterior, en la siguiente tabla se presentan unos criterios de selección de ingeniería acordes para cada material propuesto en el análisis morfológico acerca del sistema estructural y mecanismo de sujeción y movimiento del pasador.

A continuación, en la siguiente tabla se consignaron los criterios de selección para el material del mecanismo,

Tabla LIV. Criterios de selección del material de la estructura

Material de la estructura	Resistencia la cedencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Desgaste	Precio en COP
Aceros de la serie 300	215 - 300	470	Bajo	10.000 - 15.000/kg
Acero A36	250	400 - 550	Medio	10.000 - 15.000/kg
Acero inoxidable	580 - 750	700 - 900	Bajo	10.000 - 15.000/kg
Aluminio estructural	310 - 350	350 - 400	Bajo	8.000 - 12.000/kg

Aceros al carbono	350 - 550	550 - 700	Medio	5.000 - 8.000/kg
Aleaciones de titanio	900 - 1100	950 - 1200	Muy bajo	20.000 - 25.000/kg

Los datos presentados en la anterior tabla fueron obtenidos de la página Matweb y de catálogos técnicos de materiales metálicos de Homecenter Colombia y Sidoc.

La estructura, debido a su exposición a ambientes húmedos y a una temperatura moderadamente baja, se diseñó con acero 304 de la serie 300, que es de carácter austenítico y acero A36 para las estructuras de soporte o sujeción de las demás piezas.

Finalmente, el diseño mecánico evolucionó hasta tal punto que se realizó un tercer diseño conceptual basado en los requerimientos del cliente y los de ingeniería en respuesta al sistema de posicionamiento y movimiento del pasador en la dirección axial. El bosquejo constituye el diseño mecánico compacto (con dimensiones, cotas, piezas, soportes, estructura y mecanismo) que se dibujó en el software de modelado CAD Onshape (más adelante se presentan los resultados del diseño en 3D). Es importante resaltar que este diseño planteado integra la mayoría de los componentes seleccionados para cada subsistema que conforma el horno, en este diseño no se muestra la fuente de alimentación de la bobina, ni el chiller, ni el tablero de control, debido a que el objetivo de estos componentes es seleccionarlos del mercado, no diseñarlos, por lo cual se importaron sus archivos CAD tomados de repositorios en línea. A continuación, en la siguiente figura se muestra el diseño en detalle compactado.

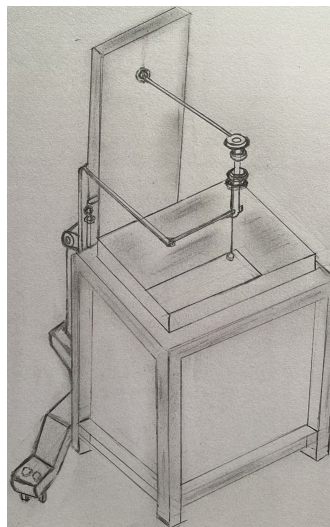


Figura LXXIII. Tercer diseño conceptual preliminar realizado por el estudiante de Ingeniería Mecánica

Una vez seleccionados los elementos que conforman el sistema de posicionamiento y movimiento de la muestra, se procedió a realizar un análisis de la instalación de cada uno de estos elementos, así como también un desglose de costos de todo el sistema, esto permite establecer que tan rentable es para la empresa el proceso de diseñar, seleccionar, adquirir e instalar cada una de las alternativas propuestas anteriormente.

Instalación y costos del sistema de posicionamiento y movimiento del pasador

Una vez se realizó la selección del sistema mecánico más adecuado, se planteó un escenario hipotético similar al de los otros subsistemas (calentamiento, enfriamiento y control), en el que la empresa Cadenpal adquiere el sistema y cubre su instalación en planta a partir de la contratación de un servicio. Esto permitió detallar los costos de instalación y comparar entre la opción de la compra del horno o si es más factible diseñar el equipo y seleccionar cada subsistema y sus componentes. Este análisis facilitó la evaluación de ambas alternativas para escoger la mejor opción en términos de costos, producción y eficiencia energética y operativa.

Para el servicio de instalación, se consultó a la empresa Montaval Ingeniería S.A.S, esta es una empresa colombiana dedicada al sector de instalaciones eléctricas, de construcciones, de automatización, provee servicios de metalmecánica (soldadura, procesos de maquinado, ensamble) y mantenimiento de los equipos en las industrias a nivel nacional. La consulta que se le realizó a la empresa fue acerca de las consideraciones que tienen al momento de realizar una instalación de una estructura mecánica, en este caso, a la empresa se le explicó en detalle el contexto del proyecto y la funcionalidad del mecanismo planteado. Luego de esto, las consideraciones fueron

las siguientes:

- Tamaño del espacio en la planta donde se va a ubicar el mecanismo
- Dimensionamiento y levantamiento de planos de la estructura
- Realización de cálculos de resistencia de materiales y de uniones atornilladas
- Diseño mecánico en un software CAD 3D
- Tiempo de búsqueda, selección y costo de adquisición de componentes (piñón, cremallera y motor, pared estructural, soportes, ejes, etc)
- Costo y tiempo de los procesos de mecanizado que se le deben aplicar a las piezas metálicas de la estructura
- Costo de transporte de las piezas
- Viáticos de dos técnicos expertos en ensambles mecánicos y montajes eléctricos (para el motor del piñón-cremallera)
- Tiempo de instalación en la planta
- Cantidad de días usados para puesta en marcha
- Pruebas de funcionamiento
- Entrega de documentación al cliente

Una vez la empresa experta en el área proporcionó la información acerca de las consideraciones para un adecuado proceso de instalación del mecanismo en la planta, la empresa entregó una cotización final por todo este servicio, cuyo valor fue de \$7.141.600 COP. En este valor se tomaron los tiempos de trabajo, esfuerzo, inversión, ingenio, desplazamiento y cantidad de días establecidos para la ejecución del proyecto (18 días).

Costo final del diseño y selección de equipos que integran el proceso de tratamiento térmico

El costo total de todo lo que implica el desarrollo de Ingeniería mecánica de este proyecto, que involucra desde la concepción, cálculo y diseño, hasta la selección, adquisición e instalación de componentes se puede detallar en la siguiente tabla que reúne todos los costos finales de cada subsistema.

Tabla LV. Costo final del diseño y selección de equipos para el proceso de T.T

Subsistema	Costo final en COP
Sistema de Monitoreo y Control	\$22.089.086
Sistema de Calentamiento	\$17.631.300
Sistema de Enfriamiento	\$20.554.000
Sistema de Posicionamiento y Movimiento del pasador	\$7.141.600
Costo final del diseño mecánico	\$67.415.986

Diseño en detalle

Modelado CAD de los componentes del mecanismo en Onshape

En cumplimiento con el objetivo de diseñar el mecanismo de posicionamiento y movimiento del pasador en la dirección axial, se realizó un modelado en 3D de cada componente del sistema en el que se utilizó el software online Onshape. Durante el proceso, se llevó a cabo el dimensionamiento de las piezas. La creación de dibujos y bocetos preliminares en papel permitieron definir con mayor precisión las geometrías específicas de cada

componente del mecanismo. Fue en este proceso que se avanzó del diseño conceptual al diseño en detalle.

La simulación en 3D tiene una gran ventaja en el diseño mecánico debido a que permite someter a prueba el diseño realizado, los cálculos y las consideraciones en cuanto a materiales, restricciones de espacio y cargas.

A lo largo del período que comprende el desarrollo del diseño, se abordaron muchas validaciones en las consideraciones, no solo de las dimensiones de las piezas, sino de materiales, cargas y costo de los materiales en el escenario de un diseño y fabricación real. En el caso de los materiales de los eslabones del mecanismo que sujetan y movilizan el pasador, en el software, se asignaron materiales metálicos.

Piezas que se diseñaron

En esta sección se presentan, a continuación, las piezas del horno que fueron diseñadas a partir del uso del software para modelado en 3D “Onshape”. Para cada una de las subsecciones de cada pieza, se especificaron descripciones y usos de las piezas, los materiales asignados a cada una, sus dimensiones, los anexos de planos y cálculos, y, las consideraciones de diseño para la justificación de las geometrías y ensamblajes, en cumplimiento con los requerimientos del cliente.

Anillo de enfriamiento

En primer lugar, se diseñó en Onshape el pasador y el anillo de enfriamiento, con los orificios y el canal interno por donde fluye el agua. El anillo se diseñó con las mismas dimensiones del seleccionado en la Figura LVII. En la cara exterior del anillo se hizo una perforación externa separada para distribuir la presión y establecer la conexión a las tuberías que suministran el agua de enfriamiento proveniente del chiller. Para esta pieza también se diseñaron dos orificios (Ver **Figura LXXIV**) en la unión entre los ejes de sujeción del anillo con una pared estructural que sostiene al mecanismo. Y, finalmente se diseñó una ranura alrededor de su circunferencia exterior con el fin de que no cubra los orificios de las tuberías (Ver **Figura LXXV**). Con esto se garantiza que la pieza se pueda sujetar mediante los dos ejes y que no se interrumpa el flujo de agua por las tuberías conectadas al anillo. En la cara interior se diseñaron 35 orificios circulares que permiten la salida del caudal de agua directamente en la región circular de la pieza a enfriar.

En el software, se especificó que el material del anillo es acero inoxidable 410, debido a que presenta una alta resistencia a la corrosión, por lo tanto, con el fin de presentar una visualización o apariencia más real de la pieza, se modificó el color a una tonalidad más grisácea y brillante, típica del acero seleccionado. En la siguiente figura se presenta el CAD de la pieza en cuestión. Los planos de esta pieza se pueden encontrar al final de este documento en el **Anexo 5**.

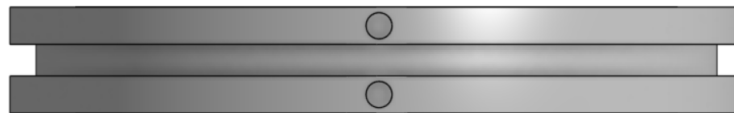


Figura LXXIV. Vista frontal de los dos orificios de sujeción a los ejes

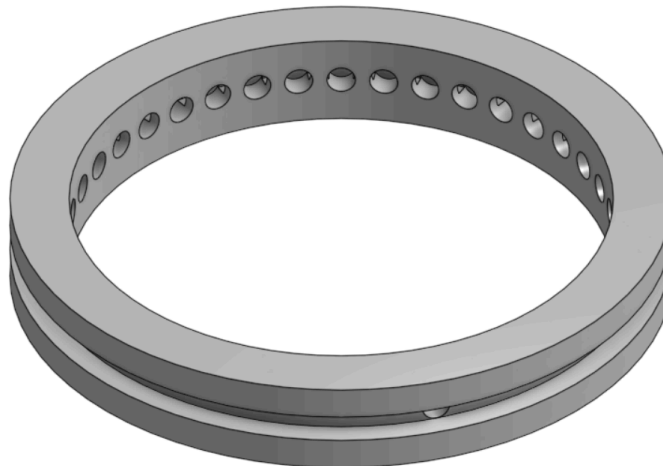


Figura LXXV. Vista isométrica del anillo de enfriamiento

Pasador con anillo de enfriamiento

A continuación, se presenta el ensamble entre el pasador y el anillo de enfriamiento. El pasador es una pieza larga con similitud a un eje de geometría escalonada. En la figura se muestra la configuración de la manera en la que los chorros de agua de enfriamiento al salir por los orificios internos del anillo, bañan la superficie del pasador alrededor de los 360° para producir su enfriamiento. En el software, se asignó el acero 4140 como material del pasador, el cual se seleccionó a partir de la librería de materiales disponible en Onshape, y también se le aplicó una tonalidad similar a la del pasador real. Los planos de esta pieza se pueden encontrar al final de este documento en el **Anexo 6**.

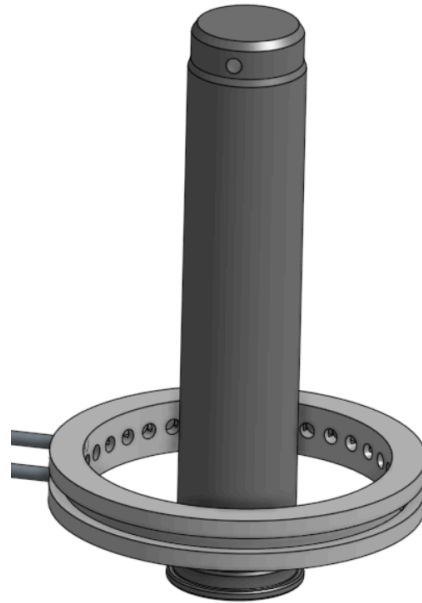


Figura LXXVI. *Diseño CAD del ensamble entre el pasador y el anillo de enfriamiento*

Para el tanque de agua del tratamiento térmico, se realizaron las dos perforaciones de 35 milímetros de diámetro encargadas de la conexión a las tuberías de desagüe. Por otro lado, también se hicieron cuatro perforaciones de 20 milímetros de diámetro en la cara interior de abajo del tanque, esto con el fin de ensamblar el tanque con el soporte mediante tornillos. En el software, se especificó que el material del tanque es aluminio 6061. A continuación se presenta una visualización del tanque que recibe el agua del temple. Los planos de estas piezas se pueden encontrar al final de este documento en el **Anexo 7** y **Anexo 8** respectivamente.

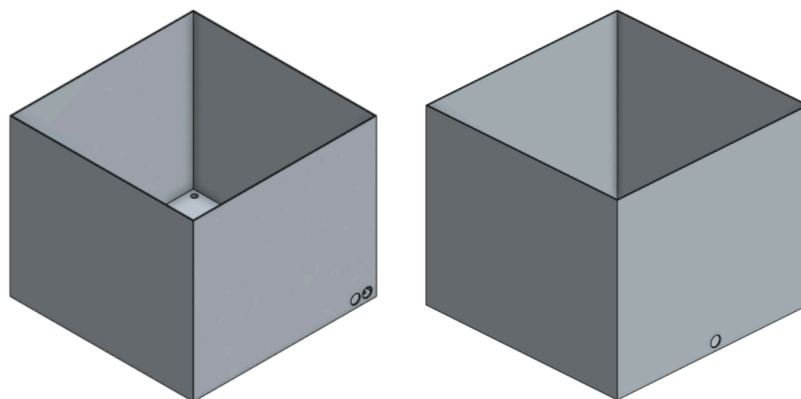


Figura LXXVII. *A.) Diseño CAD del tanque de agua de caída de T.T - B.) Diseño CAD del depósito de agua de la planta*

En el software Onshape, se duplicaron las piezas pertenecientes al tanque de agua y el soporte, con el fin de establecer ese sistema duplicado como el tanque de reserva de agua que tiene la planta para el suministro de agua al chiller, y, a su vez, este tanque externo recibe el agua del tratamiento térmico proveniente del tanque principal, este depósito se encuentra en una ubicación más próxima del chiller. Cabe mencionar que el único

cambio que se realizó en el diseño del tanque de reserva fue que solo se le hizo un orificio de salida centrado para la conexión a la bomba de succión y descarga hasta el chiller.

Consideraciones en el diseño del soporte del tanque de agua

Un análisis de espacio determinó que el tanque no podía colocarse directamente sobre el suelo, ya que este es irregular, lo que provocaría inestabilidad, posibles pérdidas de agua y un mayor desgaste del material debido a la fricción constante. Además, el recipiente estaría sometido a altos esfuerzos cortantes y flectores por la caída de caudal de agua durante el proceso de templado. Por ello, se diseñó un soporte metálico de acero ASTM A36 con una plancha ubicada ligeramente por debajo de la mitad de su longitud, que soporta mecánicamente el peso del tanque lleno. En las esquinas del tanque y en el soporte se realizaron pequeñas perforaciones para facilitar uniones atornilladas, asegurando que el tanque no se afloje ni se mueva. Asimismo, el tanque se apoya en una estructura metálica que lo aísla del suelo y le proporciona apoyo lateral, conformada por perfiles tipo cúbico huecos en los laterales y una placa inferior, tal como se muestra en la **Figura LXXVIII**.

La razón de la selección del acero ASTM A36 como material del soporte del tanque fue debido al valor de su resistencia a la cedencia (S_y), ya que es de 250 MPa. Se realizaron cálculos de resistencia mecánica debido a los esfuerzos a los que está sometida la plancha del soporte del tanque, los esfuerzos lo producen el peso del tanque más el agua, estos cálculos se realizaron con el fin de someter a prueba de que el diseño mecánico cumpla con lo requerido, y también es necesario validar que la selección adecuada del área de diseño y el perfil del soporte cumplieran con la condición de límite a la cedencia del acero ASTM A36. Para comprender en mayor detalle se recomienda ver los cálculos de la **Ecuación 14** y **15**. Los planos de esta pieza se pueden encontrar al final de este documento en el **Anexo 9**.

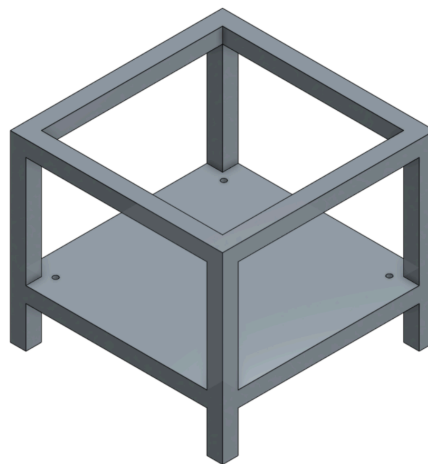

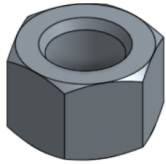


Figura LXXVIII. Diseño CAD del soporte de metal que sostiene el tanque de agua

El soporte tiene 4 orificios roscados que permiten la unión entre esta pieza y el tanque de agua, para esto, en la siguiente tabla se especificaron las características de los tornillos utilizados en esta unión.

Tabla LVI. Especificaciones técnicas de cada uno de los elementos de unión roscada usados entre el soporte y el tanque de agua

Características	Tornillos de unión entre el tanque de agua y el soporte	Tuercas de unión entre el tanque de agua y el soporte
Referencia	Estándar ISO Grado C 7412	Estándar Nut ISO 4034
Diámetro	M16	M16
Longitud (mm)	90	16
Longitud del hilo (mm)	90	16
Paso de rosca	2	2

(mm)		
Cantidad	4	4
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Cara de soporte	Lisa	Plana
Imagen de uno de los tornillos		

Cálculo de la resistencia mecánica de la plancha que soporta el tanque de agua

En términos de cálculos de esfuerzos mecánicos que debe soportar la estructura que contiene al tanque de agua se tiene que:

Para calcular el volúmen del tanque cuando está vacío se aplica la siguiente ecuación

(Ecuación 23)

$$V_{Exterior} = 0,7 * 0,7 * 0,6 m = 0,294 m^3$$

$$V_{Interior} = 0,694 * 0,694 * 0,59 m = 0,284 m^3$$

El valor de $0,284 m^3$ también corresponde al volúmen de agua en el caso que el tanque se llene por completo

$$0,284 m^3 * 1000 = 284 L$$

El volúmen total del material (Paredes del tanque hueco) es:

$$V_{Exterior} - V_{Interior} = 0,294 m^3 - 0,284 m^3 = 0,01 m^3$$

Seguido de lo anterior, se procedió a calcular la masa del agua

$$m = V * \rho$$

$$m = 0,284 m^3 * 1000 \frac{kg}{m^3} = 284 kg$$

Luego se calculó la masa del tanque vacío (del material)

$$\text{Densidad del aluminio 6061} = 2700 \frac{kg}{m^3}$$

$$m = 0,01 m^3 * 2700 \frac{kg}{m^3} = 27 kg$$

Teniendo ya la masa del agua y del tanque vacío, se calculó la masa y el peso total del sistema

$$m = 27 kg + 284 kg = 311 kg$$

$$m = 311 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3050,91 \text{ N}$$

El valor que se obtuvo corresponde a la fuerza ejercida del sistema de tanque lleno de agua hacia el soporte

Por otro lado, las dimensiones de la tabla de soporte son (Ancho = 700 mm), (Largo = 700 mm), (Espesor = 60 mm)

Por lo cuál, el área total de la tabla de soporte es 490.000 mm^2

Entonces, se calculó la presión que ejerce todo el sistema de tanque sobre la tabla

(Ecuación 24)

$$\sigma = \frac{3050,91 \text{ N}}{490.000 \text{ mm}^2} = 6,23 * 10^{-3} \text{ MPa} \rightarrow \text{Presión ejercida del tanque y el agua al soporte}$$

Al observar el valor obtenido en la última ecuación, se evidencia que el esfuerzo que le aplica el sistema de tanque de agua completamente lleno no representa un valor que se acerque en lo más mínimo al límite de cedencia del acero ASTM A36, recordemos que su valor es de 250 MPa. Por lo cuál, este acero es muy resistente a los impactos y cargas, tiene muy buenas propiedades mecánicas, así como también, una estructura rígida y tenaz. Lo anterior valida el diseño que se propuso para la estructura de soporte del tanque de agua.

Por otro lado, para el cálculo del esfuerzo se utilizó el área transversal del soporte del tanque, con el grosor de la lámina o tabla que soporta el tanque, el área es $60 \text{ mm} * 700 \text{ mm} = 42000 \text{ mm}^2$

$$\sigma = \frac{3050,91 \text{ N}}{42000 \text{ mm}^2} = 0,0726 \text{ MPa}$$

Finalmente, se calculó el factor de seguridad, teniendo en cuenta el valor de la resistencia a la fluencia del acero 316 y la carga ejercida por el pasador. Este cálculo se realizó a partir de la siguiente ecuación.

(Ecuación 25)

$$FS = \frac{250 \text{ MPa}}{0,0726 \text{ MPa}} = 3441 \text{ (vida infinita)}$$

El soporte del tanque resiste en gran medida la carga que le ejerce el tanque más el peso del agua, esto sucede debido al grosor o espesor del área transversal del soporte del tanque, sumado al alto valor de la resistencia a la cedencia (S_y) del material del soporte.

Cálculo de la resistencia mecánica de los tornillos de la unión entre el tanque de agua y el soporte

Para el cálculo de la resistencia mecánica hacia las cargas aplicadas en uno de los tornillos del tanque de agua se aplica la teoría y fórmulas de uniones no permanentes del curso Elementos de Máquinas, especialmente la rigidez del sujetador para el caso de tuerca sin arandela. Estas uniones tienen cargas de tensión a lo largo de su longitud, por lo cuál es indispensable tener en cuenta el tipo de unión y el tamaño de los espesores de los materiales, en este caso, el espesor del tanque (10 mm) junto con el de la estructura de soporte (60 mm). Estos espesores se obtuvieron a partir de los planos de las piezas en el software. Seguido de esto, se realizó el cálculo de la rigidez del sujetador. En la siguiente figura se puede observar una vista en sección de la unión entre el tornillo y el sujetador o tuerca a través de los espesores de los materiales.

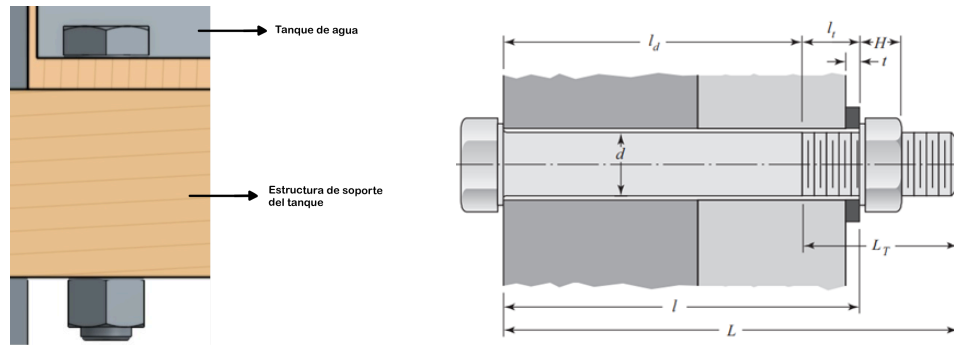


Figura LXXIX. Vista de la unión del tornillo y la tuerca entre los espesores de los materiales

A continuación en la **Tabla LVI** se muestran las variables necesarias para poder calcular la resistencia de un tornillo y los factores de seguridad (de sobrecargas o fatiga y fluencia) respectivamente, a su vez, en la segunda columna de la tabla se muestran las fórmulas para obtener el cálculo de dichas variables ya sea por una expresión o ya sea según las siguientes condiciones de la pieza:

- Sistema internacional de unidades
- Unión no permanente ($0.75 \cdot S_p$)
- Diámetro 16 mm
- Longitud 90 mm
- Para hallar la longitud L_t se usa la fórmula $2d + 6$ debido a que $L \leq 125 \text{ mm}$ y $d \leq 8 \text{ mm}$
- El área de esfuerzo de tensión se encuentra en la tabla según el diámetro nominal

Tabla LVII. Parámetros y resultados para el cálculo de cargas y esfuerzos aplicados en los tornillos del soporte del tanque de agua

Parámetros	Fórmulas	Resultado
l	Espesor de todo el material apretado entre la cara del perno y la cara de la tuerca	70 mm
L	$L > l + H$	84,8
Ad	$\pi * r^2$	201,06 mm ²
LT	$2d + 6$	38 mm
ld	$L - l_t$	46,8 mm
l_t	$l - l_d$	23,2 mm
At	Por tabla	157 mm ²
E	Literatura del material	210 GPa
kb	$\frac{(Ad \cdot At \cdot E)}{(Ad \cdot l_t) + (At \cdot l_d)}$	181,059 kN/mm
km	$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$	$5,38 \cdot 10^{-4} \text{ kN/mm}$
C	$\frac{k_b}{k_b + k_m}$	0,9999
Sp	Por tabla	600 MPa
Fp	$At \cdot Sp$	94200 N

Fi	$0.75 * Sp$	3050,91 N
P	$\frac{R1}{R2} * F1$	36 N
Nb (fluencia)	$\frac{Sp * At}{(C * p) * Fi}$	1.278
NL (sobrecarga) Fatiga	$\frac{Sp * At - Fi}{C * P}$	7,719

La tabla presentada muestra todos los cálculos que se realizaron para el análisis de la carga a la que está sometido uno de los tornillos del soporte del tanque, esto determina si se seleccionó el correcto o si el diseño es el adecuado y el sistema permite soportar la carga proveniente del tanque de agua, como se pudo observar al final de la tabla, se muestran los valores del factor de seguridad a fluencia y a fatiga que tiene el tornillo. Estos resultados evidencian que el tornillo cumple a vida infinita su ciclo de trabajo y debido a cargas alternantes. Los cálculos se desarrollaron en unas hojas de resultados aparte y se utilizaron también fórmulas de Excel. Estos cálculos se pueden encontrar en el **Anexo 23**.

Pared de soporte del mecanismo

Se diseñó una rígida pared en acero 304 que actúa como estructura de apoyo para sostener el anillo de enfriamiento. Se escogió este tipo de acero de la serie 300 debido a su gran resistencia mecánica ya que es esta pieza que soporta mediante un pequeño acople tipo plancha de forma rectangular el motor con el piñón y también soporta la guía de deslizamiento lineal que permite que se desplace la cremallera. La pared también brinda soporte a una pequeña plancha en L atornillada a una cara lateral de la pared, esta plancha se diseñó para proteger la guía, la cremallera y el perfil de unión contra caídas.

En la cara posterior de la pared, hay una pequeña unión en L, que ensambla mediante 5 tornillos el planchón rectangular donde se encuentra ubicado el motor con la pared. Esta estructura cuenta en total con 16 perforaciones de tornillos. Esta pieza constituye el eje fundamental del horno, da soporte a todo el mecanismo de posicionamiento y movimiento axial de los pasadores. Los planos de esta pieza se pueden encontrar al final de este documento en el **Anexo 10**.

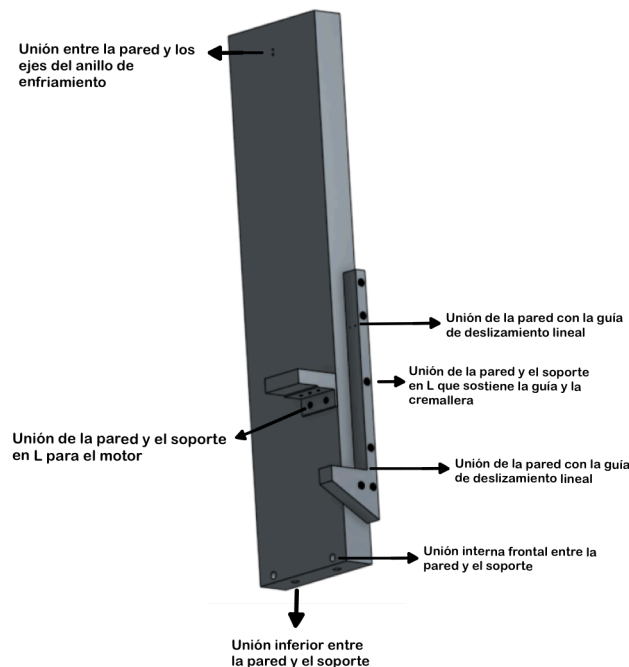





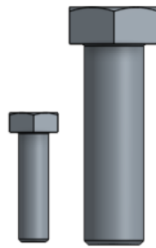


Figura LXXX. Vista isométrica de la pared estructural junto con sus partes de unión detalladas

Elementos de unión roscados para la sujeción entre la pared estructural y soportes externos

En la siguiente tabla se presentan las especificaciones técnicas de los elementos de unión roscada utilizados para la pared, tanto en su unión con el soporte que se ancla al piso de la planta, como con los dos perfiles en L tanto para el motor, como para el mecanismo, los cuatro orificios para la unión con la guía de

deslizamiento lineal, y finalmente, los dos ejes que sostienen el anillo de enfriamiento. La **Figura LXVIII** muestra en detalle las partes de la pieza y sus orificios roscados, con el fin de comprender mejor la ubicación de las uniones descritas a continuación.

Tabla LVIII. Especificaciones técnicas de cada uno de los elementos de unión roscada usados en la pared estructural

Características	Tornillos de unión entre la pared y los ejes del anillo de enfriamiento	Tornillos de unión interna frontal con el soporte	Tornillos de unión inferior entre la pared y el soporte	Tornillos de unión entre la pared y el soporte en L para el motor	Tornillos de unión entre la pared y el soporte en L para la guía y cremallera	Tornillos de unión entre la pared y la guía de deslizamiento lineal
Referencia	Estándar ISO Grado B 4015	Estándar ISO Grado C 7412	Estándar ISO Grado C 7412	Estándar ISO Grado B 4015	Estándar ISO Grado B 4015	Estándar ISO Grado B 4015
Diámetro	M3	M20	M20	Superiores: M8 Inferiores: M16	M20	M3
Longitud (mm)	20	150	60	Superiores: 30 Inferiores: 55	80	20
Longitud del hilo (mm)	20	150	60	Superiores: 30 Inferiores: 55	80	20
Paso de rosca (mm)	2	2	2	2	2	2
Cantidad	2	2	2	Superiores: 3 Inferiores: 2	6	4
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero Inoxidable	Acero Inoxidable	Acero Inoxidable	Acero Inoxidable
Cara de soporte	Lisa	Lisa	Lisa	Lisa	Lisa	Lisa
Imagen de uno de los tornillos usados						

Pieza anclada al piso como soporte de la pared estructural

Para darle apoyo a la pared, se diseñó un soporte que va anclado a la cara inferior de la pared mediante una ranura. Como se puede observar en la figura, esta estructura cuenta con varias perforaciones roscadas de paso 2 mm, tanto en su centro como en los apoyos laterales, con el fin de establecer uniones atornilladas. Los orificios de los costados son especialmente para pernos que van anclados al piso, este soporte ya entra en contacto directo con el suelo de la planta. A esta pieza también se le asignó como material el acero inoxidable 304, ya que tiene la capacidad de resistir mecánicamente el peso que le aplica toda la pared más el mecanismo, los perfiles y el motor hacia la cara superior del soporte, este material tiene un módulo de elasticidad de 200 GPa y una resistencia a la cizalladura de 690 MPa. Es importante recordar que este material es muy útil para este diseño debido a su alta resistencia a la corrosión y al desgaste. Los planos de esta pieza se pueden encontrar al final de este documento en el **Anexo 11**.

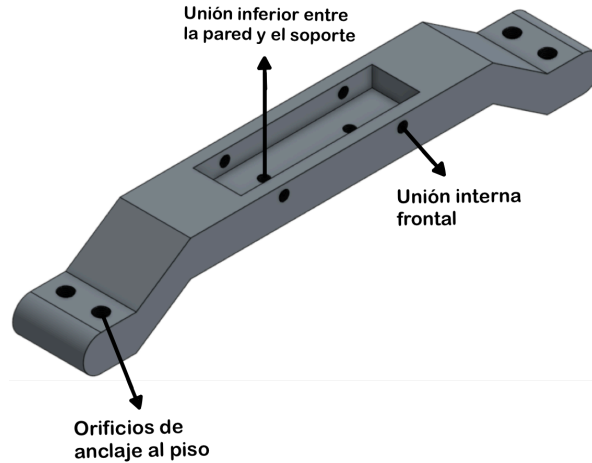


Figura LXXXI. Diseño CAD del soporte de la pared junto con sus partes de unión detalladas

Elementos de unión roscados para la sujeción entre el soporte, pared estructural y piso de la planta

En la siguiente tabla se encuentran las especificaciones técnicas de los elementos de unión roscada que se utilizaron para el soporte, tanto en su unión con la pared, como con su anclaje al piso. La **Figura LXIX** muestra en detalle las partes de la pieza y sus orificios roscados, con el fin de comprender mejor la ubicación de las uniones descritas a continuación.

Tabla LIX. Especificaciones técnicas de cada uno de los elementos de unión roscada usados entre el soporte, pared y piso.

Características	Tornillos de anclaje al piso	Tornillos de unión interna frontal	Tornillos de unión inferior entre la pared y el soporte	Tuercas para la unión interna frontal
Referencia	Estándar ISO Grado C 7412	Estándar ISO Grado C 7412	Estándar ISO Grado C 7412	Estándar ISO Grado C 4034
Diámetro	M27	M20	M20	M20
Longitud (mm)	130	150	60	19
Longitud del hilo (mm)	130	150	60	17
Paso de rosca (mm)	2	2	2	2
Cantidad	4	2	2	2
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero Inoxidable	Acero Inoxidable
Cara de soporte	Lisa	Lisa	Lisa	Lisa
Imagen de uno de los tornillos				

Los elementos de sujeción roscada se importaron en el software mediante el uso de una herramienta de

elementos mecánicos de contenido estandarizado, como tuercas, pernos, tornillos, arandelas, sujetadores. En esta herramienta es posible seleccionar el estándar requerido para las piezas, establecer sus dimensiones, asignar materiales y configurar los parámetros de la rosca. Lo mencionado anteriormente también depende de cómo estén distribuidos los tornillos en el diseño mecánico, para poder soportar la carga a la que van a estar sometidos.

Ejes de soporte para el anillo de enfriamiento

Se diseñaron dos ejes de acero A36 que se encargan de la sujeción del anillo de enfriamiento, estos se encuentran unidos mediante dos tornillos a la pared estructural principal, lo que hace que se comporten como una viga empotrada. El anclaje a este soporte le da libertad de movilidad al anillo, resistencia y fijación en sus coordenadas de posición. A diferencia del acero 304, se utilizó el A36 para disminuir un poco el costo y el peso del sistema, pero aun así se cumple con los requerimientos mecánicos de soporte, debido a que el material de los ejes de soporte tiene un módulo de elasticidad muy alto, de 200 GPa, por lo cuál, soporta altas cargas, y a su vez, el peso del anillo de enfriamiento no exceda la carga máxima que puede soportar el eje (Sy acero A36 = 250 MPa). Los planos de esta pieza se pueden encontrar al final de este documento en el **Anexo 12**.



Figura LXXXII. Vista del ensamblaje entre los dos ejes de soporte con el anillo de enfriamiento

Sistema de ejes que sujetan el pasador y soportan la carga de la pieza y el mecanismo

Para soportar el pasador se diseñó un sistema de tres ejes rectos con doble perforación para cada uno, las perforaciones son roscadas, para permitir atornillar a los ejes entre sí a través de sus extremos. El material que se le asignó a esto 3 ejes fue el acero inoxidable 316, ya que a diferencia de otras piezas del horno, este sistema de ejes está expuesto constantemente a la caída de agua, como ya se ha mencionado anteriormente, el acero 316 tiene una gran resistencia contra la corrosión y ambientes químicos erosivos, también da una buena resistencia mecánica y soporte estructural.

A continuación, en las siguientes figuras se presentan los 3 ejes del sistema, que se atornillan entre sí y se ensamblan con el perfil de unión y con el gancho de soporte del pasador.



Figura LXXXIII. Vista isométrica del eje primario que soporta el pasador (Ver planos en el anexo 13)

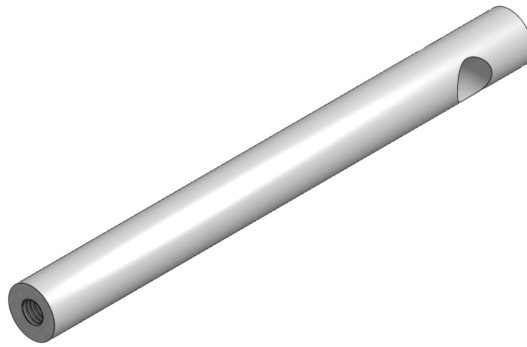


Figura LXXXIV. Vista isométrica del eje secundario del sistema de ejes (Ver planos en el anexo 14)

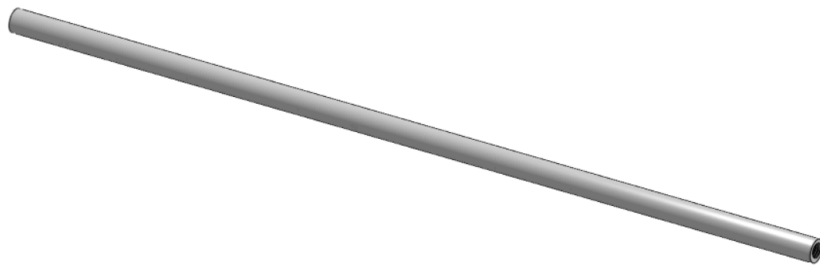


Figura LXXXV. Vista isométrica del eje terciario del sistema de ejes (Ver planos en el anexo 15)

Gancho de soporte del pasador

Se diseñó un soporte que funciona como enganche o sujetador del pasador. Como se muestra en la siguiente figura, el gancho cuenta con cuatro acoples rectangulares que aseguran la parte inferior escalonada del pasador. Este gancho tiene una forma similar a un tornillo y a las mordazas de un torno, que sujeta el pasador como una especie de centro punto, lo anterior permite que el gancho pueda acoplarse en una perforación roscada y unirse al eje primario que soporta el sistema de ejes en L que se encargan del movimiento axial del pasador. La conexión roscada entre el gancho y el eje permite sostener el ensamble de manera segura, a la vez que soporta el pasador, lo que simplifica el diseño al evitar piezas adicionales o geometrías complejas, y proporciona resistencia mecánica del peso del pasador. Durante el proceso de tratamiento térmico, el tornillo del gancho siempre se encuentra fijo al eje primario, lo que reduce el proceso a solamente montar y desmontar el pasador, no se necesita desatornillar ningún eje del mecanismo.

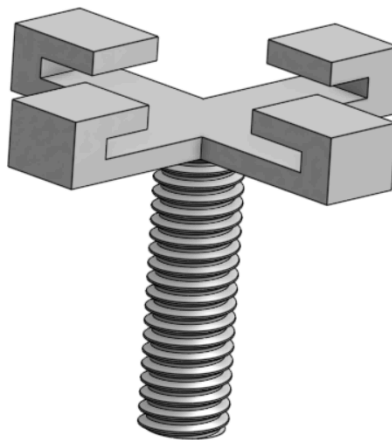


Figura LXXXVI. Vista isométrica del gancho que sujeta el pasador (Ver Anexo 16)

La parte escalonada del pasador representa una pequeña parte del pasador que no requiere que reciba el tratamiento térmico, ya que el alcance deseado del tratamiento térmico es que se pueda efectuar a lo largo de toda la longitud recta cilíndrica de la pieza y no de las partes escalonadas. Los 4 acoples rectangulares del gancho se diseñaron con base en una tolerancia métrica de $-0,1$ mm, lo que permite que el pasador ingrese a los sujetadores

a con un poco de presión, sin llegar al punto de aplicar demasiada fuerza o que por el contrario, la muestra pueda quedar floja o inestable en su ensamble con el gancho, lo anterior se presenta en la **Figura LXXIV**.

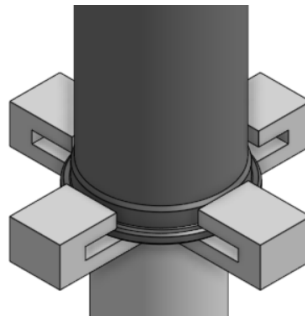


Figura LXXXVII. Vista isométrica del pasador sujetado por el gancho

El peso del pasador se convierte en una fuerza ejercida sobre el sistema de ejes no excede el límite de fluencia del acero 316 ($S_y = 207 \text{ MPa}$), para entender la razón de esta conclusión se recomienda ver la siguiente sección de **cálculos de esfuerzo normal, o presión ejercida hacia el gancho**.

Cálculo del esfuerzo normal que ejerce el pasador hacia el gancho que lo soporta

Se realizó un cálculo de esfuerzo normal o axial que el pasador ejerce hacia la cara superior del gancho que lo soporta junto con el eje primario, este cálculo es fundamental para validar el diseño del gancho y del eje primario de soporte, para esto se debe calcular el área efectiva de contacto entre el gancho y el pasador, debido a que esta es una pieza irregular, se deben hacer ciertas determinaciones para el área. Para comprender mejor esto, en la siguiente figura se muestra el croquis de la vista superior del gancho de soporte del pasador para el cálculo del área efectiva de esfuerzo.

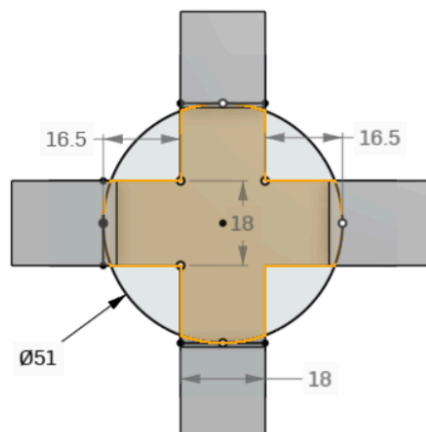


Figura LXXXVIII. Croquis de la vista superior del gancho de soporte del pasador para el cálculo del área efectiva de esfuerzo

En primer lugar se calculó el área que ocupa la circunferencia más grande del pasador cuando se encuentra encima del gancho. En este punto no se calculó el área de la circunferencia, sino de todo el rectángulo que ocupa, incluso las partes expuestas al aire libre.

$$\text{Diámetro de la circunferencia} = 51 \text{ mm}$$

$$\text{Área total que ocupa el pasador} = \pi \times (25,5 \text{ mm})^2$$

$$\text{Área total que ocupa el pasador} = 2042,82 \text{ mm}^2$$

En segundo lugar se calculó el área de la parte sombreada en naranja del croquis presentado, esa parte representa el espacio o área efectiva de contacto entre el gancho y la muestra. Para esto se calculó el área del

rectángulo principal y se sumaron las áreas de los dos rectángulos restantes, es decir:

$$\text{Área del rectángulo principal de la zona sombreada} = 51 \text{ mm} * 18 \text{ mm}$$

$$\text{Área del rectángulo principal de la zona sombreada} = 918 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área de un rectángulo pequeño restante} = 16,5 \text{ mm} * 18 \text{ mm}$$

$$\text{Área de un rectángulo pequeño restante} = 297 \text{ mm}^2$$

Ya que son dos rectángulos iguales, se duplica el valor que se acaba de calcular, por lo cuál el área total de los dos rectángulos pequeños es 594 mm^2

Seguido de lo anterior, se suman el área del rectángulo grande principal con el área total de los 2 rectángulos laterales.

$$\text{Área total de la región sombreada (área de contacto entre las piezas)} = 918 \text{ mm}^2 + 594 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área total de la región sombreada (área de contacto entre las piezas)} = 1512 \text{ mm}^2$$

Una vez se obtuvo el valor del área efectiva de contacto entre la superficie del gancho y la cara inferior del pasador, se procedió a calcular el esfuerzo normal al que está sometido el gancho producto de la carga axial que le genera el pasador.

Recordemos que el pasador más crítico tiene una masa de 3,53 kg y un peso de 35 N, este último valor representa la fuerza o carga axial que ejerce sobre la superficie del gancho, así que se tiene la siguiente ecuación

(Ecuación 26)

$$\sigma = \frac{35 \text{ N}}{1512 \text{ mm}^2} = 2,3 * 10^{-2} \text{ MPa}$$

El esfuerzo que se calculó en la ecuación anterior, representa un esfuerzo axial de compresión demasiado bajo, esto se debe a que el pasador realmente no es una pieza grande ni pesada, su masa es de apenas 3,53 kg y su longitud es de 220 mm, por lo cuál no representa un verdadero riesgo mecánico de fatiga al gancho ni al soporte del sistema de ejes. Por lo cuál, también se puede concluir que el diseño mecánico realizado cumple con los criterios de operación del sistema y las demanda de carga que debe soportar la pieza.

Finalmente, se calculó el factor de seguridad por esfuerzo normal o axial, teniendo en cuenta el valor de la resistencia a la fluencia del acero 316 y la carga ejercida por el pasador. Este cálculo se realizó a partir de la siguiente ecuación.

(Ecuación 27)

$$FS = \frac{207 \text{ MPa}}{2,3 * 10^{-2} \text{ MPa}} = 9000 \text{ (vida infinita)}$$

Análisis mecánico del sistema de 3 ejes que movilizan el pasador en dirección axial

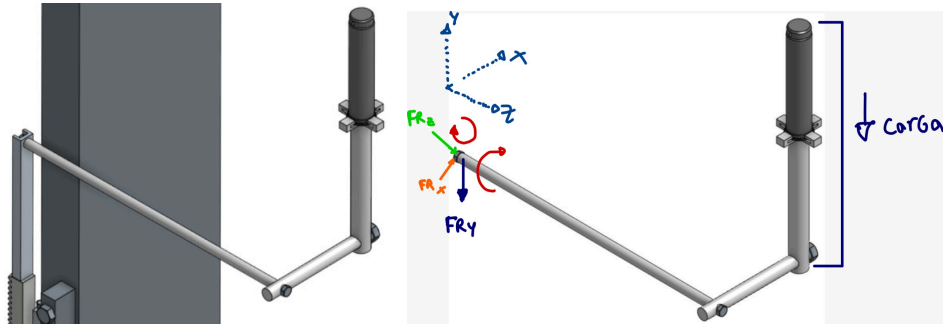


Figura LXXXIX. A) Vista de la parte más crítica del sistema mecánico diseñado para los ejes para el movimiento axial del pasador B) Diagrama de cuerpo libre del sistema de ejes

Se realizaron cálculos de estática, mecánica de sólidos, esfuerzos, resistencia de materiales y factores de seguridad para este sistema mecánico presentado, estos cálculos permitieron validar el diseño realizado y que se cumpla con la resistencia requerida. Estos cálculos se pueden observar con mayor detalle en el **Anexo 24**. En el anexo se presenta todo el desarrollo y la justificación de las medidas, el diseño, los materiales escogidos, los resultados obtenidos y las consideraciones que se tuvieron en cuenta para el diseño. Se analizaron las condiciones críticas de las piezas, como lo es el esfuerzo flector y cortante que el peso del sistema (pasador, gancho y eje primario) le ejerce a los tornillos y a los dos ejes. Esta fracción de área que se removió del eje secundario para poder dejar el perforado del tornillo, es el área que soporta la carga. Cabe resaltar la existencia de 2 puntos críticos, siendo el más severo el que se encuentra en el extremo del eje terciario donde se acopla a la placa de unión de la cremallera, ya que es en este punto que el momento es máximo porque el brazo de longitud abarca todo el sistema (626,5 mm). En gran medida el sistema se encuentra un poco sobredimensionado, esto debido a los altos valores de factores de seguridad obtenidos en los cálculos del esfuerzo flector y el esfuerzo cortante permisible del material. Los factores de seguridad se calcularon a partir de los esfuerzos cortante y flector máximos del sistema, junto con el esfuerzo de cedencia permisible del material, estos cálculos son válidos especialmente en etapas iniciales del diseño o cuando se busca una evaluación rápida de seguridad. La teoría de falla de energía de distorsión o Von Mises consiste en

Placa de unión entre los ejes de soporte del pasador y el mecanismo cremallera piñón

Se diseñó una placa rectangular en acero inoxidable 304. La placa se encarga de unir mecánicamente el mecanismo de cremallera piñón con los 3 ejes que soportan el pasador, la cara inferior de la placa se encuentra unida a la cremallera mediante un pequeño cordón de soldadura tipo TIG, en el que se utilizó un electrodo de tungsteno y argón, que actúa como gas protector inerte. Esta pieza se diseñó con un agujero que se encuentra en la parte más arriba de la cara superior, como se observa en la siguiente figura. La perforación se hizo para la colocación de un tornillo que une la placa con el eje terciario de soporte del pasador. Los planos de esta pieza se pueden encontrar al final de este documento en el **Anexo 17**.

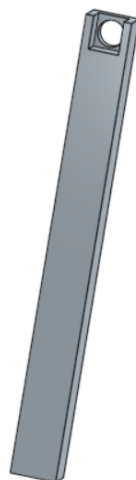


Figura XC. Vista isométrica de la placa de unión (Ver Anexo 16)

Guía de deslizamiento lineal

Una vez seleccionada la guía de deslizamiento lineal del mercado, junto con sus especificaciones técnicas y dimensiones, se procedió a realizar la incorporación de esta pieza en el diseño mecánico en el software. Inicialmente, se realizó una búsqueda en catálogos y repositorios de archivos CAD, con el objetivo de importar el archivo en formato STL para facilitar el reconocimiento de la pieza en Onshape. La idea era simplificar el trabajo de diseño y ensamble de la pieza y permitir su acople rápido al diseño estructurado. Sin embargo, tras una búsqueda exhaustiva, no se encontró un archivo CAD de formato adecuado que cumpliera con las dimensiones requeridas. Debido a ello, la guía de deslizamiento lineal fue diseñada desde cero, para garantizar que pudiera ser dimensionalmente viable, y, a su vez, se pudiera ensamblar con el soporte en L de la pared estructural. Este ensamble con el soporte se da mediante el uso de 4 pequeños tornillos, dispuestos en 2 orificios en cada extremo del perfil principal. La referencia de estos tornillos es M3 de grado B estándar ISO 4015. Los tornillos son de 20 mm de largo y de paso de rosca 2 mm. En la **Figura LXXVIII** se presenta una vista isométrica de la guía junto con sus respectivas piezas diseñadas. Los planos de esta pieza se pueden encontrar al final de este documento en el **Anexo 18**.

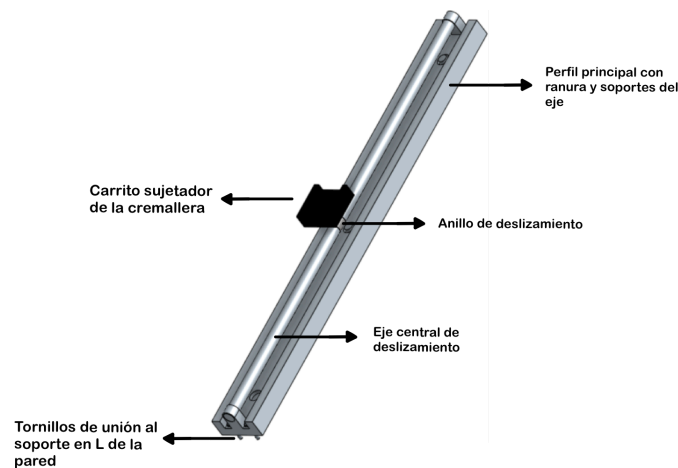


Figura XCI. Vista isométrica de la guía de deslizamiento lineal junto con sus partes señaladas (Ver Anexo 17)

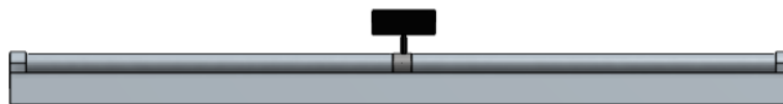


Figura XCII. Vista frontal de la guía de deslizamiento lineal (Ver Anexo 17)

En el software se asignaron los materiales de cada uno de los componentes de la guía. En la siguiente tabla se presenta cada uno.

Tabla LX. Piezas que componen la guía deslizante con sus respectivos materiales asignados.

Pieza	Material
Perfil principal ranurado	Acero inoxidable endurecido
Eje central de deslizamiento	Acero inoxidable estructural
Anillo de deslizamiento	Acero inoxidable serie A2
Carrito sujetador de la cremallera	Aluminio 1060 con recubrimiento de pintura anticorrosiva
Tornillos	Acero inoxidable

En la mayoría de las piezas diseñadas para la guía de deslizamiento lineal, se asignó el acero inoxidable.

Esto se debe a que estas piezas están en constante fricción, lo que las hace propensas tanto al desgaste mecánico como a la corrosión. Por lo tanto, se buscó un material que pudiera brindar soporte y resistencia mecánica tanto a la guía como a la cremallera, pero que a la vez fuera de bajo costo. Inicialmente, se consideró el uso de acero inoxidable de la serie 300, sin embargo, su costo es muy elevado en comparación con el acero inoxidable estándar. Por esta razón, se optó por el acero inoxidable convencional, sin dejar de lado la parte mecánica.

Consideraciones en el diseño de la guía de deslizamiento lineal

Debido a que en el software la guía se diseñó desde cero, se hicieron unas consideraciones al respecto sobre las piezas que se deslizan. En primer lugar, la guía seleccionada del mercado tiene un pequeño soporte o sujetador de la muestra que se busca deslizar a través de un eje central, esto lo hace mediante una serie de rodamientos de bola (cojinetes de contacto rodante) acoplados dentro de la estructura de este soporte, sin embargo, en el diseño hecho en Onshape, se modificó esta manera de ensamble y movimiento, debido a la complejidad en tiempo y dibujo de los rodamientos, además de que se buscaron archivos CAD de estos elementos pero no se encontraron unos de tamaño acorde al diseño propuesto en este proyecto, por lo cuál, se optó por un rediseño del sistema de deslizamiento. El soporte que sujeta la cremallera (pieza negra) se mantiene geoméricamente tal cual lo convencional, sin embargo, detrás del soporte, se le dibujó un pequeño eje con una unión por soldadura y, su vez, este eje va unido también por soldadura a un pequeño anillo deslizante sin fricción (cojinetes de contacto deslizante) ensamblado al diámetro del eje central de la guía, y, para reducir el desgaste, cada cierto período de mantenimiento, el anillo se lubrica por película delgada de aceite, a la vez que se recomienda revisar humedades presentadas en los puntos internos del anillo deslizante. De esta manera, se dio solución al problema de diseño de los rodamientos, a la vez que funciona el movimiento deseado y no se producen fallas en la simulación. También se consideró el fenómeno de deflexión. En un inicio se planteó colocar dos soportes en que sujetaran ambos extremos de la cremallera, es decir dos puntos de apoyo de carga y no solo uno, se realizó en el diseño CAD pero al momento de simular no funcionó debido a que los soportes chocaban con los extremos de la guía, es decir, por longitudes y distancias, es muy difícil dejar dos soportes en el diseño, por lo cual se optó por uno solo. La unión entre piezas se presenta a continuación.

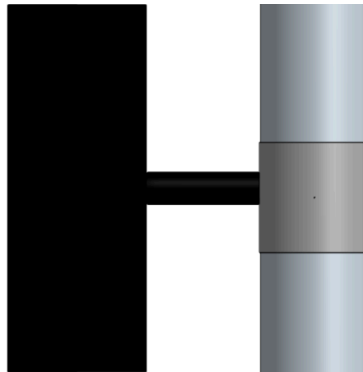


Figura XCIII. Vista frontal de la unión entre el soporte que sujeta la cremallera y el anillo deslizante

Sistema del mecanismo cremallera - piñón

Una vez se especificó en la parte de sistema de posicionamiento y movimiento del pasador en la dirección axial la selección de un mecanismo de cremallera - piñón, se procedió a realizar el diseño de estas 2 piezas en el software junto con su debida relación de transmisión y perfil de involuta. Debido a que el diseño de las piezas comprende ecuaciones paramétricas de gran complejidad en el programa, se optó por la búsqueda de archivos CAD y se importó el mecanismo completo. Estas piezas obtenidas son de tipo helicoidal, lo cuál son muy útiles para el movimiento del pasador, lo anterior es debido a que un engranaje helicoidal tiene una mayor transmisión de potencia y fuerza con respecto a un engranaje recto. El piñón importado está constituido de 20 dientes, mientras que la cremallera tiene 30 dientes. Las piezas en 3D correspondientes a la cremallera y el piñón se presentan en las **Figuras LXXXVII** y **LXXXIII** respectivamente.

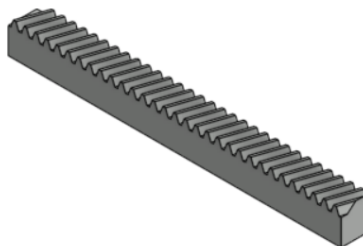


Figura XCIV. Vista isométrica de la cremallera (Ver Anexo 19) (obtenida de GrabCAD)

La cremallera se ensambló a la guía de deslizamiento lineal, a través de una placa rectangular ubicada en la cara trasera de la cremallera, esta placa tiene una superficie extendida que se acopla mediante un pequeño cordón de soldadura a un anillo que permite el deslizamiento del sistema a través del eje central de la guía. Por otro lado, la cremallera también se ensambló a la placa de unión con los 3 ejes en L que sujetan el pasador. Es en este ensamble que se da la unión entre dos sistemas, el mecanismo cremallera - piñón que transmite velocidad, potencia y fuerza para el movimiento, y el sistema de posicionamiento de la muestra entre el anillo de enfriamiento y la bobina.

En paralelo a lo anterior, el diámetro interno del piñón se ensambló al eje principal del rotor perteneciente al motor de paso controlado, lo cual permite que al momento del encendido y arranque del motor, el piñón irá a las revoluciones del motor, lo que va a transmitir la potencia y velocidad necesarias para la cremallera, lo que origina el movimiento del mecanismo, de la placa de unión y del sistema de 3 ejes en L que sostienen el pasador y lo desplazan en dirección axial. Las dimensiones del piñón utilizado en el diseño son las mismas que se especificaron en la **Tabla XLIX**.



Figura XCV. Vista isométrica del piñón (Ver Anexo 20) (obtenida de GrabCAD)

En la parte de asignación de materiales en el software, tanto para la cremallera y el piñón se les asignó como material de fabricación el acero inoxidable estándar.

Selección del motor de paso controlado para el movimiento y control del mecanismo

La carrera del mecanismo en la dirección axial debe tener un control, debido a que el piñón tiene un movimiento angular constante en dos direcciones, que permite impulsar linealmente la cremallera acoplada a una placa de unión atornillada a un sistema de 3 ejes en L, a su vez, estos ejes sujetan la muestra. Debido a lo anterior, la mejor opción para establecer un control preciso para el mecanismo es el de un actuador electromecánico, es decir, la implementación de un motor eléctrico controlado por un generador de corriente y voltaje, la opción que se analizó como la más apropiada para este caso es el de un motor paso a paso. Este tipo de motor se mueve en pequeños pasos controlados por señales eléctricas. Cada impulso que recibe hace que el eje principal del motor (rotor) tenga un desplazamiento y velocidad angular. Un motor de paso controlado se utiliza en aplicaciones que requieren movimientos precisos y controlados, como impresoras, CNC, robots, cámaras, y sistemas de automatización.

Para el contexto de este estudio, la velocidad del motor se debe ajustar a la establecida en los requerimientos técnicos del mecanismo, para controlar el avance lineal de la cremallera, los ejes y por ende el pasador. Los topes mecánicos como una pequeña estructura atornillada en un soporte en L contra la pared estructural, son de soporte para el motor, lo sostiene por la parte de atrás de la pared para que este no entre en contacto con el agua de enfriamiento y no se produzca un cortocircuito o una falla mecánica del motor. Por lo cuál se debe seleccionar un motor de paso controlado que internamente tenga un mecanismo motorreductor, este sistema combina la parte eléctrica del motor con un sistema reductor de velocidad, con el objetivo de entregar un mayor torque para establecer un control ajustado de la velocidad.

Para determinar el tipo de motor adecuado, es fundamental definir sus características, siendo la potencia uno de los parámetros principales a considerar. A continuación, se detallan los cálculos realizados:

Cálculo de la velocidad angular del piñón

En primer lugar se calculó la velocidad angular en revoluciones por minuto (rpm) que necesita el motor para poder movilizar el pasador a través del sistema según lo requerido. Ya se tiene la velocidad lineal que necesita el mecanismo, esta es de 0,022 m/s, para el avance controlado del pasador, y, a su vez, se tiene el radio

del piñón (ver anexo 19), que es el orificio que se va a acoplar al eje del motor, este radio es de 0,011 m. Para esto se aplicó la siguiente ecuación

(Ecuación 28)

$$v = \omega * r$$

$$\frac{0,022 \text{ m/s}}{0,011 \text{ m}} = \omega$$

$$2 \text{ rad/s} = \omega$$

Se realizó la conversión de unidades a rpm

$$2 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * \frac{60\text{s}}{1 \text{ min}} * \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}}$$

$$19,10 \text{ rpm}$$

Una vez se obtuvo el valor de la velocidad angular del piñón en rpm, se calculó la fuerza de fricción entre el eje del motor y el piñón. La fuerza de fricción se determina a partir de la fuerza normal máxima y el coeficiente de fricción estático máximo del acero, cuyos valores son $F_n = 40 \text{ N}$ y $\mu = 0,9$, respectivamente.

(Ecuación 29)

$$F_f = F_n * \mu$$

$$F_f = 40 * 0,9$$

$$F_f = 36 \text{ N}$$

Se procedió a realizar el cálculo del torque ya con los datos conocidos hasta el momento

(Ecuación 30)

$$T_f = F_f * r \rightarrow (\text{radio del piñón o del eje})$$

$$T_f = 36 \text{ N} * 0,011 \text{ m}$$

$$T_f = 0,396 \text{ Nm}$$

Cálculo del momento de inercia del pasador cuando el motor inicia o arranca suavemente

(Ecuación 31)

$$I = \frac{1}{2} * m_{\text{piñón}} * r_{\text{piñón}}^2 + \frac{1}{2} * m_{\text{pasador}} * r_{\text{pasador}}^2$$

$$I = \frac{1}{2} * 4 \text{ kg} * (0,011 \text{ m})^2 + \frac{1}{2} * 3,53 \text{ kg} * (25,5 \text{ m})^2$$

$$I = 1,389 * 10^{-3} \text{ kg m}^2$$

Una vez se obtuvo este dato, se calculó la aceleración angular del sistema mediante la siguiente ecuación:

(Ecuación 32)

$$\alpha = \frac{\omega}{t}$$

$$\alpha = \frac{2 \text{ rad/s}}{3 \text{ s}}$$

$$\alpha = 0,67 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Una vez se obtuvo el valor del momento de inercia y la aceleración angular, se pudo calcular el valor del torque que necesita el motor para poder movilizar el sistema mecánico de piñón - cremallera y los 3 ejes para que el pasador avance por la bobina, se conoce como el torque debido a la aceleración angular, esto se hizo mediante

la siguiente ecuación:

(Ecuación 33)

$$\tau_a = I * \alpha$$

$$\tau_a = I = 1,389 * 10^{-3} \text{ kg m}^2 * 0,67 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$\tau_a = 9,3063 * 10^{-4} \text{ Nm}$$

Finalmente, se calculó la potencia requerida por el motor para el movimiento del sistema mecánico y por ende, de la muestra, ya con este último parámetro se puede escoger un motor, de acuerdo con las especificaciones técnicas e implementarlo en el diseño mecánico. En la siguiente ecuación se presenta el cálculo de la potencia:

(Ecuación 34)

$$P = \tau_t * \omega$$

$$P = (\tau_f + \tau_a) * \omega$$

$$P = (0,396 \text{ Nm} + 9,3063 * 10^{-4} \text{ Nm}) * 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P = 0,7938 \text{ W}$$

Una vez se realizaron todos los cálculos de velocidad lineal, angular, aceleración angular, torque, fuerza y potencia del motor, se procedió con la selección de este dispositivo según los parámetros de entrada presentados anteriormente. Por consiguiente, se hizo una búsqueda de motores paso a paso en referencias comerciales y se seleccionó uno que cumpliera con las especificaciones técnicas solicitadas para el sistema mecánico y de movimiento axial de la muestra. Este corresponde a un motor de paso controlador con un sistema de motorreductor (caja reductora) con una relación de 1/100, en una etapa, en su interior para brindar velocidades lentas, que es lo que se busca en el movimiento del pasador a través de la bobina. En la siguiente figura se muestra el motor seleccionado del mercado.

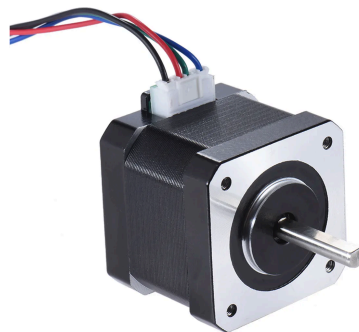


Figura XCVI. Motor de paso controlado seleccionado. Tomado de un catálogo en mercado libre Colombia

Tabla LXI. Especificaciones técnicas del motor de paso controlado seleccionado

Características	Datos
Referencia comercial	Nema 17
Modelo	3D4221809A1
Tipo de motor	Motor paso a paso
Tamaño del motor	42 x 42 x 38 mm

Díámetro del eje	22 mm
Tipo de corriente de trabajo	Corriente Directa (DC)
Tipo de conexión	Bifásica
Corriente	3,96 V
Voltaje	0,9 A
Ángulo de paso	1,8 °
Velocidad angular	5 rad/ s → 47,75 rpm
Aceleración angular	0,67 rad/s ²
Par de retención	0,4 Nm
Potencia	5 W
Ruido	Bajo
Temperatura	Soporta hasta 260 °C
Material	Acero inoxidable
Peso	2,943 N
Precio	\$ 36.800

Motor de paso controlado para el mecanismo

Al igual que el mecanismo de cremallera - piñón, el diseño CAD del motor de paso controlado se importó desde la web. Se buscó un modelo de motor igual al seleccionado en el sistema mecánico, que tuviera los mismos materiales, dimensiones, apariencia, componentes, etc. El eje del motor tiene una especie de ranura para una chaveta que se acopla a otra ranura de chaveta del piñón, la chaveta impulsa el diámetro interno del piñón haciendo que gire. A partir de lo anterior, en el software, se creó una relación de ensamble entre el eje del rotor del motor y el piñón. La imagen de la izquierda es la A y la de la derecha la B.

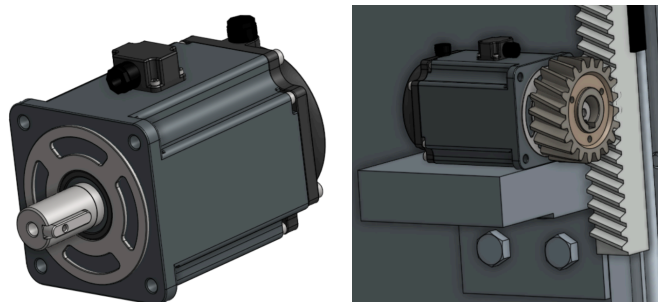


Figura XCVII. A) Vista isométrica del motor; B) Vista del motor acoplado al piñón y a la cremallera en la pared de soporte (Ver Anexo 21) (obtenida de GrabCAD)

Ensamble final del diseño mecánico del sistema de posicionamiento y movimiento axial del pasador

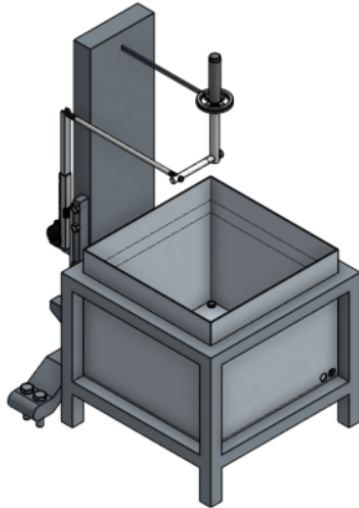


Figura XCVIII. Vista isométrica del ensamblaje final del diseño mecánico del movimiento axial del pasador

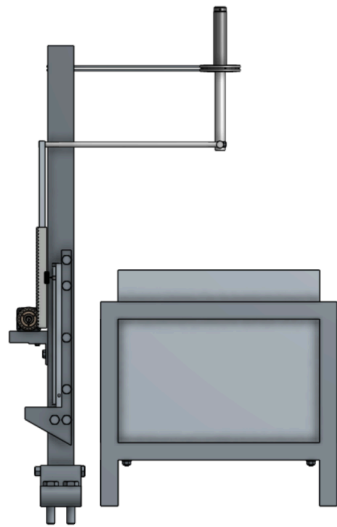


Figura XCIX. Vista frontal del ensamblaje final del diseño mecánico del movimiento axial del pasador

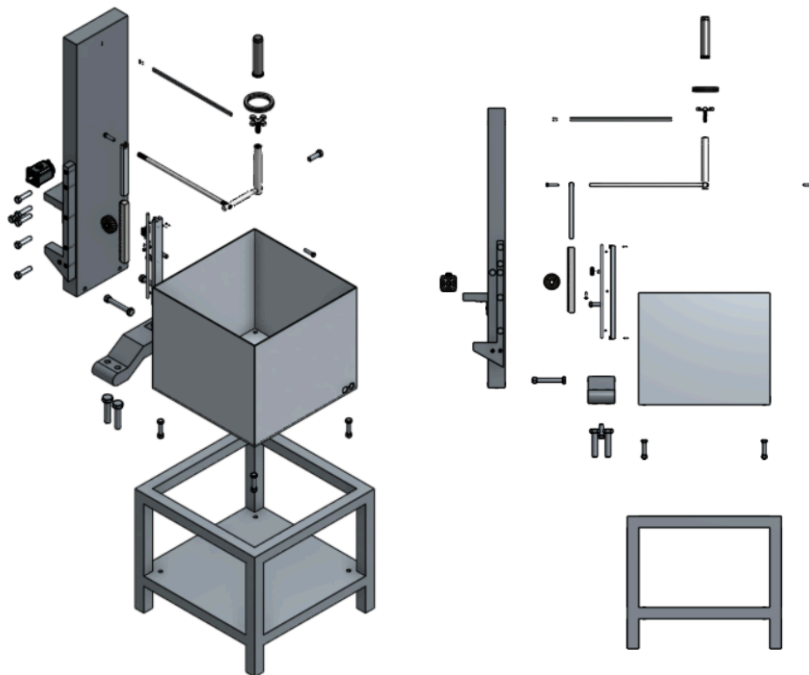


Figura C. A) Vista isométrica explosionada del diseño mecánico final, B) Vista frontal explosionada (Ver planos en el anexo 23)

Finalmente, después de todo el trabajo realizado en este estudio, se realizó un diseño final que reúne cada uno de los componentes que integran los subsistemas del horno para tratamiento térmico por inducción de los pasadores de cadenas transportadoras de bagazo producidas en Cadenpal. A partir de una búsqueda de archivos CAD en repositorios, se importó el sistema de calentamiento, la fuente de alimentación para la bobina y el generador eléctrico, seguido de un soporte metálico que sostiene este sistema. También se importó el modelo CAD de un chiller igual al seleccionado y un tablero de monitoreo y control del horno, junto con la pantalla HMI y los sensores. Por otro lado, se diseñó una pared para sostener el tablero en la planta (**Ver planos en el anexo 22**). La siguiente figura muestra una vista general de todo el sistema de tratamiento térmico propuesto para este proyecto de diseño, junto con mención de las partes de cada subsistema.

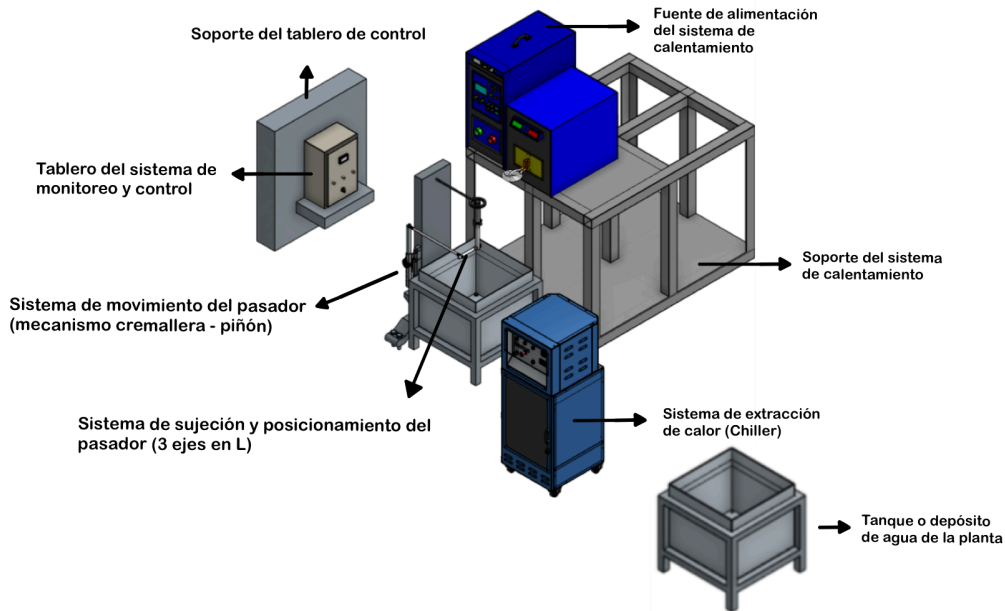


Figura CI. Vista isométrica final del horno para tratamiento térmico por inducción de los pasadores, junto con sus partes

Este diseño se realizó con el fin de contextualizar visualmente al lector sobre la ubicación espacial de cada uno de los equipos y componentes seleccionados previamente en cada sistema. Con esto se busca una mayor claridad gráfica a la hora de entender la distribución del sistema de tratamiento térmico en la planta, y la forma en que se debería llevar a cabo el proceso.

Análisis de elementos finitos y simulaciones del diseño mecánico

En esta sección se recopilaron los análisis de elementos finitos realizados a las piezas del sueño sometidas a las condiciones más críticas en cuanto a esfuerzos mecánicos. Estas simulaciones se llevaron a cabo en el software SolidWorks, que permite aplicar el método de elementos finitos a una pieza CAD diseñada en este software, por lo cual, se inició con el análisis del sistema del sistema de 3 ejes en L encargados de sujetar y movilizar el pasador en la dirección axial a través de la bobina y el anillo de enfriamiento, debido a que es en esta parte del diseño que se encuentran las condiciones más críticas, en primer lugar por el peso del pasador que deben soportar los 3 ejes y el gancho, seguido de las condiciones de cambios bruscos de temperaturas al momento del proceso de tratamiento térmico, sobre todo en la condición más crítica que se da en el momento de calentamiento por las elevadas temperaturas, el pasador resiste térmicamente este calentamiento, pero en el software se decidió analizar las condiciones de desgaste térmico y los efectos de estas altas temperaturas en los ejes y en el gancho sujetador.

Para realizar el análisis estático se consideraron las distintas etapas que conlleva. En primer lugar se asignaron los materiales de los ejes (Acero 316L), la versión del software en el que se trabajó la simulación solo permitía ese material, por ende se intuye un factor de seguridad mucho más alto. Luego se colocaron las interacciones, es decir, las medidas, las cargas del extremo empotrado y la carga puntual del sistema (pasador, gancho, eje primario) que se ejerce sobre el eje secundario y terciario respectivamente (puntos más críticos), las interacciones permiten el comportamiento del material según las condiciones aplicadas, tipo geometría fija, acoplamientos roscados entre los ejes, etc. Seguido de esto, se creó la malla con un tamaño de 13, medianamente fina. Se entiende que entre más fina sea la malla, más preciso y real será el cálculo, pero en este caso, debido a las condiciones de la versión de SolidWorks que se utilizó, y los rendimientos gráficos del computador, no se pudo

refinar más la malla, la simulación quedaba muy pesada, finalmente se ejecutó la malla y se seleccionó el criterio de falla de von Mises para el análisis, asegurando que dichas consideraciones se integrarán de manera adecuada para evaluar la resistencia y comportamiento del material bajo las condiciones críticas analizadas.

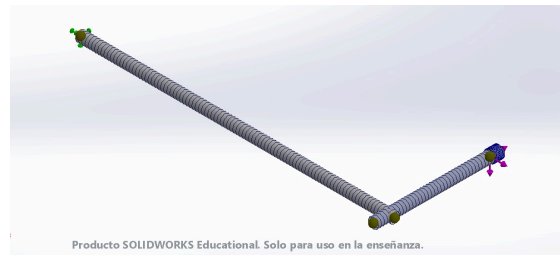


Figura CII. Vista del enmallado que se hizo, con una malla de 10



Figura CIII. Simulación de elementos finitos para estática

4.2 Integración de Horno Diseñado vs. Compra de Horno Comercial para Optimizar Capacidad Productiva

En el marco del objetivo específico número II, orientado al desarrollo del sistema productivo en términos de operación y la distribución de planta para mejorar la productividad y lograr optimizar los procesos. Se llevó a cabo un análisis detallado del proceso productivo actual de Cadenpal. Este análisis se representa mediante un flujograma que abarca todas las etapas de fabricación, desde el recibimiento de la materia prima, incluyendo su total transformación, hasta ser almacenado el producto terminado.

A partir de los datos recolectados, se desarrolla un estudio de distribución de planta y flujo del proceso con el propósito de identificar oportunidades de mejora que permitan optimizar la disposición de los recursos y la eficiencia operativa. Este estudio cobra especial relevancia en el contexto de la incorporación del horno de inducción, cuyo ingreso a la planta representa un punto clave en la reorganización del espacio productivo. En este sentido, el enfoque se centra en evaluar la configuración actual y proponer ajustes que faciliten la integración de esta nueva tecnología, contribuyendo así a fortalecer la capacidad operativa.

Proceso actual de Cadenpal

Este análisis se realiza con base en las tres materias primas de la referencia 2100: Rodillo, Acero Redondo y Lámina, tal como se muestran en el flujograma. Del Rodillo (materia prima) se obtiene el rodillo de la cadena, del Acero Redondo se producen el buje y el pasador, y de la Lámina se fabrican las platinas. Estos cuatro elementos componen un eslabón de **cadena referencia 2100**, la cual es la referencia estándar de producción en la empresa, la cual es la cadena mayor fabricada con una representación del 90% ya que corresponde a la base de todas las cadenas. Lo que usualmente varía es la longitud de la cadena, es decir, el número de eslabones, pero para este estudio se ha tomado esta referencia como base con el fin de homogeneizar la producción y permitir un análisis más preciso para la redistribución de planta.

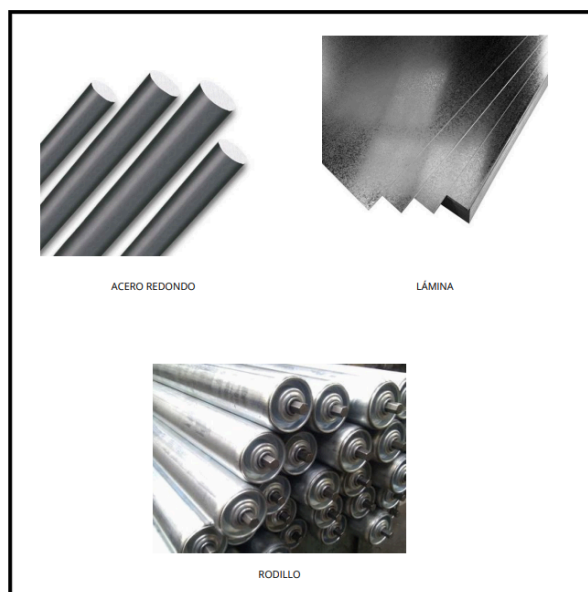


Figura CIV. Materias primas para cadena referencia 2100

El flujo de materiales sigue recorridos específicos dentro de la planta, con distancias establecidas entre estaciones que impactan la eficiencia operativa. Según el flujograma presentado en la figura L, el proceso productivo inicia con la recepción de materias primas y almacenamiento en un área específica de la planta, donde se clasifican los aceros redondos, las láminas y aceros rodillos, los cuales conforman la unidad mínima de las cadenas: el eslabón.

El Rodillo inicia su trayecto en la Entrada, pasando por el Almacenamiento de Ejes. Luego, se traslada a la máquina T61 (CNC) para su mecanizado. Desde allí, se transporta externamente a Cali para recibir el tratamiento térmico de temple, un proceso en el cual las piezas se someten a ciclos controlados de calentamiento y enfriamiento que mejoran sus propiedades mecánicas, logrando mayor resistencia en el movimiento de la cadena sin generar una rotura. Una vez retornado a la planta, continúa su proceso en la Zona de Pintura, seguido de su paso por la máquina Geka y regreso al Almacenamiento de Ejes antes de volver a la Entrada.

El Acero Redondo (Buje) sigue un recorrido similar, comenzando en la Entrada y trasladándose al Almacenamiento de Ejes, luego a la Sierra Horizontal, seguido del Fresado (T62). Desde allí, avanza al Torneado (T61), luego a la Zona de Pintura. Posteriormente, pasa por la máquina Geka y regresa al Almacenamiento de Ejes antes de volver a la Entrada.

El Acero Redondo (Pasador) inicia en la Entrada y sigue su trayecto hasta el Almacenamiento de Ejes, luego a la Sierra Horizontal, donde se corta a una medida específica correspondiente a la capacidad del Torno CNC. Del material ingresado se obtienen pasadores o bujes, garantizando dimensiones y acabados superficiales óptimos. Posteriormente, el pasador sigue su recorrido hasta el Fresado (T62) y avanza al Torneado (20A). Luego, pasa al Centro de Mecanizado, donde se realizan los acabados finales antes del tratamiento térmico. Una vez mecanizado, el pasador es transportado externamente a Medellín para recibir el tratamiento térmico por inducción. Este paso genera un alto impacto en la eficiencia y representa una de las principales oportunidades de mejora del proyecto, ya que la inclusión de un horno industrial en planta permitiría eliminar este traslado externo, optimizando costos y tiempos de producción. Tras su retorno a la planta, el pasador continúa su procesamiento en la Zona de Pintura, luego pasa por la máquina Geka, se dirige al Almacenamiento de Ejes y finalmente regresa a la Entrada.

El flujo de Lámina comienza en la Entrada, pasando por el Almacenamiento de Ejes. Luego, se traslada al Corte Láser, donde se trabaja con láminas de dimensiones específicas, cortadas a partir de unidades más grandes. Si se requiere un doblado, las piezas son trasladadas a una prensa que, mediante fuerza, realiza el proceso de diseño. Además, algunas platinas pueden requerir cortes manuales adicionales antes de integrarse al flujo de armado. En ciertos casos, pueden tener aditamentos soldados o recibir una capa de refuerzo para mejorar su resistencia. Posteriormente, avanza hasta la máquina Geka, luego al Almacenamiento de Ejes y finalmente de regreso a la Entrada.

Una vez se tienen todas las piezas en Cadenpal, tanto las fabricadas como las tercerizadas, estas son

inspeccionadas antes del proceso de pintura y ensamblaje final. Se someten a recubrimientos anticorrosivos y rigurosos controles de calidad que incluyen pruebas de carga, alineación y durabilidad. Finalmente, pasan a la etapa de armado, donde los componentes mecanizados se integran mediante presión en la máquina Geka (punzonadora hidráulica), siguiendo las especificaciones técnicas de cada tipo de cadena. A las piezas finales se les llama "rollos" o "tiras", representando los flujos de salida. La necesidad de transporte externo para los procesos de tratamiento térmico del rodillo y del pasador incrementa significativamente los tiempos de producción.

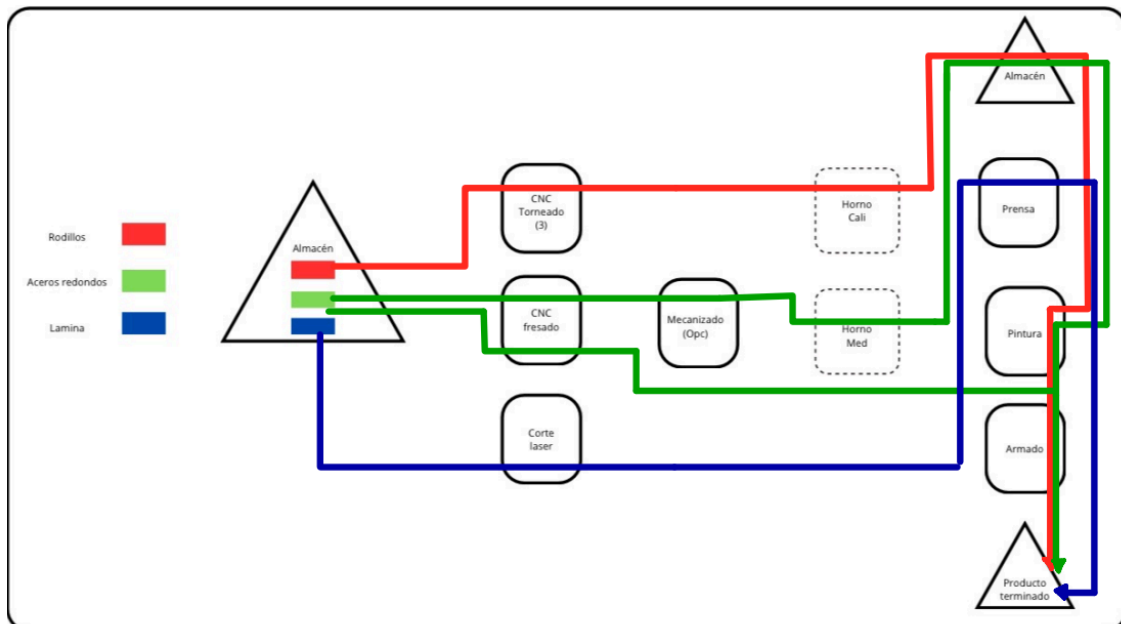


Figura CV. Flujograma del proceso actual de Cadenpal

Mejoramiento de distribución de planta

La decisión de incorporar un horno comercial importado en Cadenpal requirió de un análisis detallado de la distribución actual de la planta. Para ello, es fundamental aplicar los principios básicos de distribución de planta, los cuales buscan lograr una integración equilibrada entre los recursos humanos, materiales, equipos y actividades complementarias. En primer lugar, **la integración de conjunto** hace posible garantizar una coordinación efectiva entre cada una de las áreas de la planta, asegurando que los flujos laborales sean lógicos y eficientes, teniendo en cuenta tanto la superficie de largo y ancho como de altura. También, **el principio de flujo de materiales** establece minimizar el movimiento de piezas, para así reducir los tiempos muertos y evitar los desperdicios. Además de esto, **la mínima distancia** permite que tanto el trabajador como el material en caso tengan cortas distancias de recorrido. Por último, **la seguridad y bienestar** es de suma importancia para lograr un ambiente seguro para los operarios. Por último, **la flexibilidad** para así lograr hacer futuras modificaciones en caso de que se demande. En la **Figura CVI** se presenta una distribución de la planta actual:

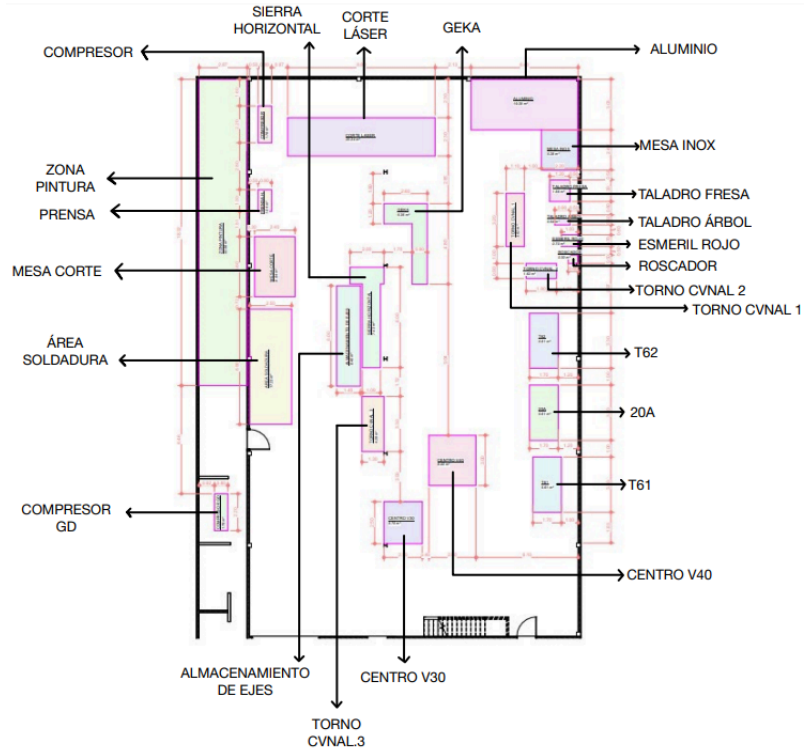


Figura CVI. Distribución de la planta actual

La elección de una metodología mixta que combina el Systematic Layout Planning (SLP) con el método de medición carga-distancia se fundamenta en su capacidad para abordar de manera integral las necesidades de una distribución en línea, particularmente en un entorno de producción estandarizada como el de Cadenpal. Dado que el proceso se centra principalmente en un producto (cadena 2100) con variaciones mínimas en otras referencias, el flujo secuencial y continuo que ofrece una distribución en línea permite minimizar los tiempos de transporte, reducir los cuellos de botella y optimizar el aprovechamiento del espacio con la incorporación del horno de inducción. El SLP facilita el análisis sistemático de las relaciones entre áreas y equipos, garantizando una disposición coherente con el flujo de materiales, mientras que el método carga-distancia cuantifica la eficiencia de la distribución propuesta, evaluando el impacto de los movimientos de material en términos de costos y tiempo. A continuación se explicará la metodología y sus pasos a seguir para su ejecución.

Proceso de rediseño de la planta

En primer lugar, se analizará la distribución actual de la planta, documentando el flujo de materiales, las áreas de trabajo y las condiciones operativas existentes, identificando oportunidades de mejora en términos de tiempos de traslado, acumulación de materiales y eficiencia de los procesos. Posteriormente, se evaluará la distribución planeada por la empresa para la integración del horno de tratamiento térmico por inducción, considerando su impacto en la eliminación del transporte externo del pasador a Medellín y del rodillo a Cali.

Finalmente, se generará una nueva distribución basada en el método Systematic Layout Planning (SLP), la cual no solo considerará variables cualitativas, como la proximidad de estaciones de trabajo y la optimización del flujo de materiales, sino que también integrará cálculos de carga-distancia para reducir los desplazamientos internos y mejorar la eficiencia operativa de la planta. Este análisis se realiza con base en las tres materias primas: Rodillo, Acero Redondo y Lámina, tal como se muestran en el flujograma del proceso productivo. Del Rodillo (materia prima) se obtiene el rodillo de la cadena; del Acero Redondo se producen el buje y el pasador; y de la Lámina se fabrican las platinas. Estos cuatro elementos componen un eslabón de cadena referencia 2100, la cual es la referencia estándar de producción en Cadenpal.

A continuación, se presentan los diagramas de la distribución de planta correspondientes a cada componente del proceso, en los cuales se detallan de manera precisa los flujos operativos. Cada trayectoria se encuentra debidamente especificada, incluyendo las distancias en metros recorridas entre las diferentes estaciones de trabajo, lo que permite un análisis claro y estructurado de los movimientos internos.

Rodillo

Según el flujo del proceso presentado en la figura CI, el Rodillo inicia su trayecto en la Entrada, recorriendo 15.28 metros hasta el Almacenamiento de Ejes. Luego, se traslada 18.02 metros hasta la máquina T61 (CNC) para su mecanizado. Desde allí, recorre 18.95 metros hasta la Entrada, desde donde se transporta externamente a Cali para recibir el tratamiento térmico de temple. Una vez retornado a la planta, continúa su proceso con un desplazamiento de 30.27 metros hasta la Zona de Pintura, seguido de 10.25 metros a Geka, después 7.51 metros de regreso al Almacenamiento de Ejes, y finalmente 15.28 metros de vuelta a la Entrada, sumando un recorrido total de 115.56 metros. Con 14,502 piezas por mes, cada una con un peso de 0.03 kg, se transporta 435.06 kg/mes, contribuyendo a la carga-distancia total, lo que da como resultante que se transportan 50,275.53 kg/metro cada mes.

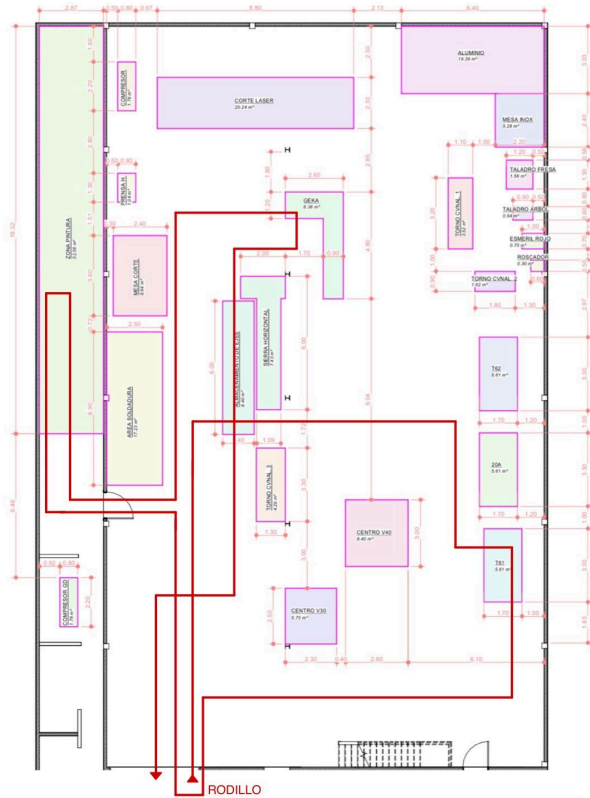


Figura CVII. Flujo del proceso rodillos

Acero Redondo – Buje

Según el flujo del proceso presentado en la **Figura CVII**, el Buje sigue un recorrido similar, comenzando en la Entrada y trasladándose 15.28 metros al Almacenamiento de Ejes, luego 1.14 metros a la Sierra Horizontal, seguido de 10.02 metros hasta el Fresado (T62). Desde allí, avanza 13.67 metros al Torneado (T61), luego 43.8 metros a la Zona de Pintura. Posteriormente, recorre 10.25 metros hasta Geka, luego 7.51 metros al Almacenamiento de Ejes, y finalmente 15.28 metros de regreso a la Entrada, totalizando 116.95 metros. Con 16,951 piezas por mes, cada una de 0.043 kg, el peso total transportado asciende a 728.89 kg/mes, lo que da como resultante que se transportan 85,244.04 kg/metro cada mes.

Acero Redondo – Pasador

El Pasador inicia en la Entrada y sigue un trayecto de 15.28 metros hasta el Almacenamiento de Ejes, luego 1.14 metros hasta la Sierra Horizontal, seguido de 10.02 metros hasta el Fresado (T62). Desde allí, avanza 5.45 metros al Torneado (20A) y posteriormente 3.32 metros hasta el Centro de Mecanizado, donde se realizan los acabados finales. Luego, recorre 17.08 metros hasta la Entrada para ser llevado a Medellín a recibir el tratamiento térmico.

Después, el pasador sigue un trayecto de 30.27 metros hasta la Zona de Pintura, luego 10.25 metros hasta Geka, después 7.51 metros al Almacenamiento de Ejes, y finalmente 15.28 metros de regreso a la Entrada, totalizando 140.21 metros. Con 6,780 piezas por mes, cada una de 0.073 kg, el material transportado alcanza 494.94 kg/mes, lo que da como resultante que se transportan 57,215.06 kg/metro cada mes.

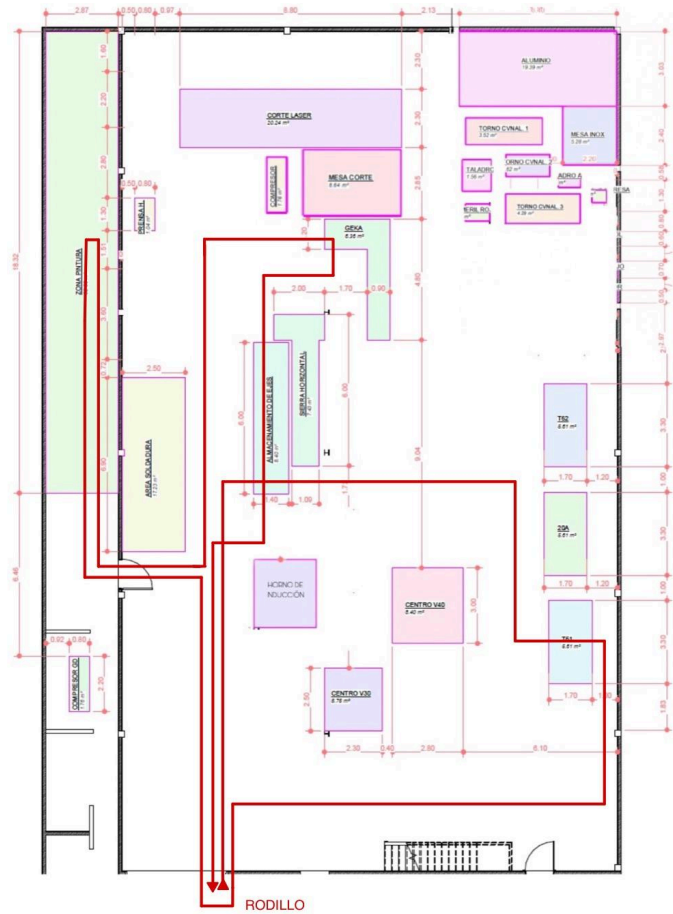


Figura CX. Distribución prevista para la llegada del horno (rodillos)

Buje

A partir de la **Figura CX**, podemos observar que el proceso del buje inicia en la Entrada, recorriendo 15.28 metros hasta el Almacenamiento de Ejes, seguido de 1.14 metros hasta la Sierra Horizontal. Posteriormente, avanza 10.02 metros hasta Fresado (T62) y luego 13.67 metros hasta Torneado (T61). Una vez completado este proceso, se transporta 43.8 metros hasta la Zona de Pintura, seguido de 10.25 metros hasta Geka, 7.51 metros de regreso al Almacenamiento de Ejes, y finalmente 15.28 metros hasta la Entrada. En total, el recorrido asciende a 116.95 metros. Con 16,951 piezas mensuales y un peso por unidad de 0.043 kg, la carga transportada es de 728.89 kg/mes, con una carga-distancia de 85,244.04 kg·m/mes.

Pasador

A partir de la **Figura CXI**, podemos observar que el Pasador inicia su recorrido en la Entrada, avanzando 15.28 metros hasta el Almacenamiento de Ejes, luego 1.14 metros hasta la Sierra Horizontal, y 10.02 metros hasta Fresado (T62). Desde allí, se traslada 5.45 metros hasta Torneado (20A) y posteriormente 3.32 metros hasta el Centro de Mecanizado. En esta distribución, el horno se encuentra ubicado dentro de la planta, permitiendo que el pasador recorra 3.65 metros hasta esta estación para su tratamiento térmico. Luego, avanza 8.75 metros hasta la Zona de Pintura, seguido de 10.25 metros hasta Geka, 7.51 metros hasta el Almacenamiento de Ejes, y 15.28 metros de regreso a la Entrada, con un total de 80.65 metros recorridos. Con 6,780 piezas mensuales y un peso por unidad de 0.073 kg, la carga transportada es de 494.94 kg/mes, con una carga-distancia de 39,916.91 kg·m/mes.

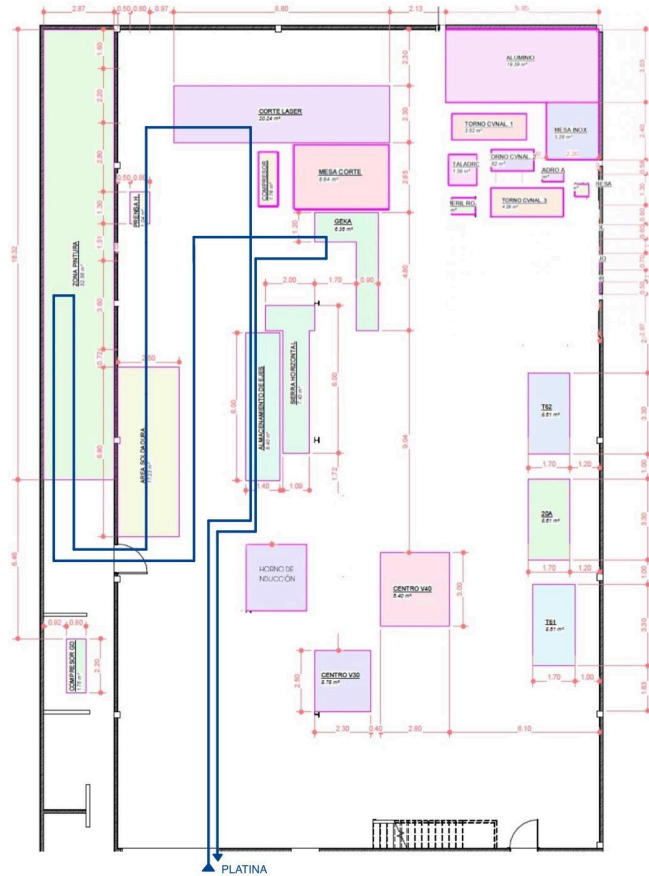


Figura CXII. Distribución prevista para la llegada del horno (platinas)

Carga-Distancia Total y Consideraciones Finales

La carga-distancia total en esta distribución asciende a 373,111.10 kg·m/mes. La principal mejora en esta configuración es la inclusión del Horno dentro de la planta, eliminando la necesidad de transportar externamente el Pasador, lo que reduce costos y tiempos logísticos.

Diagrama multi producto

Como parte de las observaciones realizadas durante la exposición del proyecto de diseño, se elaboró un diagrama multiproducto que permite visualizar de manera más clara y detallada el flujo de proceso de los principales productos fabricados por la empresa Cadenpal. En la tabla se representan los recorridos secuenciales de los componentes rodillo, buje, pasador y platina con la implementación del Tratamiento térmico dentro de las instalaciones de Cadenpal. Cada fila indica una estación o proceso específico, mientras que los números señalan el orden de paso de cada producto por dichas estaciones. Facilitando la comparación entre procesos, la identificación de operaciones compartidas y la detección de oportunidades de mejora en la distribución de planta y en la integración de procesos, como el tratamiento térmico, actualmente tercerizado.

Tabla LXII. Diagrama Multiproducto

	AREA	RODILLO	BUJE	PASADOR	PLATINA
A	Entrada	1	1	1	1
B	Almacenamiento de ejes	2	2	2	2
C	Sierra horizontal		3	3	
D	Fresado		4		
E	Fresado (T62)			4	
F	Torneado (20A)			5	
G	Máquina T61 (CNC)	3	5		
H	Centro Mecanizado			6	
I	Entrada	4		7	
J	Tratamiento térmico (Interno)	5		8	
K	Corte láser				3
L	Prensa				4
M	Soldadura				5
N	Zona de Pintura	6	6	9	6
O	Geka	7	7	10	7
	Almacenamiento de ejes	8	8	11	8
	Entrada	9	9	12	9

Como complemento al diagrama multiproducto presentado anteriormente, se detalla en la siguiente tabla la secuencia de procesamiento correspondiente a cada uno de los productos: rodillo, buje, pasador y platina. Se representa la ruta que sigue cada uno de los procesos dentro de la planta, además, se incluye la demanda mensual estimada para cada producto.

Tabla LXIII. Secuencia de procesamiento diagrama Multiproducto

PRODUCTO	SECUENCIA DEL PROCESAMIENTO	DEMANDA MENSUAL
RODILLO	A-B-G-I-J-N-O-A-B	14504
BUJE	A-B-C-D-G-N-O-A-B	16950
PASADOR	A-B-C-E-F-H-I-J-N-O-A-B	6780
PLATINA	A-B-K-L-M-N-O-A-B	11993
TOTAL		50227

Porcentaje de importancia

$$\text{Rodillo} = \frac{14.504}{50.227} \times 100 = 28,87$$

$$\text{Buje} = \frac{16.950}{50.227} \times 100 = 33,75$$

$$\text{Pasador} = \frac{6.780}{50.227} \times 100 = 13,50$$

$$\text{Platina} = \frac{11.993}{50.227} \times 100 = 24,88$$

DISTRIBUCIÓN CON METODOLOGÍA SLP (CONSIDERANDO CARGA-DISTANCIA)

Matriz de relaciones

Se presenta una nueva propuesta de distribución de planta, desarrollada a partir de la distribución actual y considerando una serie de parámetros clave para la ubicación óptima de cada máquina. Esta

propuesta sigue la metodología Systematic Layout Planning (SLP), aplicando sus etapas fundamentales para garantizar una disposición eficiente de los equipos y áreas de trabajo. A continuación, se detallan los criterios de diseño, el análisis de relaciones entre actividades y la configuración final propuesta.

La matriz de relaciones de actividades (ver **Figura CXIII**) se estableció como punto de partida del estudio por su capacidad para identificar y priorizar las interacciones clave entre áreas productivas. Esta herramienta, fundamentada en criterios estandarizados (A, E, I, O, U, X), permitió determinar las relaciones críticas que condicionan el diseño del layout, como las proximidades obligatorias entre estaciones de trabajo y las restricciones de seguridad entre equipos. Su implementación sistemática garantizó que la posterior aplicación del método SLP y el análisis carga-distancia partieran de una base técnica sólida, alineada con los requerimientos operativos y las normas de seguridad industrial de la planta.

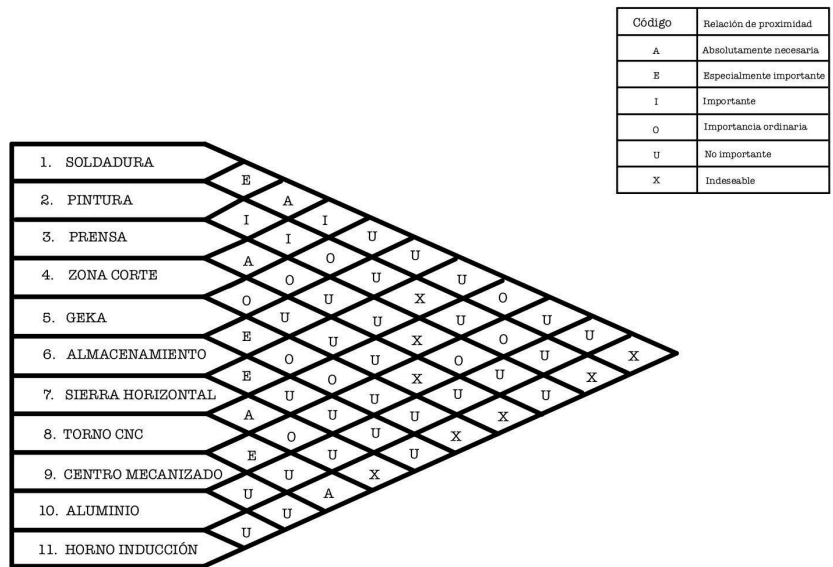


Figura CXIII. Matriz de relación de actividades

La determinación de los valores de cercanía (A, E, I, O, U, X) representa un paso fundamental tras el desarrollo de la matriz de relaciones, pues establece criterios objetivos para materializar las interacciones identificadas en el diseño físico de la planta. Esta clasificación jerárquica, que va desde relaciones "absolutamente necesarias" hasta "no deseadas", proporciona el marco técnico indispensable para traducir los vínculos operativos en decisiones espaciales concretas. Al definir estos parámetros, se asegura que la distribución resultante no solo optimice los flujos productivos, sino que también incorpore consideraciones de seguridad y eficiencia, manteniendo coherencia con los requerimientos técnicos identificados en la fase de diagnóstico. La aplicación sistemática de estos valores garantiza que cada decisión de ubicación responda a una necesidad operativa debidamente fundamentada.

VALOR	CERCANÍA	TIPO DE RELACIÓN (GRÁFICAMENTE)
A	Absolutamente necesaria	
E	Especialmente importante	
I	Importante	
O	Cercanía Ordinaria	
U	Sin importancia	
X	No deseadas	

Figura CXIV. Valores de cercanía y tipos de relación para análisis de distribución en planta

Posteriormente, en la **Figura CXV** se presenta la cuantificación espacial de los departamentos productivos mediante la metodología SLP, donde cada área se expresa tanto en metros cuadrados como en unidades estandarizadas (1 unidad = 4 m²). Este análisis revela las demandas espaciales reales de cada proceso. La conversión a unidades normalizadas permite una integración coherente con los criterios de proximidad (A, E, I, O, U, X), facilitando la optimización del layout al relacionar directamente los requerimientos físicos con las interdependencias operativas entre departamentos. Esta cuantificación constituye el insumo fundamental para garantizar que la redistribución planteada respete tanto las necesidades espaciales como las relaciones funcionales identificadas en el análisis previo.

		1 unidad	4 m ²
DEPARTAMENTOS SLP	Área		Unidades
Soldadura	17.25 m ²		4.3125
Pintura	52.58 m ²		13.145
Prensa	1.04 m ²		0.26
Zona Corte	45.32 m ²		11.33
Geka	8.16 m ²		2.04
Almacenamiento	8.4 m ²		2.1
Sierra Hor.	11.2 m ²		2.8
Torno CNC	20.23 m ²		5.0575
Centro de mecanizado	20.55 m ²		5.1375
Aluminio	50.2 m ²		12.55
Horno Inducción	5.5 m ²		1.375
			60.1075

Figura CXVI. Cálculo de unidades de área por departamento según estándar SLP (4 m² por unidad)

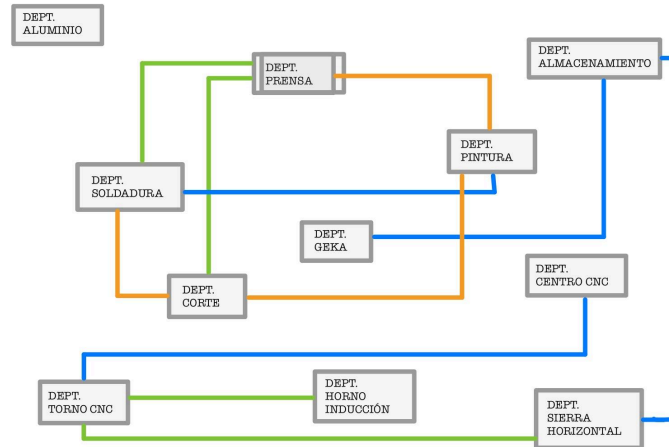


Figura CXVII. Conjunto de departamentos productivos para análisis de distribución en planta

Además, se realiza una tabla de rankings que toma en cuenta ciertos parámetros. La Figura CXVIII presenta un análisis jerárquico de los departamentos productivos basado en dos variables clave: el número de relaciones importantes (A, E, I) y las unidades de área requeridas. La metodología asigna un valor prioritario que resulta del producto entre estos factores, estableciendo un ranking claro de prioridades. Este análisis cuantitativo permite fundamentar objetivamente las decisiones de distribución.

DEPARTAMENTOS SLP	Relaciones Importantes (A, E, I)	Unidades	Multiplíc.	Ranking
Soldadura	3	4.31	12.9375	4
Pintura	3	13.15	39.435	1
Prensa	3	0.26	0.78	10
Zona Corte	3	11.33	33.99	2
Geka	1	2.04	2.04	8
Almacenamiento	2	2.10	4.2	7
Sierra Hor.	2	2.80	5.6	5
Torno CNC	3	5.06	15.1725	3
Centro de mecanizado	1	5.14	5.1375	6
Aluminio	0	12.55	0	11
Horno Inducción	1	1.38	1.375	9

Figura CXVIII. Priorización de departamentos según relaciones importantes y unidades

El análisis mediante la metodología del SLP generó inicialmente una distribución teórica basada en una tabla de rankings, la cual fue posteriormente ajustada considerando las restricciones de movimiento identificadas. La cortadora láser y el sistema de ventilación del compresor presentaron limitaciones de reubicación debido a sus características técnicas de instalación. Asimismo, el horno de inducción requirió una ubicación específica que garantice distancias de seguridad respecto a la máquina Geka (por riesgos térmicos), la zona de soldadura (por interferencia electromagnética), la sierra horizontal (por prevención de incidentes mecánicos) y zona de pintura (por manipulación de elementos inflamables), cabe resaltar que en este punto, tal como en la clasificación de las relaciones entre departamentos, se volvió a tener muy presente buscar generar una disminución en las cargas que se mueven en la planta mensualmente. A continuación, podemos observar la primera distribución planteada y posteriormente la reubicación de la misma basada en restricciones ya mencionadas.

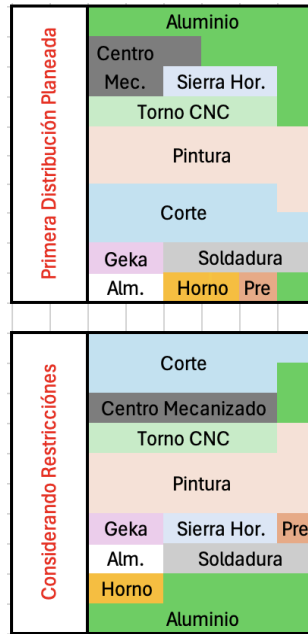


Figura CXIX. Resultado gráfico de la distribución de planta nueva y considerando restricciones

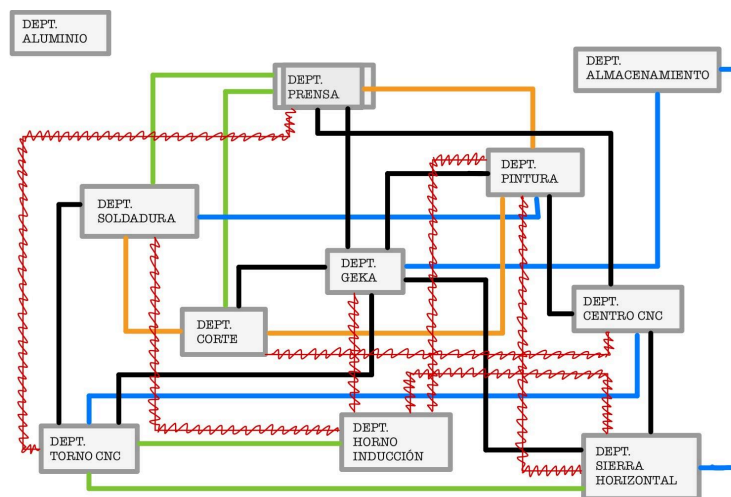


Figura CXX. Áreas de la planta implementando valores de cercanía y tipos de relación para análisis de distribución en planta

En el marco del análisis de la redistribución de la planta, se realiza un análisis detallado del flujo de materiales, tomando como referencia la **Figura CXX**, la cual ilustra las áreas de la planta y sus relaciones de cercanía. Este estudio se centra en el recorrido de cada una de las áreas, evaluando su trayectoria, distancias recorridas y la carga-distancia asociada, con el fin de identificar oportunidades de optimización en la distribución actual. A continuación, se presenta un desglose cuantitativo del proceso, incluyendo el cálculo de la carga total transportada y su impacto en la eficiencia operativa para reducir la problemática.

Rodillo

El Rodillo comienza su recorrido en la entrada, desde donde se traslada 0.66 metros hasta el almacenamiento de ejes. Luego, recorre 18.3 metros hasta el T61 (CNC) para su mecanizado y 18.66 metros de regreso a la entrada. Posteriormente, se dirige 18.25 metros a la zona de pintura, seguido de 0.75 metros hasta Geka y 0.8 metros al almacenamiento de ejes, para finalmente desplazarse 16.7 metros de regreso a la entrada. El recorrido total es de 74.12 metros. Con una producción mensual de 14,502 piezas, cada una con un peso de 0.03 kg, el peso total transportado asciende a 435.06 kg/mes, resultando en una carga-distancia de 32,246.65 kg·m/mes.

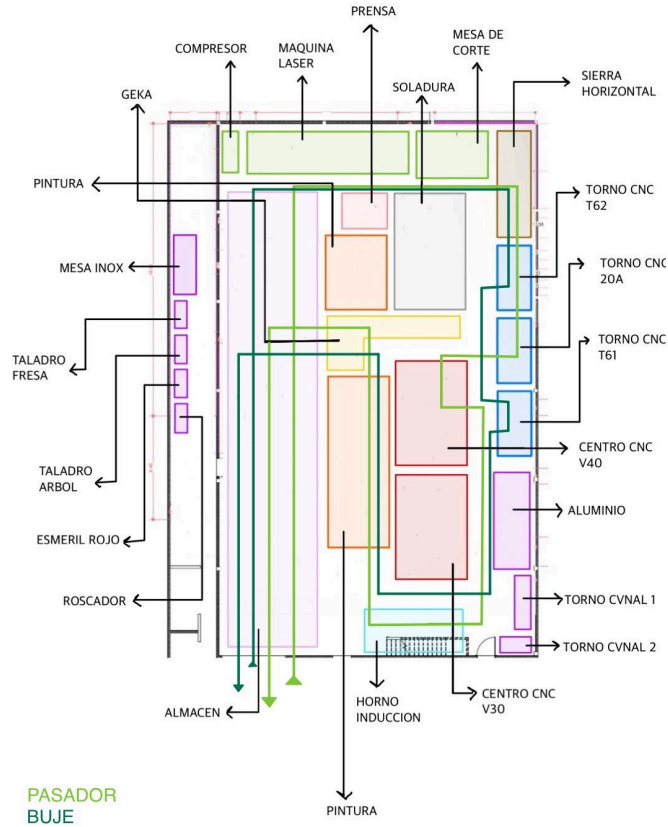


Figura CXXII. Distribución propuesta SLP para pasador y buje

Platina

El flujo de la Platina comienza en la entrada, recorriendo 0.66 metros hasta el almacenamiento de ejes. Luego, avanza 22.75 metros hasta el corte láser, seguido de 5.67 metros a la prensa, 1.2 metros a soldadura, y 1 metro más hasta la pintura. Posteriormente, se traslada 1.75 metros hasta Geka, 0.8 metros al almacenamiento de ejes, y finalmente 16.7 metros de regreso a la entrada. La distancia total recorrida es de 50.53 metros. Con una producción mensual de 11,993 piezas y un peso unitario de 0.2375 kg, la carga total transportada es de 2,848 kg/mes, con una carga-distancia de 143,926.49 kg-m/mes.

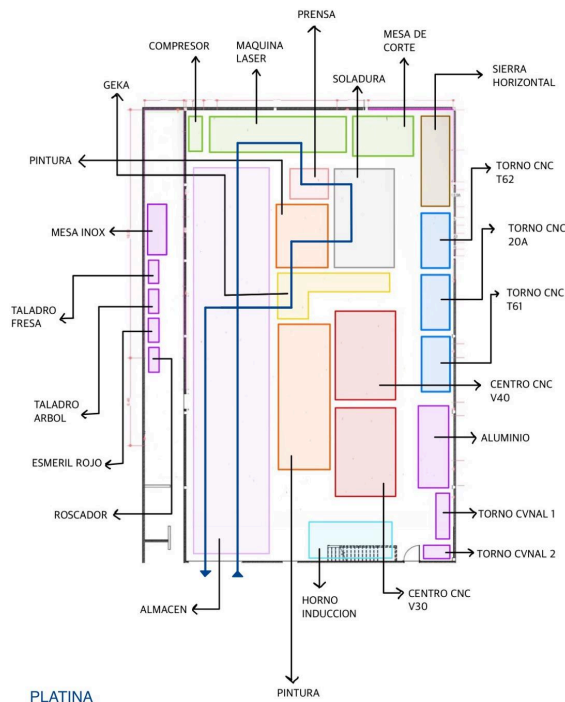


Figura CXXIII. Distribución propuesta SLP para platinas

Comparativa y decisión

Para determinar la distribución más eficiente de la planta, se compararon tres escenarios diferentes:

1. Distribución actual: Refleja la organización actual de la planta, sin modificaciones adicionales.
2. Distribución propuesta por la empresa: Incluye el horno de inducción y algunas modificaciones adicionales basadas en los requerimientos de producción.
3. Distribución generada con la metodología SLP: Esta distribución fue diseñada utilizando la metodología SLP (Systematic Layout Planning), la cual toma en cuenta tanto variables cualitativas como la seguridad y salud en el trabajo, así como análisis cuantitativos basados en la carga-distancia, buscando optimizar el flujo de materiales y minimizar los costos de transporte.

Distribución Actual

La distribución actual presenta altos valores de carga-distancia, alcanzando un total de 394,539.35 kg·m/mes. El rodillo recorre 115.56 metros con una carga de 50,275.53 kg·m/mes, el buje recorre 116.95 metros con 85,244.04 kg·m/mes, el pasador realiza un recorrido de 115.6 metros con 57,215.06 kg·m/mes, y la platina recorre 70.85 metros con 201,804.71 kg·m/mes. Estos largos recorridos generan un alto volumen de carga y distancias largas dentro de la planta, lo cual incrementa los tiempos de transporte, los costos operativos y el desgaste de los operarios.

Distribución Propuesta por la Empresa

La distribución propuesta por la empresa para incluir el horno de inducción muestra una mejora, con una reducción de la carga-distancia total a 373,111.10 kg·m/mes. Aunque presenta una disminución de 5.4% respecto a la distribución actual, aún mantiene recorridos relativamente largos para el rodillo (115.56 metros), el buje (116.95 metros) y la platina (69.4 metros). Sin embargo, la ruta del pasador se optimiza significativamente, reduciendo su recorrido a 80.65 metros y su carga-distancia a 39,916.91 kg·m/mes. Este ajuste, aunque favorable, no consigue una reducción tan profunda en la carga-distancia total como la distribución generada con la metodología SLP.

Distribución Generada con Metodología SLP

La distribución optimizada utilizando la metodología SLP demuestra ser la más eficiente. Esta distribución reduce la carga-distancia total a 277,057.83 kg·m/mes, lo que representa una disminución de 29.8%

con respecto a la distribución actual y 25.7% frente a la propuesta por la empresa. Este cambio se logra gracias a la optimización de los trayectos del rodillo (reducción de 35.8%), el buje (reducción de 29.5%) y la platina (reducción de 28.7%). El rodillo, por ejemplo, disminuye su recorrido de 115.56 metros a 74.12 metros, lo que reduce su carga-distancia de 50,275.53 kg·m/mes a 32,246.65 kg·m/mes. Además, la optimización en la ruta del buje (de 116.95 metros a 82.49 metros) y el pasador (de 115.6 metros a 82.35 metros) también contribuyen a esta mejora.

En términos generales, esta tercera distribución no sólo reduce significativamente las distancias recorridas por cada componente, sino que también tiene en cuenta aspectos cualitativos como la seguridad de los operarios, el uso eficiente del espacio y la infraestructura, y la mejora en la ergonomía. La reducción en la carga-distancia no solo implica menores costos operativos y tiempos de transporte, sino que también mejora la eficiencia general de la planta, asegurando un entorno más seguro y optimizado para los trabajadores.

Distribución utilizando el método Guerchet

La distribución de planta presentada inicialmente fue desarrollada mediante la metodología SLP (Systematic Layout Planning), con base en relaciones cualitativas entre áreas, considerando factores como frecuencia de interacción, tipo de materiales, seguridad y recorridos. Este enfoque permitió establecer una propuesta funcional desde el punto de vista del flujo de materiales y la cercanía deseada entre estaciones, optimizando las relaciones de carga-distancia entre procesos clave. Sin embargo, el método SLP no contempla de forma directa las dimensiones físicas reales de los equipos ni el espacio requerido para su operación, mantenimiento o evolución futura.

Con el fin de validar la factibilidad espacial de la propuesta y realizar los ajustes necesarios para garantizar su implementación en el área disponible, se recurrió al método Guerchet. Este enfoque permite calcular con mayor precisión la superficie necesaria para cada estación, incluyendo la superficie estática (dimensiones del equipo), la superficie de gravitación (acceso operativo) y la superficie de evolución (margen adicional para desplazamientos y flexibilidad). Los resultados obtenidos se consolidan en la **Tabla #RESULTADOS#**, que resume el análisis detallado por estación de trabajo y constituye la base técnica para la redistribución propuesta.

Tabla LXIV. Resultados Método Guerchet

Equipo	N	Ss (m ²)	Sg (m ²)	Se (m ²)	St (m ²)
Zona de pintura	1	54.01	54.01	16.20	124.23
Compresor	1	1.76	1.76	0.53	4.05
Presma	1	1.04	1.04	0.31	2.39
Corte láser	1	20.24	20.24	6.07	46.55
Área aluminio	1	39.60	79.20	17.82	136.62
GEKA	1	17.52	35.04	7.88	60.44
Sierra horizontal	1	12.00	12.00	3.60	27.60
Almacenamiento de ejes	1	8.40	16.80	3.78	28.98
Mesa de corte	1	8.64	8.64	2.59	19.87
Área soldadura	1	17.25	34.50	7.76	59.51
Torno CVNAL2	1	1.62	1.62	0.49	3.73
Tornos de mecanizado (x3)	3	5.61	5.61	1.68	38.71
Torno CVNAL3	1	4.29	4.29	1.29	9.87
Centro mecanizado V40	1	8.40	8.40	2.52	19.32
Centro mecanizado V30	1	5.75	5.75	1.72	13.22
Compresor GD	1	1.76	1.76	0.53	4.05

TOTAL					599.14 m ²
--------------	--	--	--	--	-----------------------

El análisis con el método Guerchet permitió cuantificar el área requerida por cada elemento de la planta de forma técnica, manteniendo las dimensiones reales de las estaciones de trabajo, ajustando de forma estratégica los lados operativos utilizados, y aplicando un coeficiente de evolución acorde con la industria metalmeccánica. A partir de estos cálculos, se desarrolló una propuesta de redistribución espacial que integra todos los elementos clave, incluyendo el área de aluminio, dentro de los 630.9 m² disponibles en planta, sin comprometer la seguridad operativa ni la funcionalidad de los procesos. Este ejercicio se apoya en los valores presentados en la **Tabla LXIII**, donde se evidencia la optimización lograda en cada componente del layout.

Esta nueva propuesta de layout no solo garantiza el ajuste físico de todos los elementos dentro del espacio real, sino que también optimiza el flujo de trabajo y facilita el movimiento de operarios y del montacargas, manteniendo zonas de paso claras y funcionales. Al combinar el análisis cualitativo del método SLP con la precisión cuantitativa del método Guerchet, se logra una solución de distribución integral, alineada tanto con los requerimientos funcionales del proceso como con las restricciones espaciales del entorno productivo.

VALIDACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Validación de la productividad

La capacidad instalada representa el nivel máximo de producción que la empresa puede alcanzar con los recursos disponibles. Para su cálculo, se consideró la producción horaria de cada equipo y su rendimiento en función del tiempo laboral productivo mensual, en cadenpal se manejan unas jornadas laborales de 43.5 horas semanales y 188.34 horas mensuales.

VALORES CALCULADOS		
MAQUINA	PIEZA	PIEZAS/MES
TORNO CNC	PASADOR	6,780
TORNO CNC	RODILLO	14,502
TORNO CNC	BUJE	16,951
CENTRO CNC	PASADOR	6,780
CENTRO CNC	RODILLO	14,502
CENTRO CNC	BUJE	16,951
LASER	PLATINA	11,993
PRENSA	PLATINA	11,993
TOTAL PIEZAS SEPARADAS		50,226

Figura CXXIV. Valores calculados de la capacidad máxima de la planta, por áreas

	Piezas terminadas mensuales	Piezas por eslabón	Cantidad de eslabones posibles	Capacidad de eslabones completos	Metros de cadena	Piezas terminadas excedentes
RODILLO	14,502	1	14,502	5,996	856.57	8506
PASADOR	6,780	1	6780			784
BUJE	16,951	1	16951			10955
PLATINAS	11,993	2	5996			0

Figura CXXV. Cantidad de piezas, por áreas

A partir de estos datos, se determinó la capacidad de producción mensual por máquina:

Tornos CNC y Centros de Mecanizado:

Pasador: 6,780 piezas/mes

Rodillo: 14,502 piezas/mes

Buje: 16,951 piezas/mes

Máquina Láser: 12,054 piezas/mes

Prensa: 33,901 piezas/mes

Sierra Horizontal: 9,417 pasadores/mes

Dado que cada eslabón de cadena está compuesto por 1 rodillo, 1 pasador, 1 buje y 2 platinas, se estableció que el recurso limitante en la capacidad de ensamblaje es la cantidad de platinas disponibles (11,993 piezas), lo que permite ensamblar solo 5,996 eslabones por mes. Considerando que un metro de cadena requiere 7 eslabones, la capacidad máxima de producción de cadena es de 856.57 metros mensuales.

A pesar de la capacidad instalada, se identificó un excedente significativo en la producción de componentes individuales: 8,506 rodillos, 784 pasadores y 10,955 bujes, lo que sugiere un desbalance en la asignación de recursos y posibles oportunidades de mejora en la planificación de producción.

VALIDACIÓN DE ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN

Validación en costos

Como punto de partida, se establecieron una serie de supuestos técnicos y financieros fundamentales para el análisis. La inflación utilizada corresponde al promedio histórico de los últimos 10 años en Colombia, equivalente al 5.68%, y se empleó principalmente para proyectar el incremento en los costos de la tercerización del tratamiento térmico. La vida útil del horno, utilizada también como horizonte de depreciación, se fijó en 10 años para ambas alternativas. La tasa de descuento aplicada corresponde al mínimo exigido por la gerencia para proyectos de inversión, del 13%. Actualmente, se tratan 3.600 pasadores al mes, aunque ambos modelos de horno (el que se diseñó y el que se podría adquirir como equipo terminado) tienen capacidad para procesar hasta 4.000 pasadores mensuales, lo cual representa una ventaja frente a escenarios de crecimiento futuro. Con base en datos operativos obtenidos en visitas técnicas, se estableció que el horno funcionará ocho horas diarias. En cuanto a los costos actuales de tercerización, se identificó un valor de \$16.000 COP por kilo de pasador tratado, más \$5.000 COP de transporte a Medellín y \$5.000 COP de retorno a Palmira. Dado que un pasador de la referencia 2100 (la principal en este proyecto) pesa 3,22 kg, el costo total del tratamiento externo por unidad asciende a \$83.720 COP. Considerando la producción mensual actual de 11.592 kg, el costo de la tercerización representa una carga económica considerable.

Supuestos		
Variable	Valor	
Inflación anual estimada	5.68%	Promedio de los últimos 10 años en Colombia
Vida útil horno	10	Años
Tasa de descuento (para VAN)	13.00%	Tasa mínima requerida por gerencia
Pasadores tratados al mes	3,600	Unidades
Ciclos por día	133	(1 por pasado en el modelo diseñado)
Días hábiles al mes	30	
Horas de operación estimadas	8	Diariamente
Costo actual tercerizado	83,720	Por pasador
Kilogramos de pasador producidos al mes	11,592	
Costo kilo de pasadores tratado	16000	
Costo flete por kilo de pasadores (ida)	5000	
Costo flete por kilo de pasadores (regreso)	5000	
Costo total de tratamiento por kilo	26000	
Peso de un pasador de cadena referencia 21	3.22	

Figura CXXVI. Supuestos técnicos y financieros para el análisis de inversión del horno de T.T

En relación con los costos iniciales, se compararon dos alternativas: la compra directa de un horno CGP-30 kW Ultra-High Frequency Induction Heating Machine y el diseño e implementación de un horno de

inducción desarrollado a la medida. El equipo comprado tiene un valor base de \$29.795.000 COP, mientras que el diseño propio implicó una inversión total de \$50.220.118 COP, como resultado del ensamblaje de múltiples componentes específicos. En ambos casos, la instalación tiene un costo adicional de \$3.775.000 COP, asumido por la misma empresa especializada que ya realiza labores de mantenimiento en la planta, lo cual evita gastos adicionales por adecuación de infraestructura. Así, el total de la inversión inicial asciende a \$33.570.000 COP para el equipo comprado y a \$53.995.118 COP para el horno diseñado.

Costos Iniciales		
Concepto	Compra	Diseño
Costo del horno	29,795,000	50,220,118
Sistema de control		11,446,900
Instalación del sistema		2,000,000
Sistema de calentamiento		8,646,768
Instalación calentamiento		850,000
Chiller		19,776,450
Mano de obra de diseño		7,500,000
Instalación total	3,775,000	3,775,000
TOTAL	33,570,000	53,995,118

Figura CXXVII. Comparación de costos entre la compra del horno y el diseño

En cuanto a los costos operativos anuales, se consideraron los consumos energéticos, el mantenimiento programado y el reemplazo de repuestos. La tarifa eléctrica vigente en Palmira (Valle del Cauca) es de \$353.31 COP por kWh. Con base en la potencia nominal de cada equipo (25 kWh para el diseñado y 30 kWh para el comprado) y una operación de 8 horas diarias durante 30 días al mes, se estimó que el horno diseñado consume 6.000 kWh mensuales (equivalente a \$25.438.320 COP anuales), mientras que el horno comprado consume 7.200 kWh al mes (equivalente a \$30.525.984 COP anuales). El mantenimiento anual, excluido del primer año por estar cubierto por la garantía, tiene un costo de \$2.600.000 COP en ambos casos. Finalmente, se estimó un gasto anual en repuestos de \$2.000.000 COP para el horno comprado y \$2.500.000 COP para el diseñado. De esta forma, el total de costos operativos anuales asciende a \$35.125.984 COP para el equipo comprado y \$30.538.320 COP para el diseñado.

Costos Operativos Anuales		
Concepto	Compra	Diseño
Consumo energético	30,525,984	25,438,320
Mantenimiento	2,600,000	2,600,000
Repuestos	2,000,000	2,500,000
TOTAL ANUAL	35,125,984	30,538,320
		Potencia de horno diseñado 25 kWh
		Potencia de horno comprado 30 kWh
		Tarifa energética \$ 353.31 \$/kWh
		Cosumo diario
		Horno Diseñado 200 kWh
		Horno Comprado 240 kWh
		Consumo mensual
		Horno Diseñado 6,000 kWh
		Horno Comprado 7,200 kWh

Figura CXXVIII. Comparación de los costos operativos anuales entre la compra del horno y el diseño

El análisis financiero se realizó a través de la proyección de flujos de caja a 10 años, considerando tanto los costos iniciales como los ahorros generados por la internalización del proceso térmico. Los flujos fueron actualizados al valor presente utilizando la tasa de descuento del 13%, calculando así el Valor Presente Neto (VPN) de cada alternativa. El resultado del VPN para el horno comprado fue de \$25.250.623.130 COP, mientras que para el horno diseñado fue de \$25.244.008.628 COP. Se calculó también la Tasa Interna de Retorno (TIR), con resultados notoriamente altos en ambos casos: 11.285,46% para el horno comprado y 7.023,28% para el diseñado. Por último, se evaluó el periodo de recuperación (payback), el cual fue de 0,0089 años (aproximadamente 3,2 días) para la alternativa comprada y de 0,0142 años (aproximadamente 5,2 días) para el horno diseñado. Ambos resultados evidencian una rápida recuperación de la inversión gracias al ahorro sustancial generado por eliminar la tercerización del tratamiento térmico.

Flujo de Caja, VPN, TIR y Payback		
Año	Compra - Costos netos	Diseño - Costos netos
0	(33,570,000)	(53,995,118)
1	3,786,627,303	3,789,172,455
2	4,001,124,446	4,003,669,598
3	4,230,552,706	4,233,097,858
4	4,473,012,491	4,475,557,643
5	4,729,243,992	4,731,789,144
6	5,000,029,442	5,002,574,594
7	5,286,195,506	5,288,740,658
8	5,588,615,802	5,591,160,954
9	5,908,213,571	5,910,758,723
10	6,245,964,493	6,248,509,645
Flujos traídos al presente		
0	(33,570,000)	(53,995,118)
1	3,350,997,613.45	3,353,249,960.53
2	3,133,467,339.27	3,135,460,566.77
3	2,931,985,239.08	2,933,749,157.22
4	2,743,382,329.67	2,744,943,319.18
5	2,566,844,166.23	2,568,225,572.87
6	2,401,606,778.63	2,402,829,262.39
7	2,246,953,664.59	2,248,035,508.63
8	2,102,212,947.24	2,103,170,331.34
9	1,966,754,690.13	1,967,601,932.70
10	1,839,988,362.51	1,840,738,134.69
VPN	25,250,623,131	25,244,008,628
TIR	11285.46%	7023.28%
Payback	-0.008865409	-0.014249844
	Aprox 3.2 días	Aprox 5.2 días

Figura CXXIX. Proyección de los flujos de caja de las dos alternativas

Conclusión financiera

El análisis financiero realizado demuestra que la internalización del tratamiento térmico, ya sea mediante la adquisición de un horno comercial o el diseño de uno propio, constituye una alternativa estratégica altamente rentable frente al modelo actual de tercerización. Aunque ambas opciones presentan un ahorro considerable al eliminar los costos externos de tratamiento y transporte, el horno comprado destaca por arrojar mejores indicadores financieros. En particular, presenta un Valor Presente Neto (VPN) ligeramente superior, de \$25.250.623.130 COP frente a \$25.244.008.628 COP, una Tasa Interna de Retorno (TIR) significativamente más alta, con 11.285,46 % frente a 7.023,28 %, y un periodo de recuperación más corto, de aproximadamente 3,2 días frente a 5,2 días. Estos resultados, junto con un menor costo de inversión inicial, lo posicionan como la alternativa más atractiva desde una perspectiva estrictamente financiera. No obstante, el horno diseñado continúa siendo una opción viable, especialmente si se prioriza el control técnico del proceso o la personalización de la solución. En conclusión, ambos escenarios garantizan una mejora sustancial en la rentabilidad y autonomía operativa de la empresa, pero el horno adquirido ofrece un retorno más eficiente en términos de inversión.

Validación con modelo de simulación

Para la validación de la capacidad del objetivo específico planteado, se desarrollaron dos modelos de simulación en el software FlexSim 2025. En el primer modelo se representó el proceso actual de producción, utilizando valores promedio para los tiempos de operación de la maquinaria de planta y una distribución triangular para simular la etapa de envío de los pasadores a Medellín. Dicha distribución se definió con parámetros de 3, 5.5 y 8 días, basados en datos históricos suministrados por la empresa: 5.5 días corresponde al tiempo habitual desde el despacho hasta la recepción del material tratado, 8 días representa el escenario en condiciones de alta demanda y 3 días refleja casos en los que se ha solicitado celeridad especial. Este modelo arrojó como resultado una producción total de 16 lotes procesados en un periodo de tres meses, como se observa en la **Figura CXXX**.

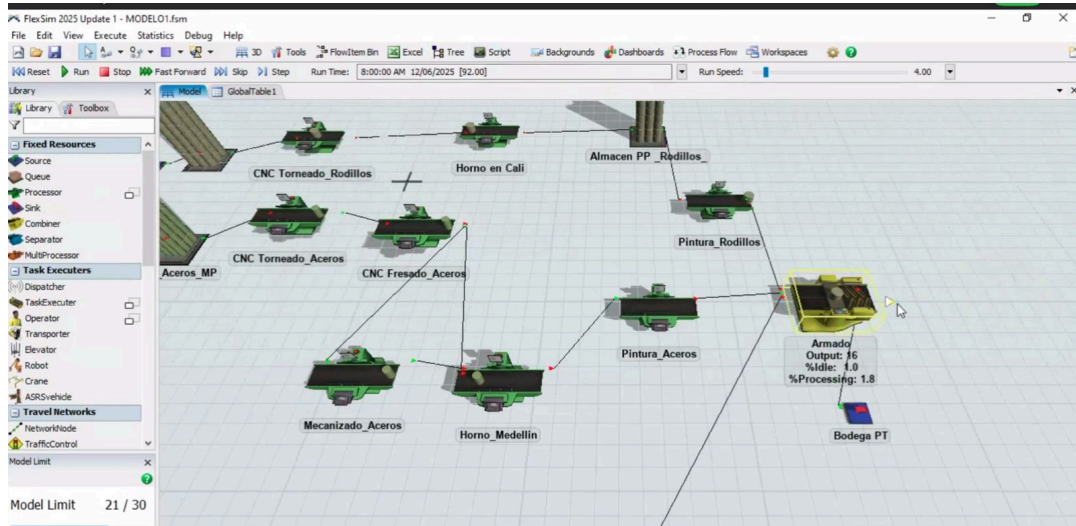


Figura CXXX. Simulación situación actual

Por otro lado, se desarrolló un segundo modelo incorporando un horno de tratamiento térmico interno (in-house), eliminando completamente los tiempos de transporte de ida y regreso hacia Medellín, y permitiendo un flujo de producción mucho más continuo y controlado. En este caso, se estableció que el horno requiere aproximadamente el 75% de una jornada laboral para procesar un lote completo de pasadores, operando sin interrupciones ni dependencia externa. La simulación de este escenario evidenció un aumento significativo en la productividad, alcanzando un total de 120 lotes en el mismo periodo de tres meses, como se muestra en la **Figura CXXXI**. Cabe destacar que el objeto que representa el horno en el modelo cumple funcionalmente tanto con los requerimientos de un horno diseñado a medida como con los de un modelo comercial disponible en el mercado, superando no solo la capacidad actual, sino también las expectativas establecidas por la gerencia, que proyecta alcanzar 50 lotes trimestrales.

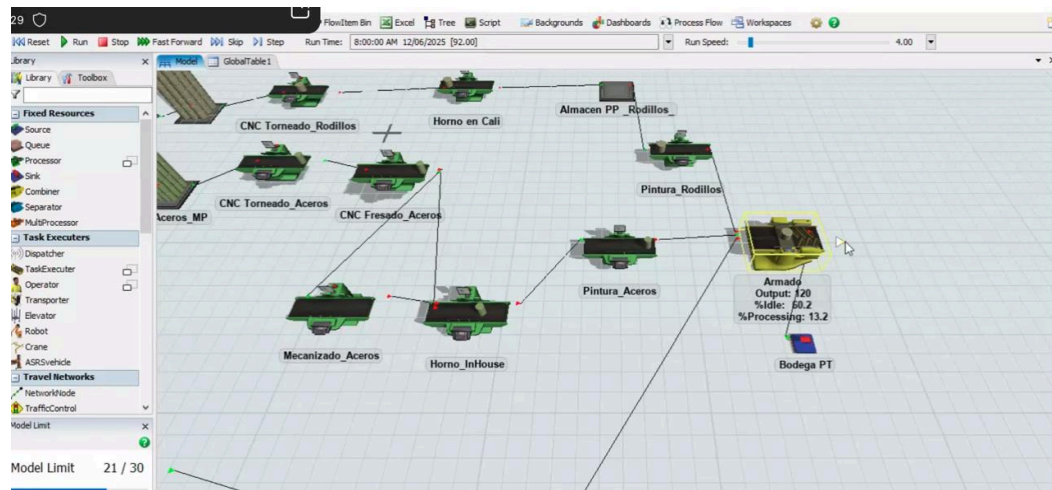


Figura CXXXI. Simulación situación actual

V. CONCLUSIONES

Conclusión del rediseño del sistema productivo de Cadenpal

El desarrollo integral del proyecto de rediseño del proceso productivo en Mecanizados Industriales Cadenpal E.U. ha permitido establecer mejoras sustanciales en la eficiencia operativa, la estructura financiera y la planificación estratégica de la planta. A través de un enfoque interdisciplinario que combinó herramientas de ingeniería industrial, análisis financiero y simulación de procesos, se logró una visión holística de las problemáticas existentes y de las oportunidades de mejora.

En primer lugar, la propuesta de una nueva distribución de planta, construida mediante la metodología

Systematic Layout Planning (SLP), se consolidó como la alternativa más adecuada entre las tres evaluadas. Esta opción no solo logró una reducción del 29,8 % en la carga-distancia en comparación con la distribución actual, sino que también incorporó consideraciones cualitativas clave como la seguridad del personal, la ergonomía y el aprovechamiento eficiente del espacio. Esta distribución representa un equilibrio óptimo entre el flujo de materiales y el bienestar del operario, factores determinantes para una operación sostenible y competitiva.

En el ámbito financiero, se llevó a cabo un análisis detallado de dos alternativas para la internalización del tratamiento térmico de pasadores: la adquisición de un horno comercial y el diseño de uno propio. Ambas alternativas arrojaron resultados financieros altamente positivos, con periodos de recuperación inferiores a una semana y TIR superiores al 7.000 %. Sin embargo, la opción de adquirir un horno CGP-30KW demostró ser la más favorable, tanto por su menor inversión inicial como por su superior rentabilidad, reflejada en un Valor Presente Neto más alto, una TIR de 11.285 % y un payback de apenas 3,2 días. Esta solución no solo asegura el retorno eficiente de la inversión, sino que también garantiza la capacidad de responder a la demanda actual y a escenarios de crecimiento futuro, con una capacidad instalada de 4.000 pasadores mensuales frente a una producción actual de 3.600.

En términos operativos y de productividad, la validación del modelo propuesto mediante simulaciones en FlexSim evidenció el impacto concreto de la integración del horno in house. En el modelo base, que simula las condiciones actuales con tratamiento tercerizado y tiempos de envío variables bajo una distribución triangular (3, 5.5 y 8 días), la producción alcanzó apenas 16 lotes en un periodo de tres meses. En contraste, el modelo con horno interno permitió alcanzar una producción de hasta 120 lotes en el mismo periodo, gracias a un flujo mucho más continuo y sin interrupciones logísticas. Este resultado no solo supera con creces la capacidad actual, sino también las expectativas de la gerencia, quienes aspiran a una meta de 50 lotes trimestrales.

Adicionalmente, la simulación permitió visualizar de forma clara los cuellos de botella y las oportunidades de mejora en la secuencia de procesos, brindando una herramienta de análisis poderosa para la toma de decisiones a nivel gerencial y operativo. El uso de modelos virtuales para anticipar resultados futuros y optimizar recursos se presenta así como una práctica altamente recomendable para el diseño y la planificación de sistemas productivos.

En conclusión, el proyecto demostró que la integración de herramientas de distribución en planta, análisis financiero riguroso y simulación de procesos productivos permite tomar decisiones estratégicas informadas, sostenibles y orientadas a resultados concretos. La implementación de las mejoras propuestas no sólo fortalecerá la competitividad de Cadenpal frente al mercado, sino que también consolidará su autonomía operativa y capacidad de respuesta ante los retos de la industria metalmeccánica en Colombia.

Conclusiones acerca del diseño del horno para tratamiento térmico por inducción en los pasadores

Finalmente, después de todo el estudio y trabajo que se dio desde el área de ingeniería mecánica para este proyecto se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se cumplió con el objetivo principal acerca del diseño de un horno de inducción, especialmente con un enfoque en el diseño del mecanismo de posicionamiento de un pasador de cadenas transportadoras que se mueve axialmente a través de una bobina de calentamiento y de un anillo de enfriamiento. Este diseño se complementa con una selección adecuada de cada uno de los componentes periféricos del horno que cumplan con los requerimientos técnicos específicos que la empresa dispone para el tratamiento térmico de los pasadores garantizando compatibilidad con el proceso productivo. Se cumplieron con parámetros como el alcance del tratamiento térmico que se definió para la estructura del pasador de cadenas transportadoras, y, a su vez, se cumplió con alcanzar propiedades mecánicas como dureza, tenacidad y ductilidad debido al tratamiento térmico que se definió. Las propiedades mecánicas como la dureza se logran debido a que en los cálculos se utilizaron los tiempos delimitados en el diagrama TTT para el tratamiento térmico definido, con esto se asegura el alcance de composiciones martensíticas en la superficie radial de la pieza junto con aumento de la tenacidad en el núcleo. También, se puede concluir acerca de la validación y cumplimiento de un requerimiento del cliente en el que solicitaba la inclusión de un chiller con la capacidad de poder enfriar hasta 10 o 5 °C el agua de depósito de la planta que se encuentra inicialmente con una temperatura de 25°C.
- Se dio cumplimiento al objetivo del tratamiento térmico definido en la sección de pasador (calentamiento hasta la temperatura de austenización de 860 °C, enfriamiento acelerado en la superficie de la pieza durante 3 - 5 segundos máximo para alcanzar la mayor composición de microestructura martensítica y mantener las propiedades mecánicas en el núcleo de la pieza). Esto se verifica en los

cálculos realizados, se tomaron estos tiempos especificados, las temperaturas, el calor necesario de 229,70 kJ en el pasador, el calor a extraer de 214, 57 kJ y un caudal de 38,46 L/min requerido para la extracción de ese calor en el tiempo establecido. Los cálculos contienen toda esta información que asegura el alcance del T.T propuesto.

- Se logró diseñar un horno con un peso de 3500 N (menor a lo máximo solicitado de 6000 N), también con un costo final de 67.500.000 COP (menor a lo máximo solicitado de 90.000.000 COP), incluso se diseñó con base en una propuesta que consistió en el aumento de la producción mensual de piezas a 4.500 pasadores producidos al mes. En complemento de lo anterior, también se dio cumplimiento a la disminución del consumo energético, ya que después del diseño, este valor alcanzado es de 1544,4 kW/h (menor a lo máximo solicitado de 1600 kW/h).
- El sistema diseñado puede soportar y mantener temperaturas incluso por encima de 860°C, debido a los materiales que se seleccionaron para la estructura. Estos materiales tienen unos valores de temperatura de fusión mayores a 1000°C. Por otro lado, la estructura del sistema cumple con los requerimientos técnicos de ingeniería como la resistencia mecánica a los esfuerzos flexores, torsores y cortantes (factores de seguridad altos) generados por la carga que ejerce el pasador sobre el sistema estructural y de movimiento, sumado también a la durabilidad de las piezas y los costos de adquisición e instalación de cada uno.
- Se diseñó un sistema de monitoreo y control de variables involucradas en el proceso de tratamiento térmico, a su vez, se seleccionaron todos los componentes que conforman este sistema, como controlador, pantalla HMI, cables, tablero, sensores, etc. Lo anterior validó y cumplió el requisito del cliente acerca de controlar el proceso de tratamiento térmico y el horno.
- La experiencia y evolución del diseño mecánico junto con los principios físicos, de transformaciones de fase, metalográficos del tratamiento térmico por inducción permitió desarrollar un sistema coherente, funcional con una eficiencia del 90% (ponderación dada por el cliente) según lo solicitado por él. La adecuada selección e implementación de componentes como la fuente de alimentación, el chiller, la bobina y el mecanismo de desplazamiento axial del pasador no solo garantiza la viabilidad técnica del horno, sino que se optimizó el proceso térmico para lograr una distribución de calor uniforme, enfriamiento controlado y tiempos de ciclo reducidos.
- El diseño requirió de selección de componentes hidráulicos para asegurar la eficiencia del tratamiento térmico de temple (enfriamiento acelerado del pasador), se realizaron cálculos, estimaciones técnicas y aplicaciones de conceptos de mecánica de fluidos para el diseño del sistema hidráulico de tuberías y poder escoger adecuadamente una bomba de succión y descarga del caudal de agua sobre los orificios del anillo de enfriamiento a la velocidad total de 5,6 mm/s en el lapso de 8,6 segundos durante todo el templado, con una eficiencia del 50% para la bomba seleccionada.
- Se cumplió con una adecuada selección del mecanismo de piñón - cremallera a partir de la aplicación de criterios como peso, costo, materiales, velocidad de avance, tamaño, facilidad de mantenimiento, autobloqueo, resistencia a altas temperaturas, etc, por otro lado, esto complementa el diseño del sistema estructural y de posicionamiento de la muestra. Por lo tanto, la simulación en el software 3D Onshape valida y certifica que se cumple con el movimiento axial del pasador.
- El sistema fue diseñado y ensamblado teniendo en cuenta toda la comprensión de los conceptos y principios físicos acerca de la ley de inducción electromagnética de Faraday y, el efecto Joule, debido a la importancia que esto contiene para fomentar la creación de un estándar y una generalización para la fabricación de los sistemas de inducción, ya que en la literatura no se encuentra un desarrollo demasiado amplio e información exacta y global acerca de su construcción. Por ocasiones, se encontraron en la literatura varias elecciones de carácter arbitrario, no justificado.
- Los cálculos realizados acerca del diseño del sistema mecánico cumplieron con el requerimiento técnico de resistencia de cargas y esfuerzos mecánicos, debido a que el análisis de elementos finitos realizados en la simulación en el software Solidworks arrojó un factor de seguridad por encima de 2,7 con la aplicación del criterio de falla de Von Misses. Esto validó la selección adecuada de los materiales, geometrías y dimensiones de los ejes encargados del posicionamiento y movimiento del pasador. Los valores de los demás factores de seguridad según cada esfuerzo presentado y las cargas cíclicas del sistema oscilan entre 2,5 y 6, exceptuando el el esfuerzo por cortante que arrojó un FS de 503,04. Los valores anteriores dan validez al diseño realizado.

- El diseño cumple con las normativas y reglamentaciones colombianas como los artículos 3 y 4 de Ley 99 de 1993 para sistemas de calentamiento industrial, estos artículos especialmente especifican acerca de los sistemas de extracción de calor por enfriamiento con agua a partir del uso de un tipo de aspersor, sumado al Decreto 1072 de 2015 que aborda la definición y estándar para códigos de clasificación de sistemas de filtrado de aire, ventilación y equipos de extracción de calor enfriamiento y finalmente se cumplió también con la Resolución 0312 de 2019 en el que se aborda el tema de equipos de protección personal para los operarios de la planta de Cadenpal que vayan a manipular procesos y equipos de calentamiento industrial de alta temperatura. Todo lo anterior bajo el aspecto legal y ético de procesos de inducción en la industria, sistemas eléctricos y de calentamiento. Cabe resaltar que ciertas dimensiones, consideraciones y parámetros del diseño fueron tomados a partir de estas normativas como referencias.
- Se consideraron condiciones de mantenimiento mecánico preventivo y correctivo, el sistema de tratamiento térmico (horno y componentes periféricos seleccionados) fue diseñado bajo la norma Técnica Colombiana NTC 5163 que regula el mantenimiento de maquinaria y equipos, incluyendo equipos de calentamiento y sistemas de inducción. La aplicación de esta norma delimitó los estándares y conceptos adecuados que permitieron establecer planes de mantenimiento cada 6 meses para cumplir con el requerimiento del cliente basado en esto.
- Finalmente, el proyecto evidencia una aplicación adecuada de ingeniería mecánica a través de cálculos técnicos, revisión bibliográfica, criterios de selección de materiales y evaluación de costos de instalación. La creación del sistema de movimiento axial y del mecanismo de sujeción del pasador demuestra habilidades en el diseño mecánico, las cuales pueden estar orientadas a resolver requerimientos específicos del proceso de tratamiento térmico. Con esta posibilidad de diseñar soluciones a medida representa un valor significativo para el desarrollo de tecnología industrial personalizada y adaptable. A partir de lo anterior, se puede concluir que el diseño cumplió con satisfacción cada uno de los requerimientos solicitados por el cliente y los de ingeniería.

Recomendaciones acerca del diseño del horno para tratamiento térmico por inducción en los pasadores

De acuerdo con el desarrollo de este trabajo y con la intención de que un futuro se continúe con la investigación de temas relacionados, se realizaron las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda elaborar un prototipo funcional que permita evaluar la viabilidad del diseño propuesto, establecer una comparativa de los resultados que puede generar este prototipo en la simulación real de tratamiento térmico de pasadores en la planta, y finalmente, ajustar cambios en caso de que sea necesario.
- Se recomienda a los ingenieros de Cadenpal que establezcan planes de mantenimiento preventivo y correctivo cada cierto período de tiempo, como pueden ser 6 meses, este mantenimiento va enfocado hacia los puntos de corrosión que se puedan presentar en la estructura del tanque de agua y la pared de soporte, también verificar el desgaste mecánico de las piezas que conforman mecanismo de cremallera - piñón y la fatiga de los ejes encargados del movimiento y posicionamiento axial de la muestra, así como su desgaste químico y térmico.
- Se recomienda el uso de un software de simulación computacional para análisis térmicos en piezas críticas, este análisis puede realizarse por parte de un encargado de Cadenpal para determinar la resistencia térmica de las piezas que tienen un contacto más cercano a los puntos más calientes generados por el proceso de tratamiento térmico por inducción. También, se recomienda el uso de Ansys Fluent para observar el comportamiento del flujo agua y aire en las tuberías del sistema hidráulico entre el depósito de agua - chiller - anillo de enfriamiento.
- También, se recomienda al área de ingeniería industrial responsable del proyecto que realice una revisión del espacio definido para el horno, y, si es posible, que proponga un reajuste de las dimensiones asignadas para este sistema, teniendo en cuenta que hay demasiado espacio en la parte trasera de la planta sin utilizar que sería muy útil para una nueva distribución de planta y unos 3 - 4 metros adicionales para la ubicación de todo el sistema de T.T incluidos sus componentes periféricos.
- Analizar el caso de evaporación y cambio de fase que se presenta al momento de disparar los chorros de agua de enfriamiento al pasador, es recomendable buscar modelos en la literatura o aproximaciones matemáticas que puedan describir el cambio de fase y la cantidad de masa de agua que se convirtió de

líquido a vapor durante el proceso de enfriamiento debido al choque con las altas temperaturas. Se aconseja revisar los conceptos físicos y fenómenos involucrados en la evaporación y cambios de fase del agua.

- Investigar sobre el caso de transferencia de calor debido al enfriamiento por chorros acelerados de un anillo de orificios, este caso es un aproximado al de flujo cruzado en cilindros, pero se recomienda revisar mejor este proceso.
- Registrar tiempos totales por ciclo de tratamiento térmico, para poder llevar a prueba real el proceso definido y con base en eso proponer mejoras, cambios en el diseño, corrección de errores en caso de ser necesario e incluso verificar la posibilidad de aumentar la producción mensual de pasadores y por ende las utilidades de la planta.

VI. GLOSARIO

Tratamiento Térmico por Inducción Electromagnética: Proceso que utiliza corrientes eléctricas de alta frecuencia para calentar y modificar las propiedades mecánicas de piezas metálicas, mejorando su dureza, resistencia al desgaste y fatiga. Este proceso permite un control preciso del calor y se utiliza para optimizar la durabilidad de los componentes de cadenas transportadoras en Cadenpal.

Distribución de Planta: Organización y disposición física de las áreas de trabajo y equipos dentro de una planta de producción. Una distribución de planta optimizada facilita el flujo de materiales, reduce tiempos de espera y mejora la eficiencia productiva, permitiendo una producción más ágil en Cadenpal.

Análisis de Causas (Diagrama de Espina de Pescado): Herramienta de calidad utilizada para identificar y analizar las causas raíz de problemas en el proceso productivo. En este proyecto, se emplea para estudiar las variaciones en la calidad y los retrasos en los tiempos de entrega, permitiendo establecer estrategias de mejora continua en Cadenpal.

Capacidad Instalada: Cantidad máxima de producción que puede lograrse en una planta, determinada por los recursos y la tecnología disponible. La implementación de un tratamiento térmico *in-house* busca aumentar la capacidad instalada de Cadenpal, reduciendo la dependencia de proveedores externos y aumentando el volumen de producción.

Lean Manufacturing: Metodología de gestión de operaciones centrada en la eliminación de desperdicios y la mejora continua de procesos para maximizar la eficiencia y reducir costos. Aplicar herramientas Lean como las 5S o el Mantenimiento Productivo Total (TPM) permite a Cadenpal optimizar su proceso productivo y alcanzar mayores niveles de calidad y productividad.

Indicadores de Desempeño (KPI): Métricas utilizadas para medir y evaluar la eficacia de procesos clave en función de objetivos específicos, como costos, tiempos de entrega y calidad del producto. En el proyecto, se utilizan indicadores para monitorear el impacto de implementar el tratamiento térmico *in-house*, asegurando que las mejoras en la planta cumplan con los objetivos estratégicos.

Tenacidad: Es una propiedad mecánica de los materiales que se refiere a la resistencia o energía que un material absorbe al deformarse significativamente cuando es impactado por una carga externa. Esta propiedad es contraria a la fragilidad.

Ductilidad: Es una propiedad mecánica de las aleaciones metálicas que les permite a estos entrar en una zona de deformación plástica antes de llegar al punto de fractura, en otras palabras, permite al material estirarse y en forma de hilos largos y delgados sin llegar a romperse.

Refractarios: Son aquellos materiales que tienen la capacidad de resistir altas temperaturas sin perder sus propiedades físicas y químicas. Se utilizan en aplicaciones donde se requiere mantener la integridad estructural y funcional en condiciones extremas de calor para poder llevar a cabo otros procesos. Sin embargo, estos materiales no se comportan como aislantes térmicos. En procesos alternativos al del horno de inducción, los materiales refractarios pueden servir como contenedor de piezas que se calienten y deformen.

Kilovatio: Un kilovatio es una unidad de medida que se utiliza para expresar la potencia eléctrica. Es parte del sistema métrico y equivale a 1.000 vatios (W). Por otra parte, el kilovatio hora es una unidad que se usa para medir la energía consumida durante el tiempo.

Henrio: Es una unidad de medida de la inductancia eléctrica que produce la tensión de un voltio cuando la corriente que la atraviesa varía a razón de un amperio por segundo. El henrio, expresado en combinaciones de unidades del Sistema Internacional, es: $\frac{m^2 \cdot kg}{s \cdot A^2}$

Interfaz Humano - Máquina (HMI): Es una visualización que permite la interacción entre el usuario y la máquina o sistema. Facilita el contacto directo con el proceso a controlar, ofreciendo un diseño de alto rendimiento que permite al usuario manipular variables de control según las necesidades del operario. Son pantallas táctiles que muestran botones, etiquetas, textos, comandos para visualizar y manipular el proceso.

COP: Pesos colombianos

Efecto Hall: Es un fenómeno físico que ocurre cuando un conductor por el que pasa una corriente eléctrica se coloca en un campo magnético perpendicular al flujo de corriente y se genera una diferencia de voltaje en el conductor proporcional al campo magnético y a la corriente.

Proceso de Pasivado: Es un tratamiento superficial aplicado en piezas metálicas que consiste en recubrir con ácido nítrico el metal. El objetivo del tratamiento es disolver materiales contaminantes que se encuentren presentes en la superficie de la pieza. Al mismo tiempo, maximiza la resistencia a la corrosión del material.

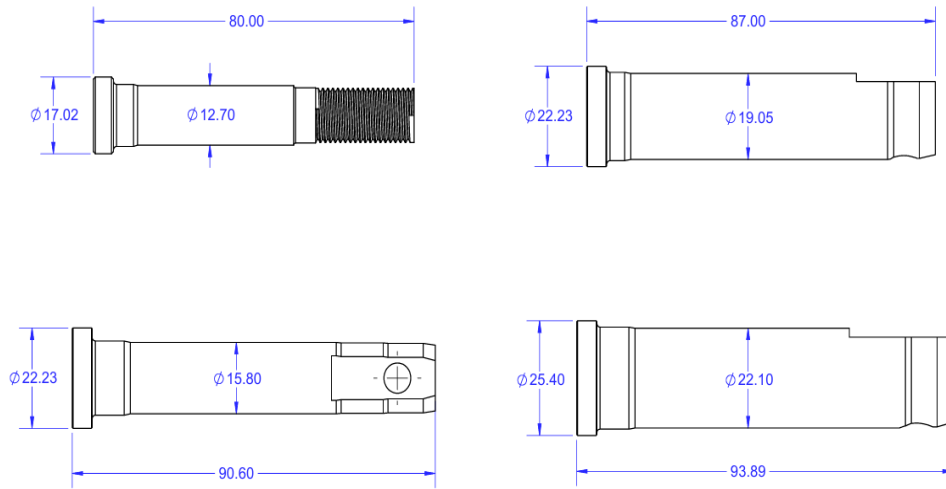
VII. REFERENCIAS

- [1] O. A. Bonilla Torres, "Propuesta de mejora a la cadena de suministro del ingenio azucarero Manuelita S.A en el Valle del Cauca basado en la Industria 4.0," Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia, Santiago de Cali, 2023. [Último acceso: 12 Octubre 2024].
- [2] E. J. Ortiz Naranjo y A. X. Zúñiga Valle, "Distribución de Planta y sus factores: Incidencia en el mejoramiento de la productividad." Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721, vol. 7, no. 1, Jun. 2022. [Último acceso: 13 Octubre 2024].
- [3] D. Mariñas y E. M. Vejarano, "Aplicación del sistema Lean Manufacturing en el incremento de la productividad en una empresa metal mecánica de producción de ollas de aluminio," thesis, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, 2019. [Último acceso: 13 Octubre 2024].
- [4] M. S. Hidalgo y E. R. Tumbaco, "Plan de control de producción para la mejora del área de mecanizado de una empresa de diseño y construcción de maquinarias," Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2023. [Último acceso: 13 Octubre 2024].
- [5] J. R. Davis, Alloying: Understanding the Basics. ASM International, 2001.
- [6] ASM International, ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating, 10th ed. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2017. [Último acceso: 9 Octubre 2024].
- [7] W. D. Callister, Jr., and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014. [Último acceso: 9 Octubre 2024].
- [8] J. Díaz, M. Paredes y S. Hernández, "Análisis de tratamiento térmico del acero AISI 4140 para aplicaciones industriales," Materials Research Journal, vol. 18, no. 2, pp. 158-165, 2019. [Último acceso: 10 Octubre 2024].
- [9] P. Carreño y V. Rosas, "Diseño y Construcción de un horno al vacío para Tratamientos Térmicos," 2018. [Último acceso: 10 Octubre 2024].
- [10] W. Malán, "Estudio del tratamiento térmico sub-cero mediante la aplicación de dióxido de carbono sólido en los aceros AISI 1045 y AISI 4140, y su incidencia en las propiedades mecánicas," *Journal of Material Science and Engineering*, 2015. [Último acceso: 11 Octubre 2024].
- [11] J. Martínez y R. López, "Tecnología de hornos al vacío para mejorar las propiedades del acero," International Journal of Metallurgical Engineering, vol. 45, no. 5, pp. 332-339, 2020. [Último acceso: 13 Octubre 2024].

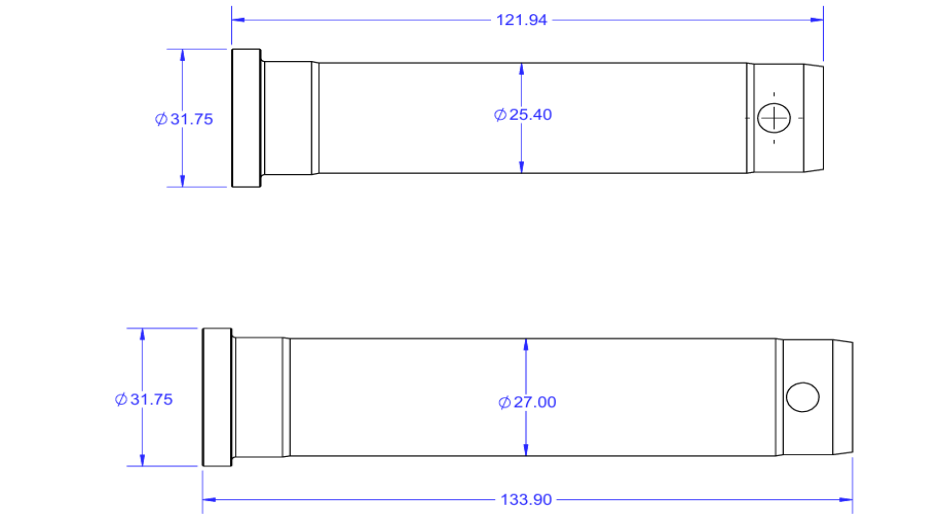
- [12] A. García, "Avances en hornos de atmósfera controlada para el tratamiento térmico del acero," **Journal of Thermal Engineering**, vol. 67, no. 3, pp. 245-258, 2021. [Último acceso: 13 Octubre 2024].
- [13] R. González y J. Salvador, "Avances en hornos de atmósfera controlada para el tratamiento térmico del acero," Universidad Centroamericana José Simón Cañas, El Salvador, 2013. [Último acceso: 13 Octubre 2024].
- [14] S. A. López Méndez, "Guía para el análisis y especificación de requerimientos de sistemas de información," Oficina de Tecnologías y Sistemas de Información, Grupo de Gestión de Sistemas de Información, Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, 2020. [Último acceso: 28 Octubre 2024].
- [15] "A Complete Guide Of Induction Hardening," LEADRP - Rapid Prototyping And Manufacturing Service, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://leadrp.net/blog/a-complete-guide-of-induction-hardening/>. [Último acceso: 28 Octubre 2024].
- [16] I. Sommerville, *Ingeniería de Software*, 9ª ed. México: Pearson, 2011. [Último acceso: 04 noviembre 2024].
- [17] Alibaba, "Industrial Furnaces," [Online]. Disponible en: <https://www.alibaba.com>. [Último acceso: 04 noviembre 2024].
- [18] Carbolite Gero, "Industrial Furnaces & Ovens," [Online]. Disponible en: <https://www.carbolite-gero.com>. [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [19] Lucifer Furnaces, "Furnace Models and Specifications," [Online]. Disponible en: <https://www.luciferfurnaces.com>. [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [20] Nabertherm, "Heat Treatment Equipment," [Online]. Available: <https://www.nabertherm.com>. [Accessed: [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [21] Heat Treat Today, "Industry News and Articles," [Online]. Disponible en: <https://www.heatreattoday.com>. [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [22] Direct Industry, "Industrial Equipment Marketplace," [Online]. Disponible en: <https://www.directindustry.com>. [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [23] Thermolyne, "Laboratory and Industrial Furnaces," [Online]. Disponible en: <https://www.thermofisher.com>. [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [24] Inductotherm, "Induction Heating and Melting," [Online]. Disponible en: <https://www.inductotherm.com>. [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [25] EFD Induction, "Induction Heating Solutions," [Online]. Disponible en: <https://www.efd-induction.com>. [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [26] Thermal Processing Magazine, "Furnaces and Equipment," [Online]. Disponible en: <https://thermalprocessing.com>. [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [27] Honeywell, "Thermostats and Control Systems," [Online]. Disponible en: <https://www.honeywell.com>. [Último acceso: 03 noviembre 2024].
- [28] W. S. Mejía Silva y G. F. Villalobos Baquero, "Diseño de un horno por inducción para prácticas en laboratorio," Proyecto integral de grado, Ingeniería Mecánica, Fundación Universidad de América, Bogotá, D.C., 2019. [Último acceso: 23 de enero 2025].
- [29] Hornos de fundición Jinlai", *Technology WG*, Disponible en: <https://www.technologywg.com/hornos-de-fundicion-jinlai/>. [Último acceso: 23 de enero 2025].
- [30] J. L. R. Proença, *Induction Heating: A Guide to Design and Analysis*. Springer, 2018. [Último acceso: 26-Feb-2025].
- [31] R. C. Dorf and J. A. Svoboda, *Introduction to Electric Circuits*, 9th ed. Wiley, 2013. [Último acceso: 26-Feb-2025].

- [32] M. Rudnev, G. Totten, and D. Loveless, *Handbook of Induction Heating*, 2nd ed. CRC Press, 2017. [Último acceso: 26-Feb-2025].
- [33] R. E. Haimbaugh, *Practical Induction Heat Treating*, 2nd ed. ASM International, 2015. [Último acceso: 26-Feb-2025].
- [34] EUROPER, "Ficha Técnica: Acero SAE 4140", Santiago, Chile. Disponible en: www.europer.cl. [Último acceso: 26-Feb-2025].
- [35] M. Iannuzzi, "Effect of nickel on the phase transformation kinetics of low alloy steels," 2014. [Último acceso: Mar. 25, 2025].
- [36] A. M. M. Alvi, A. K. Khanna, y R. C. Gupta, "Induction Heating of Steel: A Review and Thermal Analysis", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 636, pp. 84-95, Jun. 2015. doi: 10.1016/j.msea.2015.03.049. [Último acceso: Mar. 20, 2025].
- [37] F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950. [Último acceso: Abr. 2, 2025].
- [38] S. Pattanapichai, T. Jansaengsuk, y J. Thongsri, "A dual coil induction heating machine for jewelry factories developed by electromagnetic analysis," *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 7, no. 100146, 2023. [Último acceso: Abr. 5, 2025].
- [39] M. H. Khani Sanij, S. S. Ghasemi Banadkouki, A. R. Mashreghi y M. Moshreffar, "The effect of single and double quenching and tempering heat treatments on the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel," *Materials and Design*, vol. 42, pp. 339–346, 2012. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.018>. [Último acceso: 9 de abril de 2025].
- [40] N. I. Kobasko, "Correlation Between Chemical Composition of Steel, Optimal Hardened Layer, and Optimal Residual Stress Distribution," *J. ASTM Int.*, vol. 6, no. 3, pp. 1-12, Mar. 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/260060481> or <https://doi.org/10.1520/JAI102788>. [Último acceso: 9 de abril de 2025].
- [41] ASM International, *ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating*, ASM International, Materials Park, OH, 1991. [En línea]. Disponible en: <https://www.asminternational.org/> [Último acceso: 9 de abril de 2025].
- [42] HIMMELWERK, "Estructura de los equipos de calentamiento por inducción," [En línea]. Disponible en: <https://www.himmelwerk.com/es/la-tecnologia/estructura-de-equipos-de-calentamiento-por-induccion/>. [Último acceso: 25 de abril de 2025].
- [43] MECALOR, "Chillers," mecalor.com.co, [En línea]. Disponible: <https://mecalor.com.co/wp-content/uploads/Catalogo-Mecalor-Industrial-ES.pdf>. [Último acceso: 28 de abril de 2025].
- [44] J. Pérez, "El ciclo de Refrigeración: Principios, Tipos, Partes y Aplicaciones," refri-climas.com, [En línea], disponible en: <https://www.refri-climas.com/ciclo-de-refrigeracion/>. [Último acceso: 28 de abril. 2025].
- [45] ROLL, "Guía lineal MG12 1MT," rollnc.com, [En línea], Disponible en: https://rollnc.com/product/guia-lineal-mgn12-1mt?srsl=AbmB00p0WWGA3kfaMwEQuQML9SRDbgBn_UU0bQlrLj762lg3CUSV0mK0. [Último acceso: 12 de junio. 2025].
- [46] Endumetales, "Proporcionamos servicios de Inducción y Tratamientos Térmicos para la industria," Disponible en: <https://www.endumetales.mx/servicios.html>. [Último acceso: 12 de junio. 2025].
- [47] Iwaki, "Magnetic Drive Pumps," unpublished [En Línea]. Available: https://iwaki-pumps.com.au/wp-content/uploads/2014/05/MD_A0015-16.pdf?utm. [Último acceso: 16 de julio. 2025].
- [48] Y. A. Çengel, *Transferencia de calor y masa*. México: McGraw-Hill, 2015.
- [49]
- [50] Y. A. Çengel, *Mecánica de fluidos*. México: McGraw-Hill, 2015.

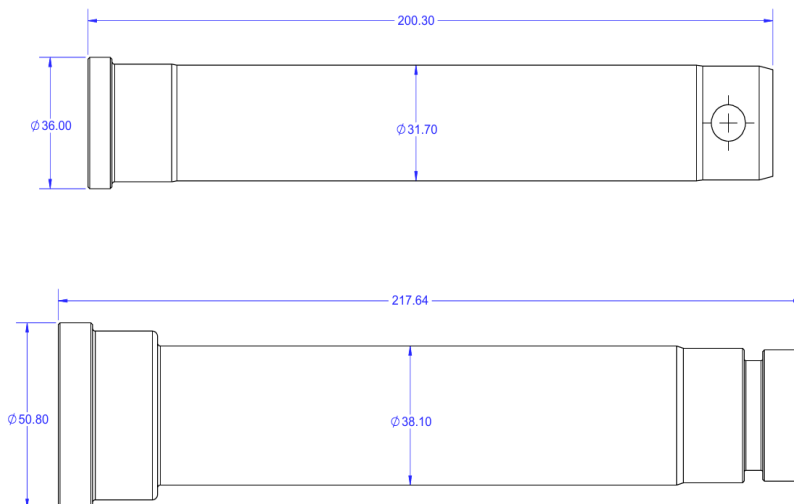
VIII. ANEXOS



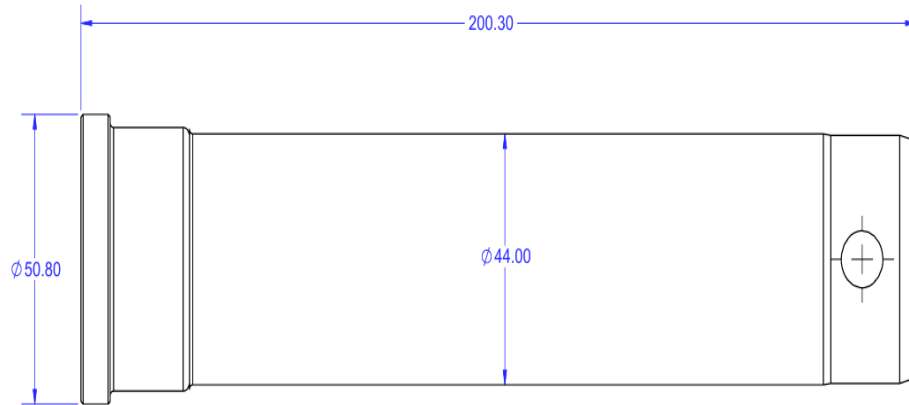
Anexo 1. Planos pasadores rango 1



Anexo 2. Planos pasadores rango 2



Anexo 3. Planos pasadores rango 3

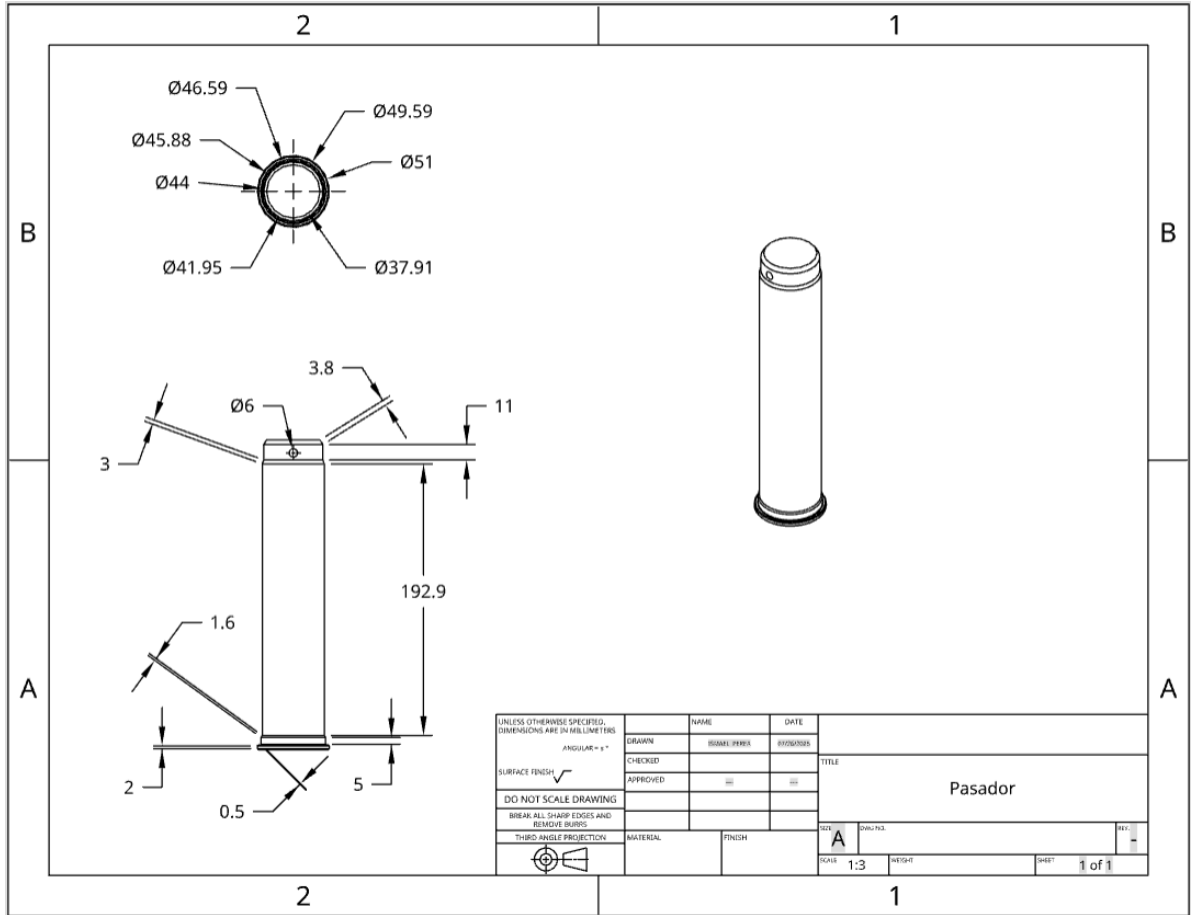


Anexo 4. Planos pasadores rango 3

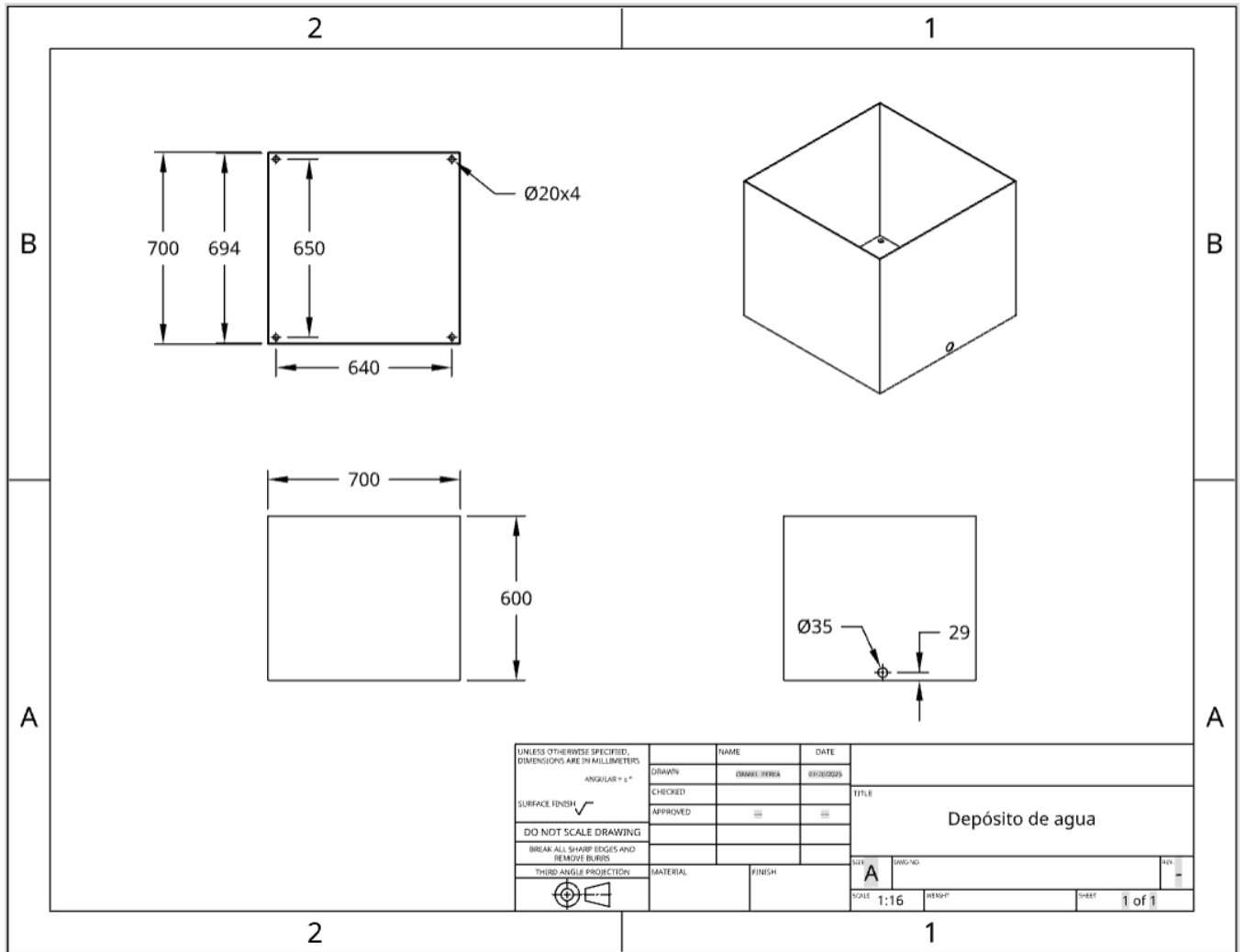
2	1
A	A
2	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGULAR ± 0.5°		NAME	DATE	Anillo de Enfriamiento
SURFACE FINISH ✓	DO NOT SCALE DRAWING	DRAWN	REVISI/REVIS	
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS	THIRD ANGLE PROJECTION	CHECKED	APPROVED	
	MATERIAL	FINISH	CITY	Dwg. No.
			SCALE	SHEET
			1:3	1 of 1

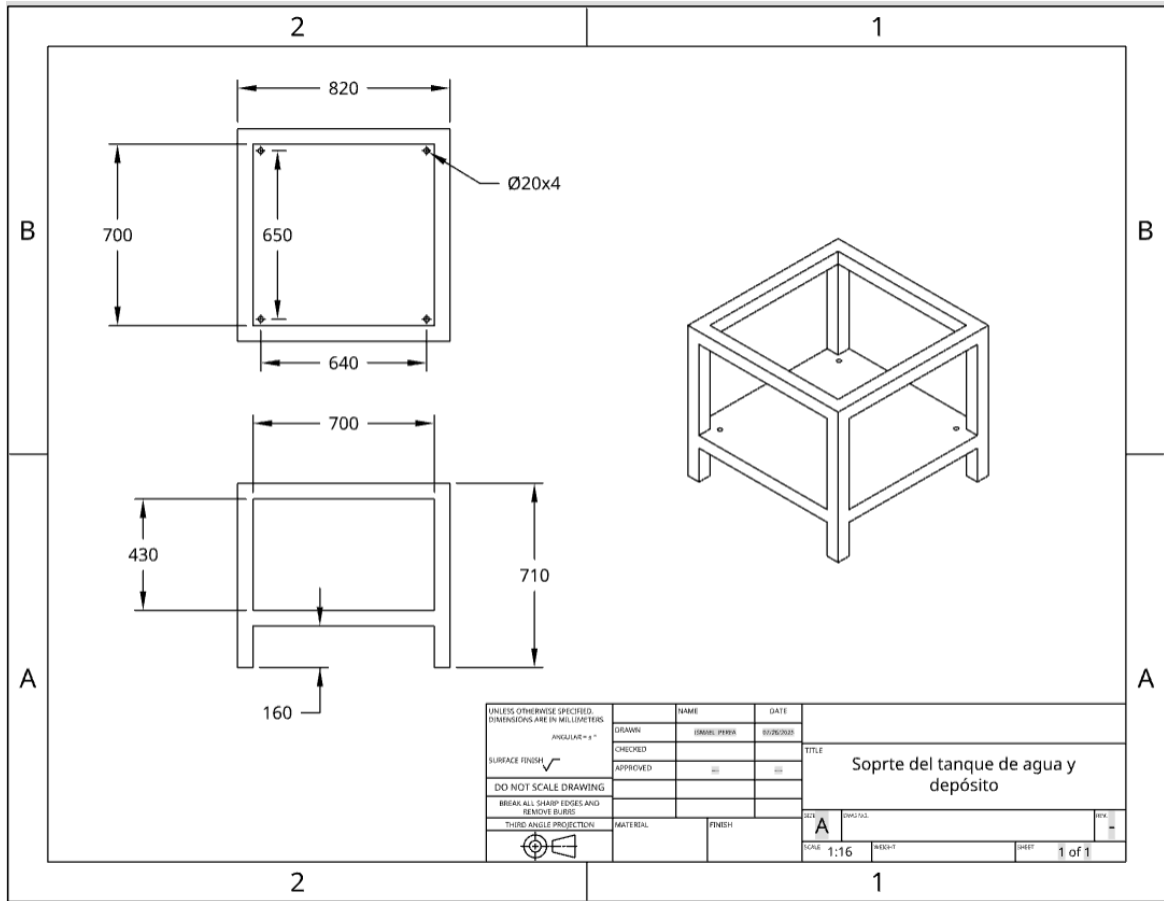
Anexo 5. Planos del anillo de enfriamiento



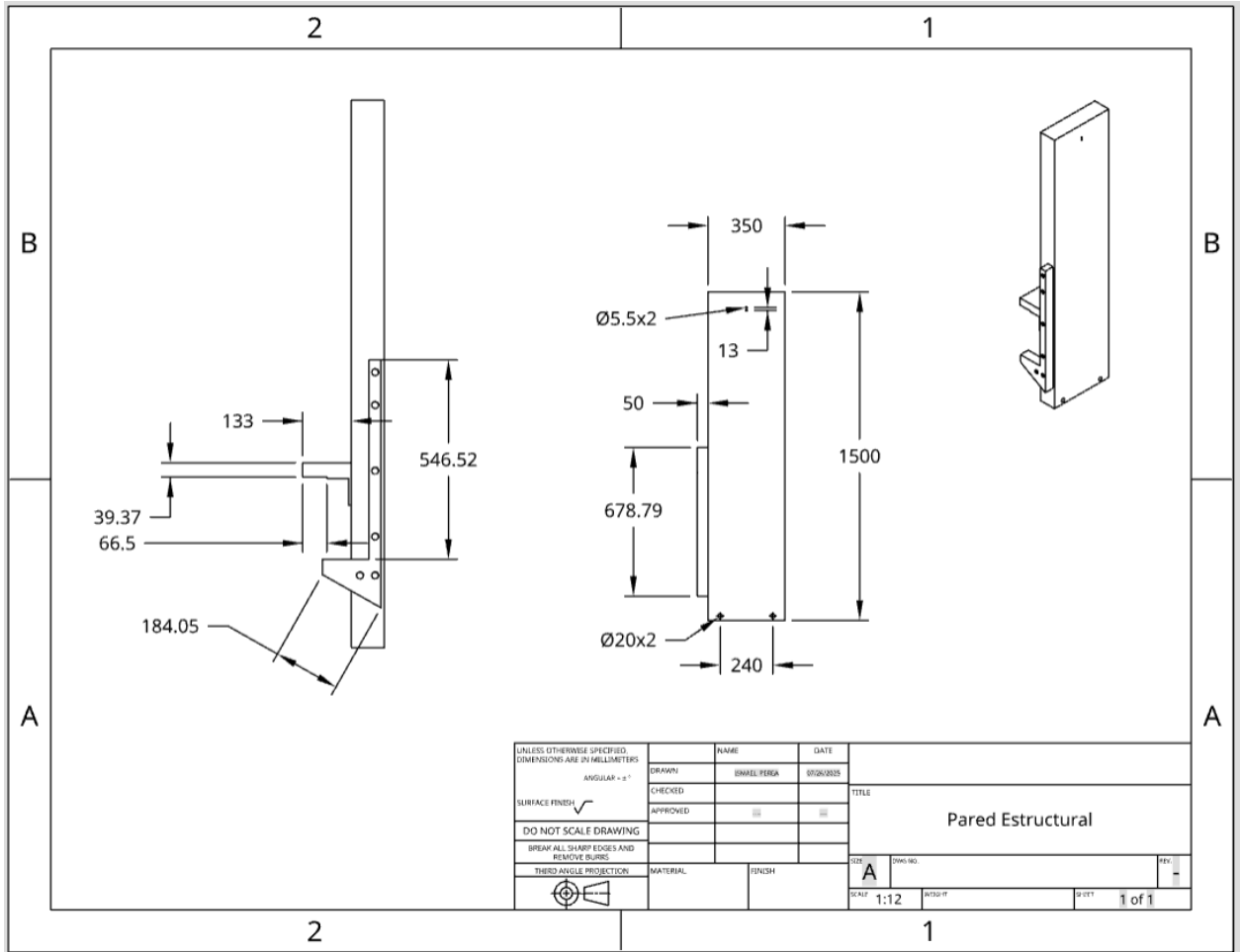
Anexo 6. Planos del pasador



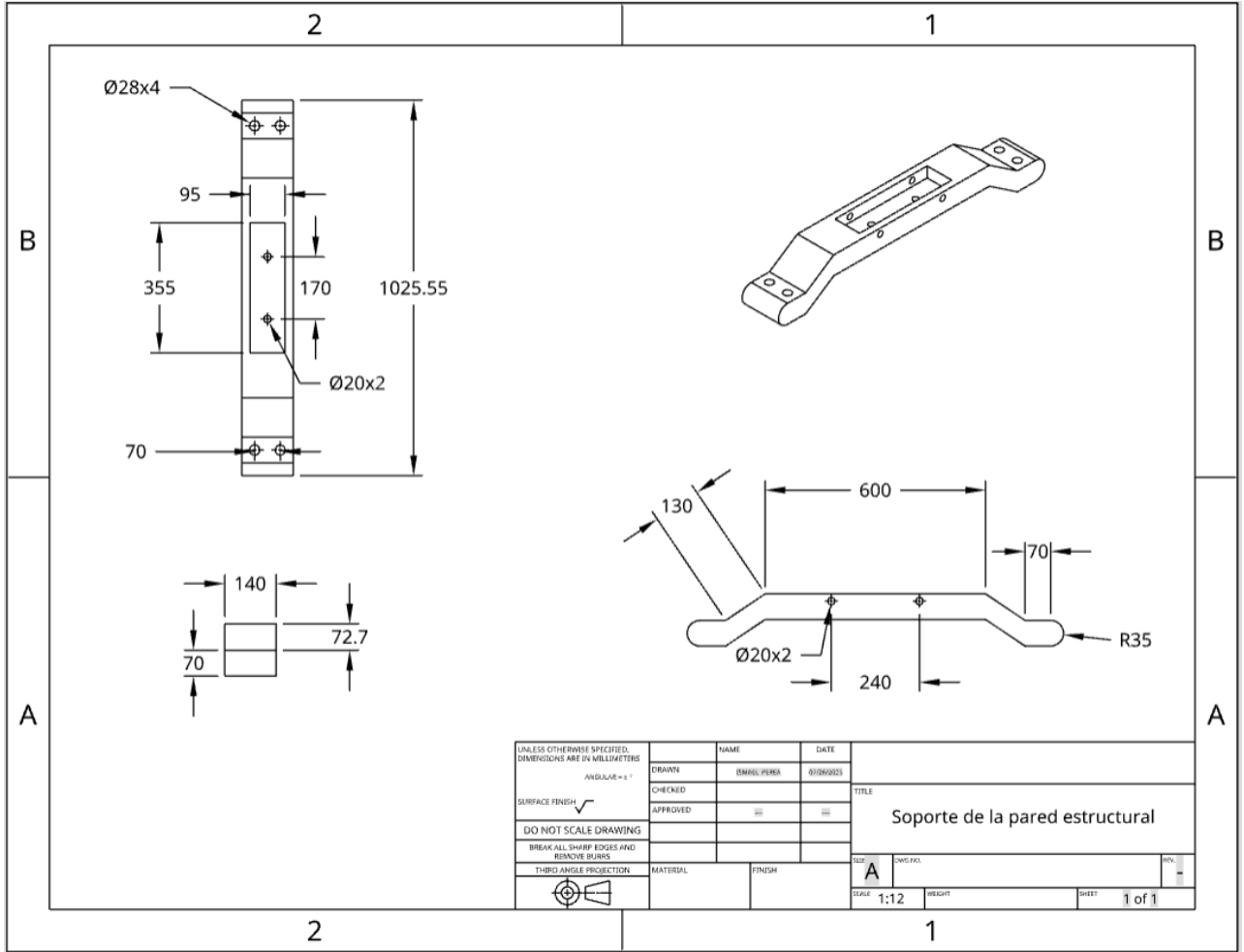
Anexo 8. Planos del depósito de agua



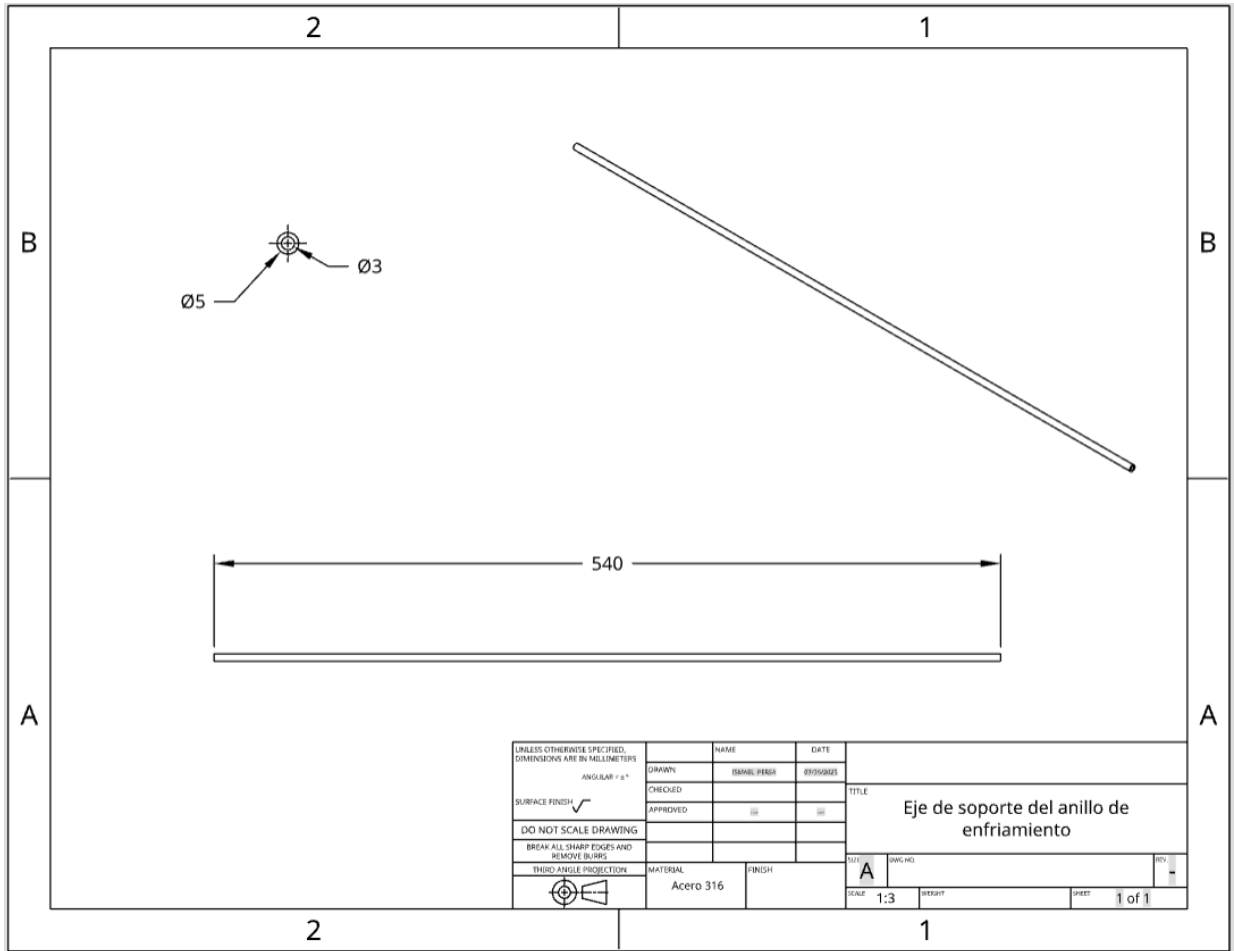
Anexo 9. Planos del soporte del tanque de agua



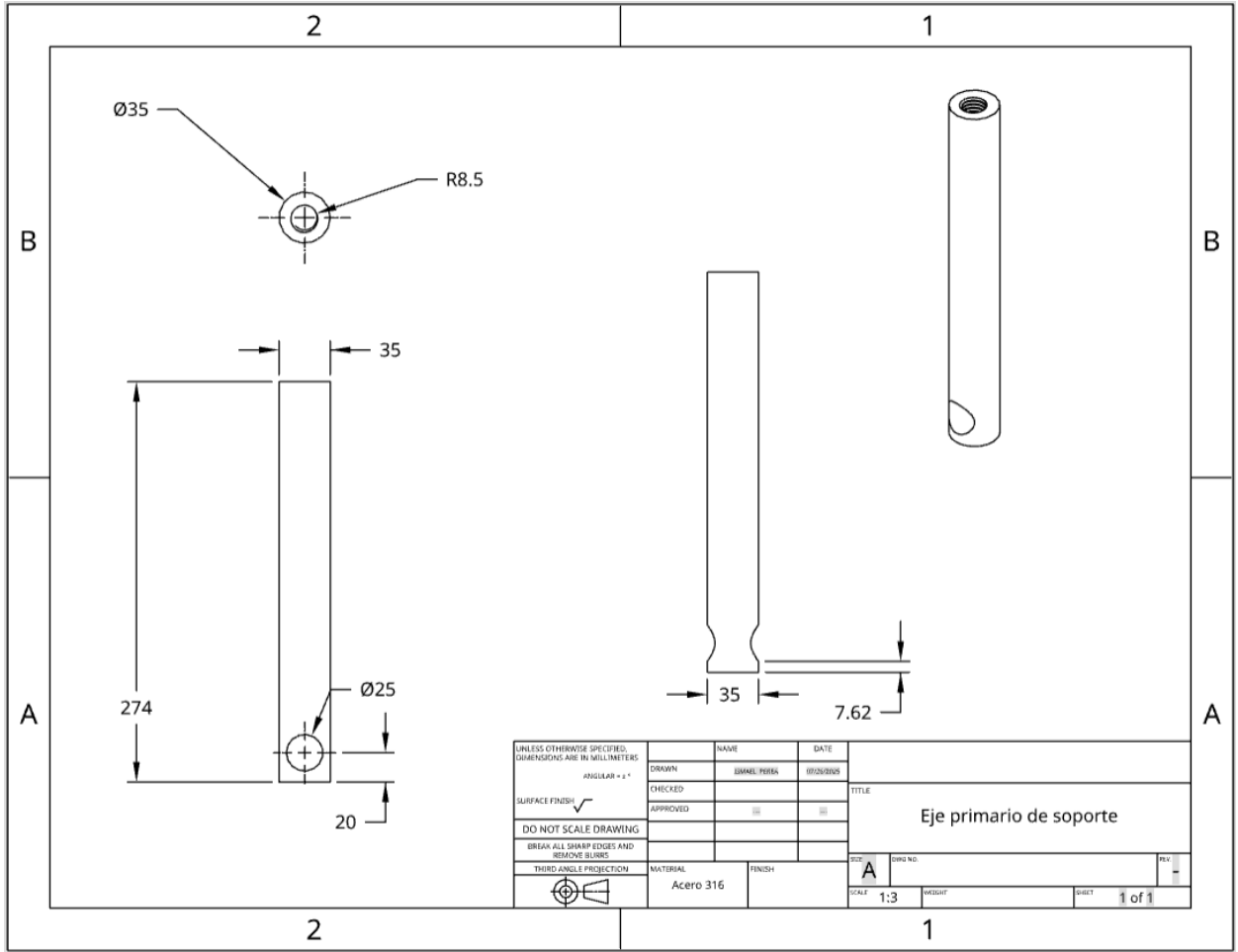
Anexo 10. Planos de la pared del soporte del anillo



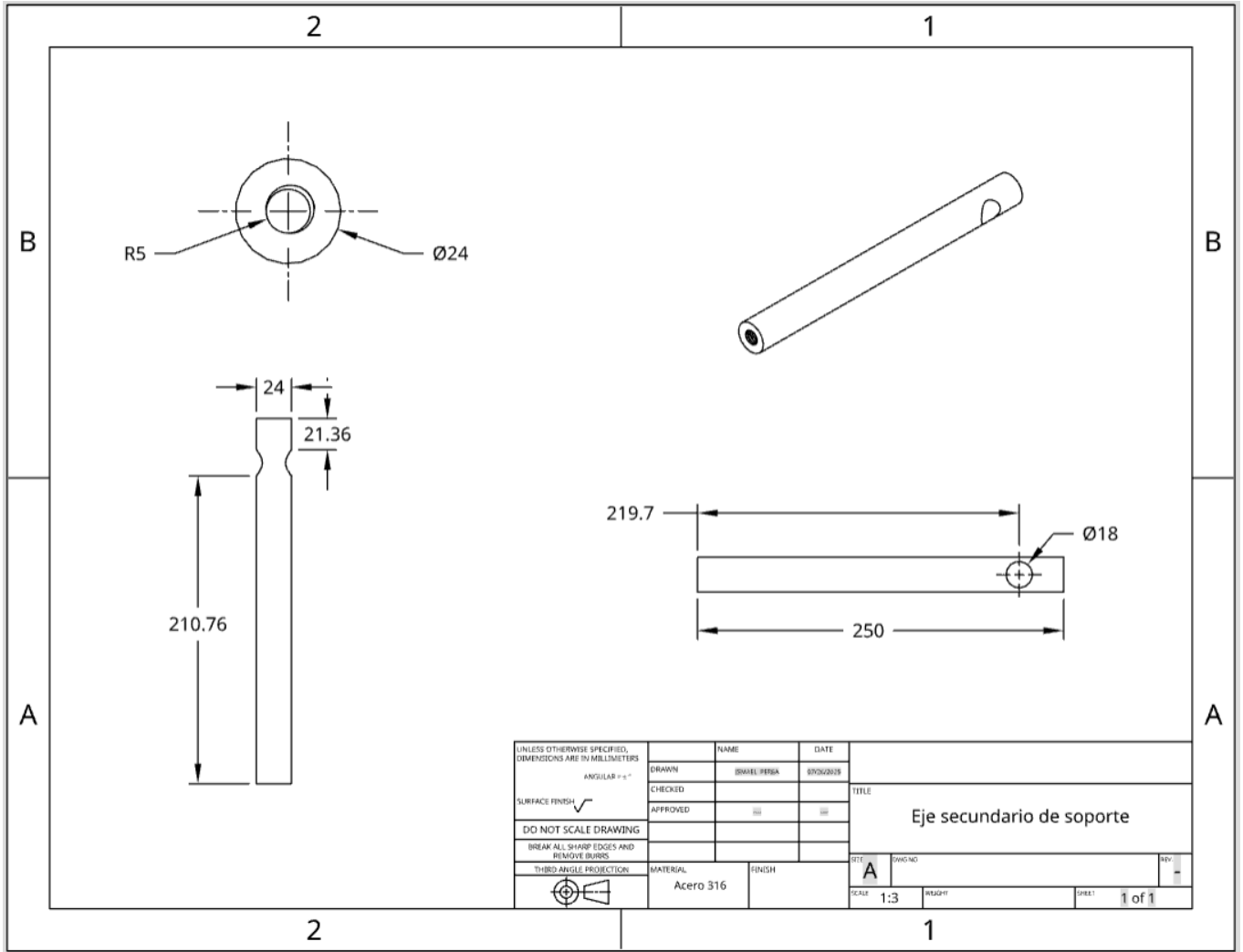
Anexo II. Planos del soporte de la pared estructural



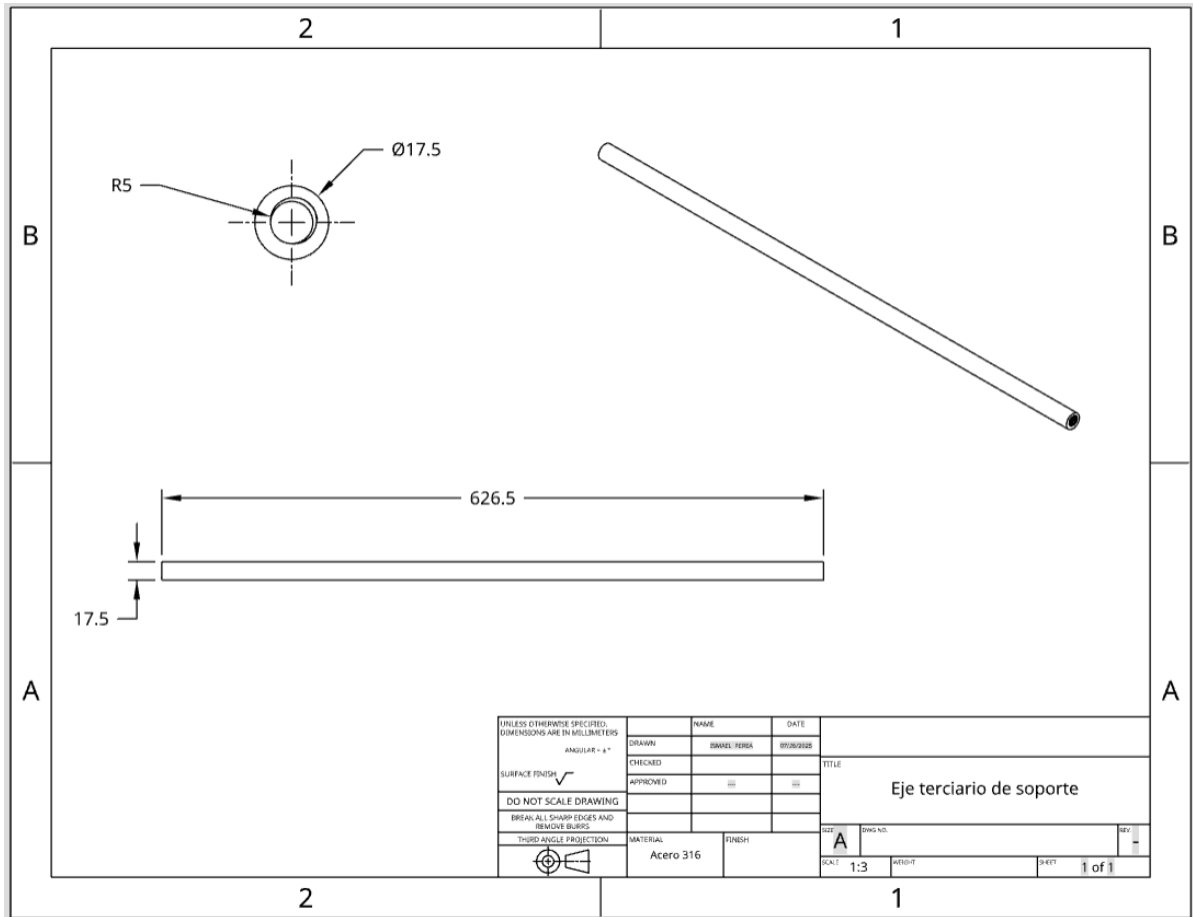
Anexo 12. Planos del eje de soporte del anillo



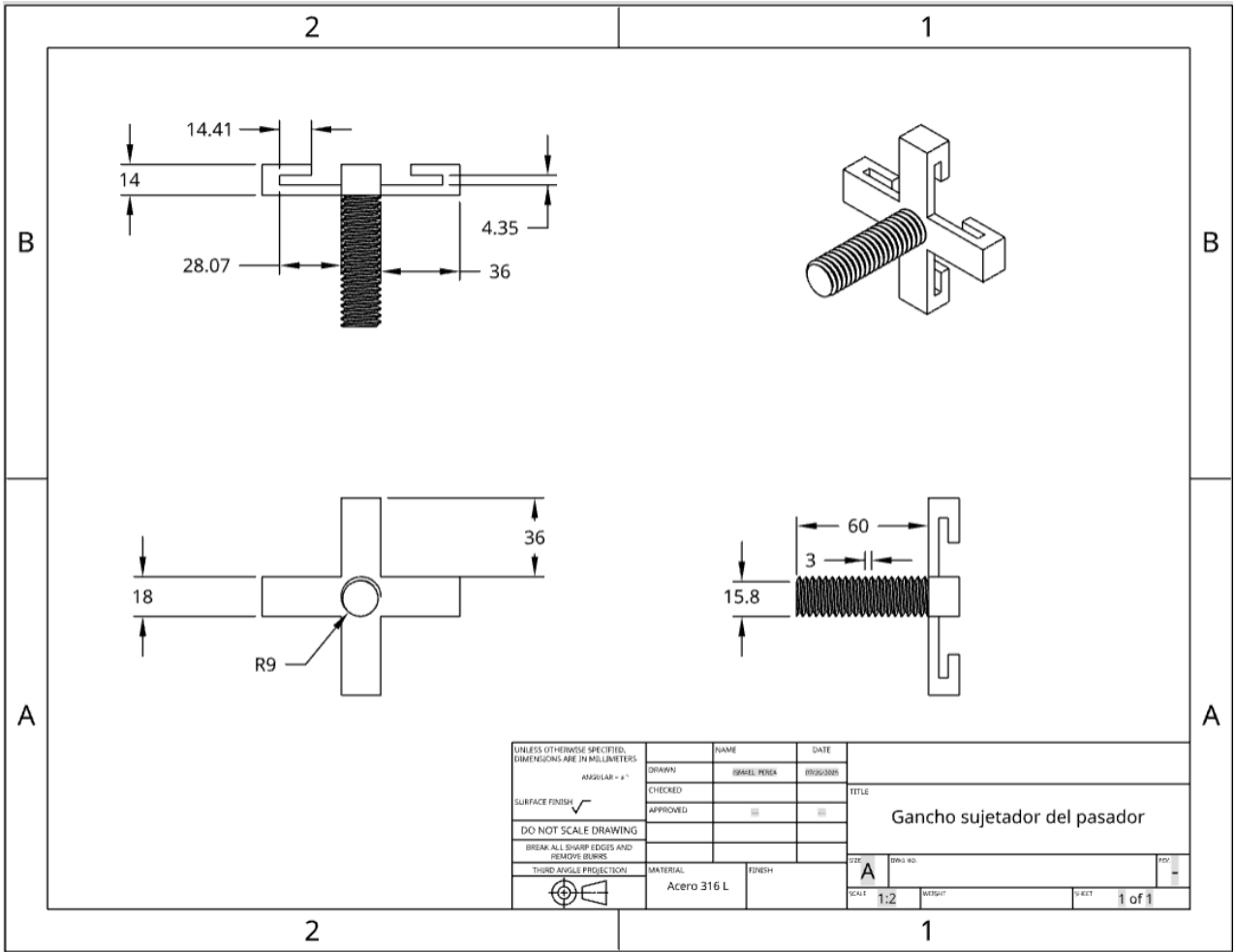
Anexo 13. Planos de eje primario de soporte



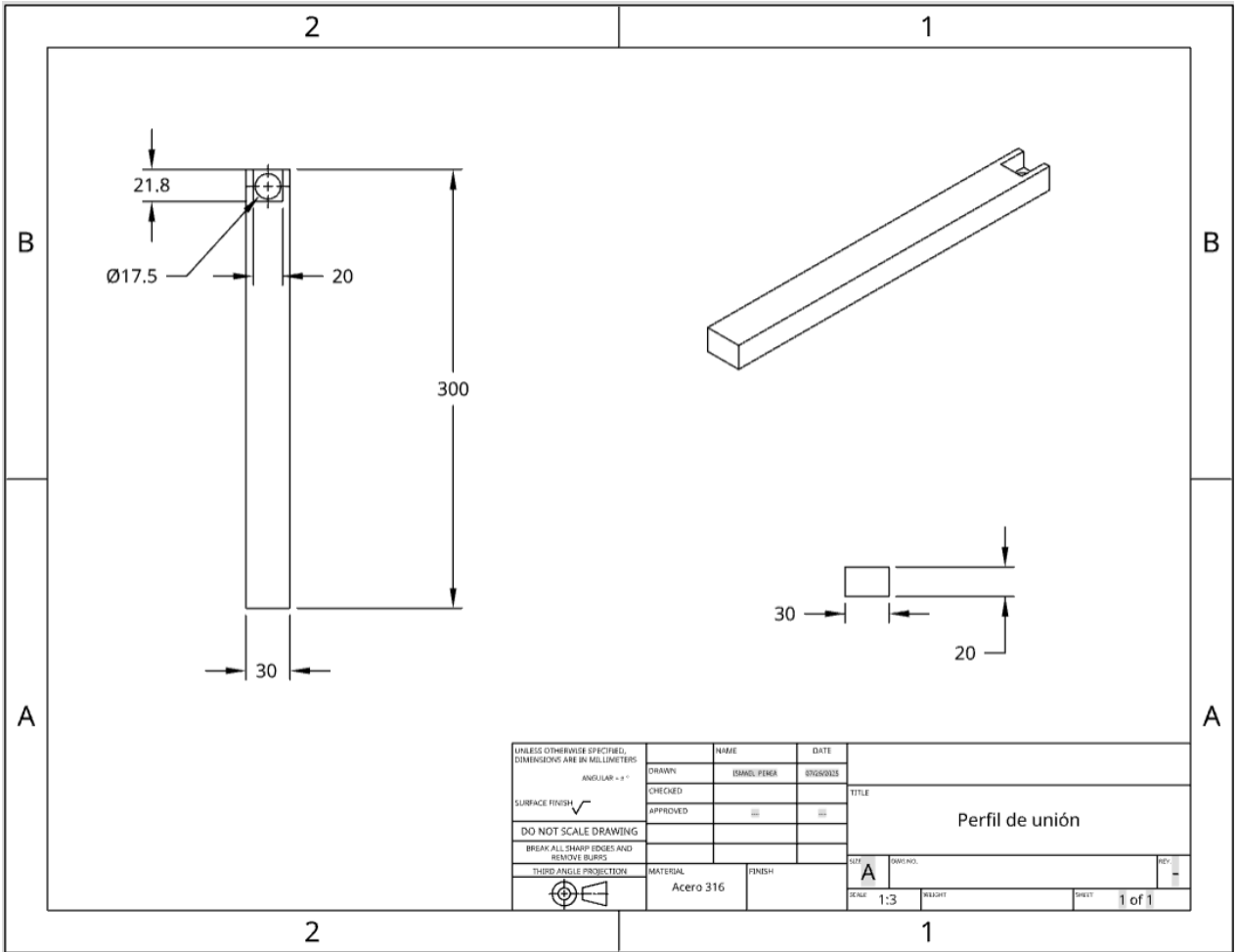
Anexo 14. Planos de eje secundario de soporte



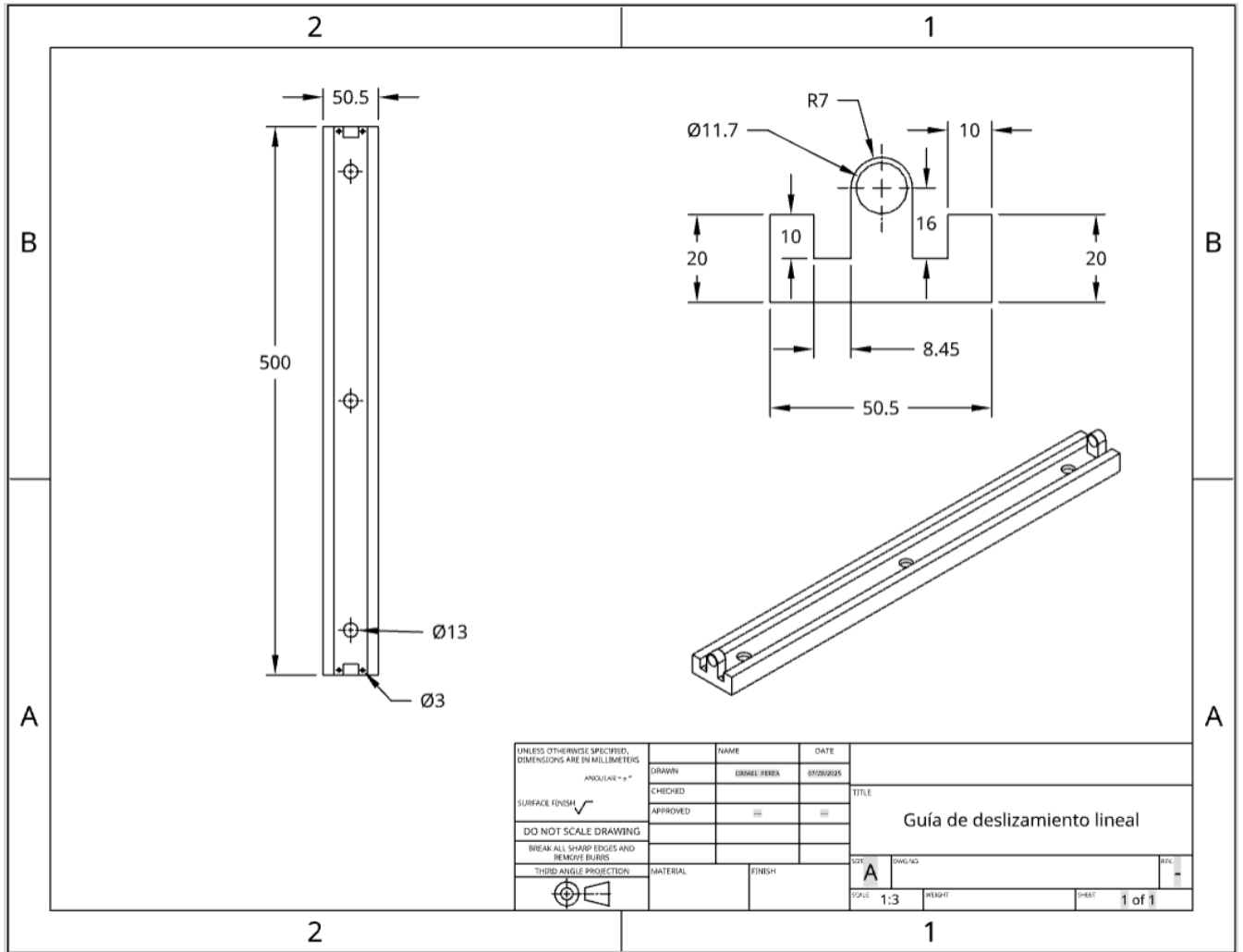
Anexo 15. Planos de eje terciario de soporte



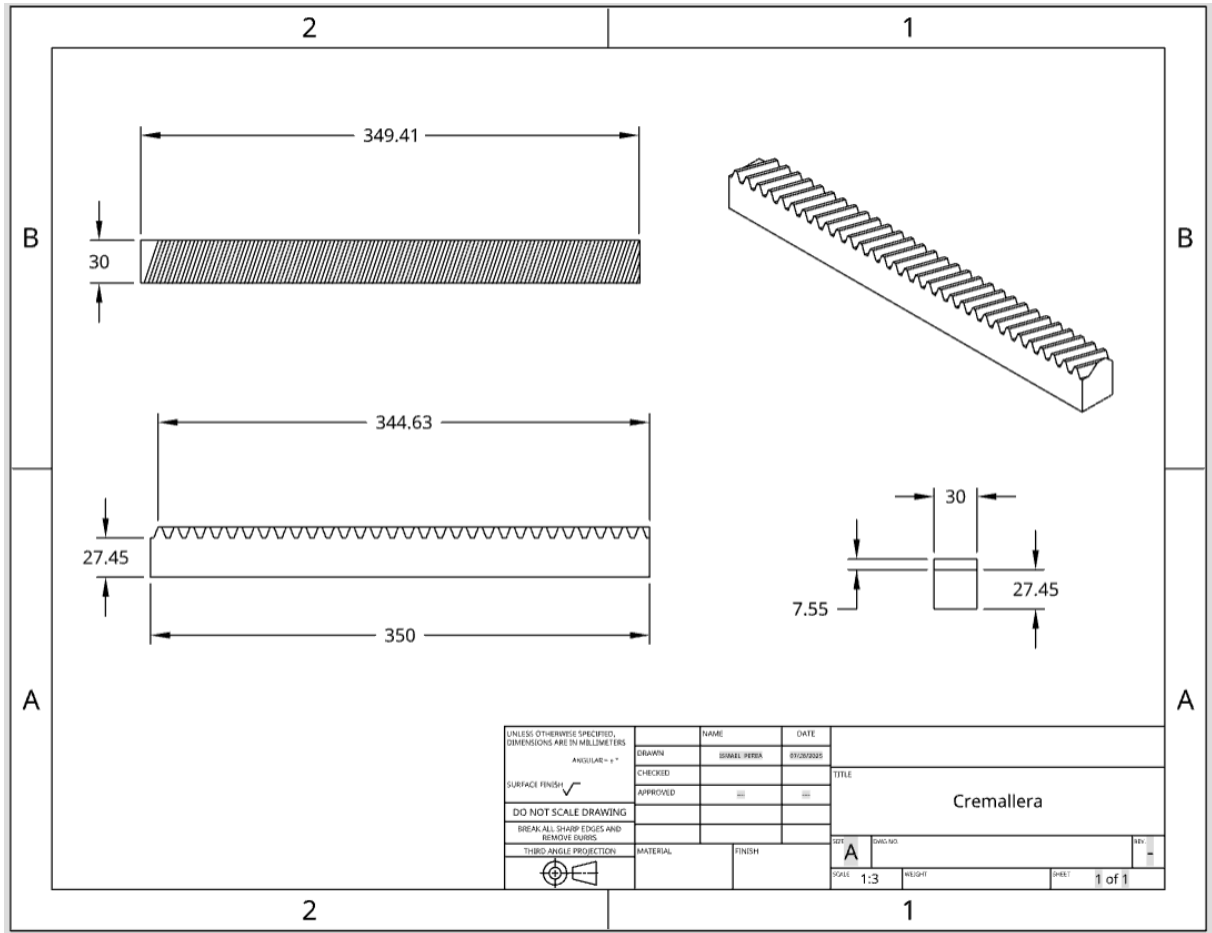
Anexo 16. Planos de gancho sujetador de pasador



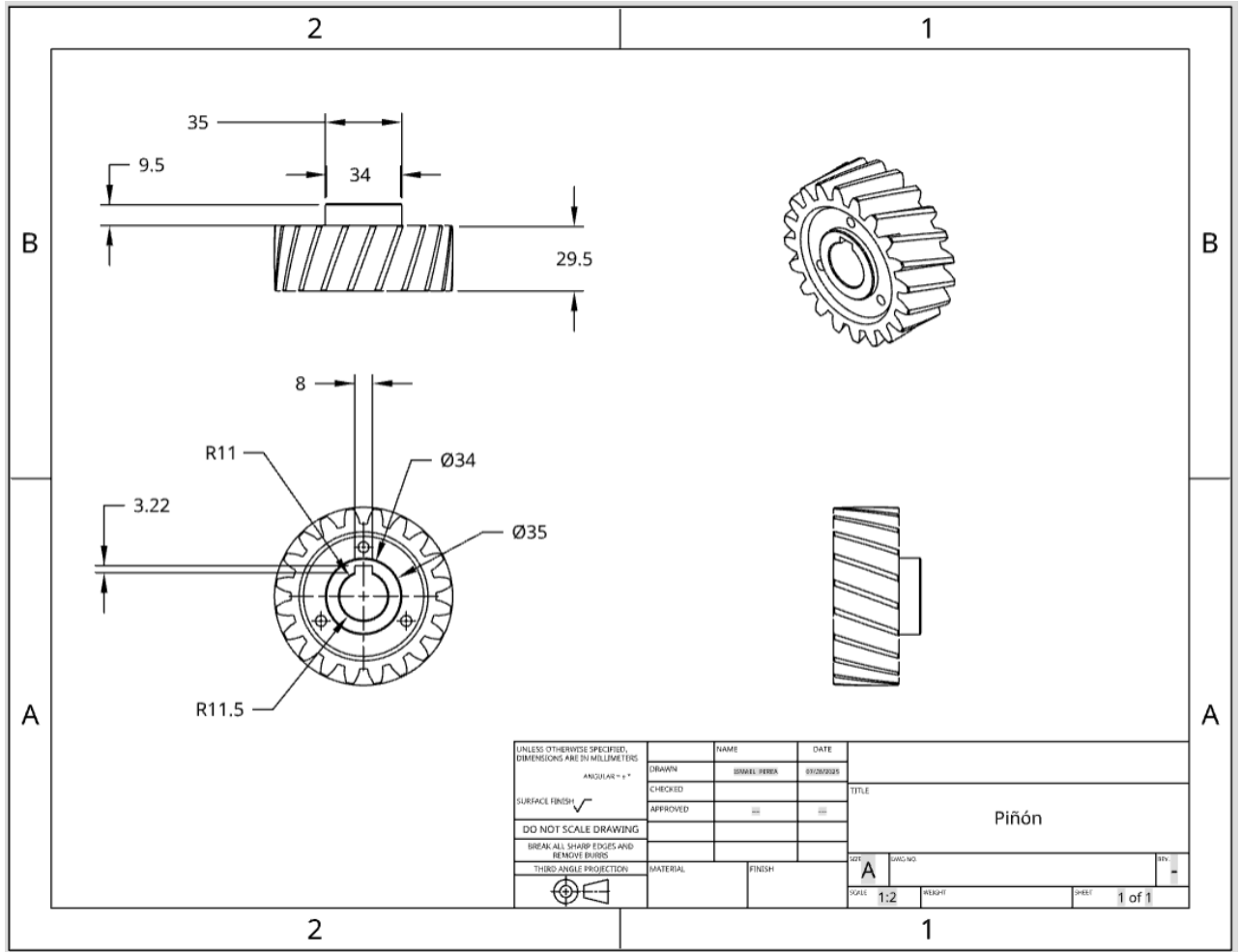
Anexo 17. Planos de la placa de unión



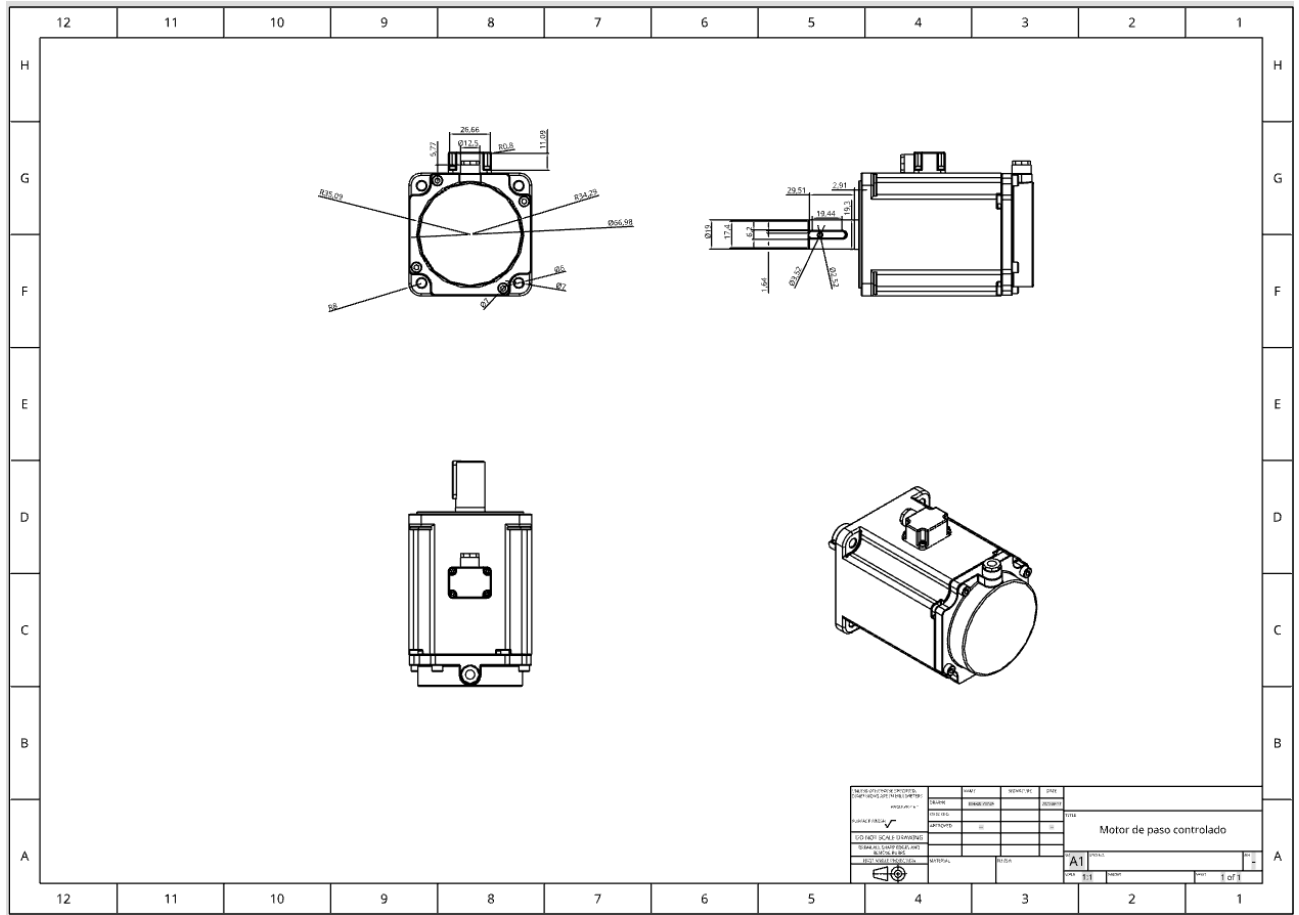
Anexo 18. Planos de la guía deslizante lineal



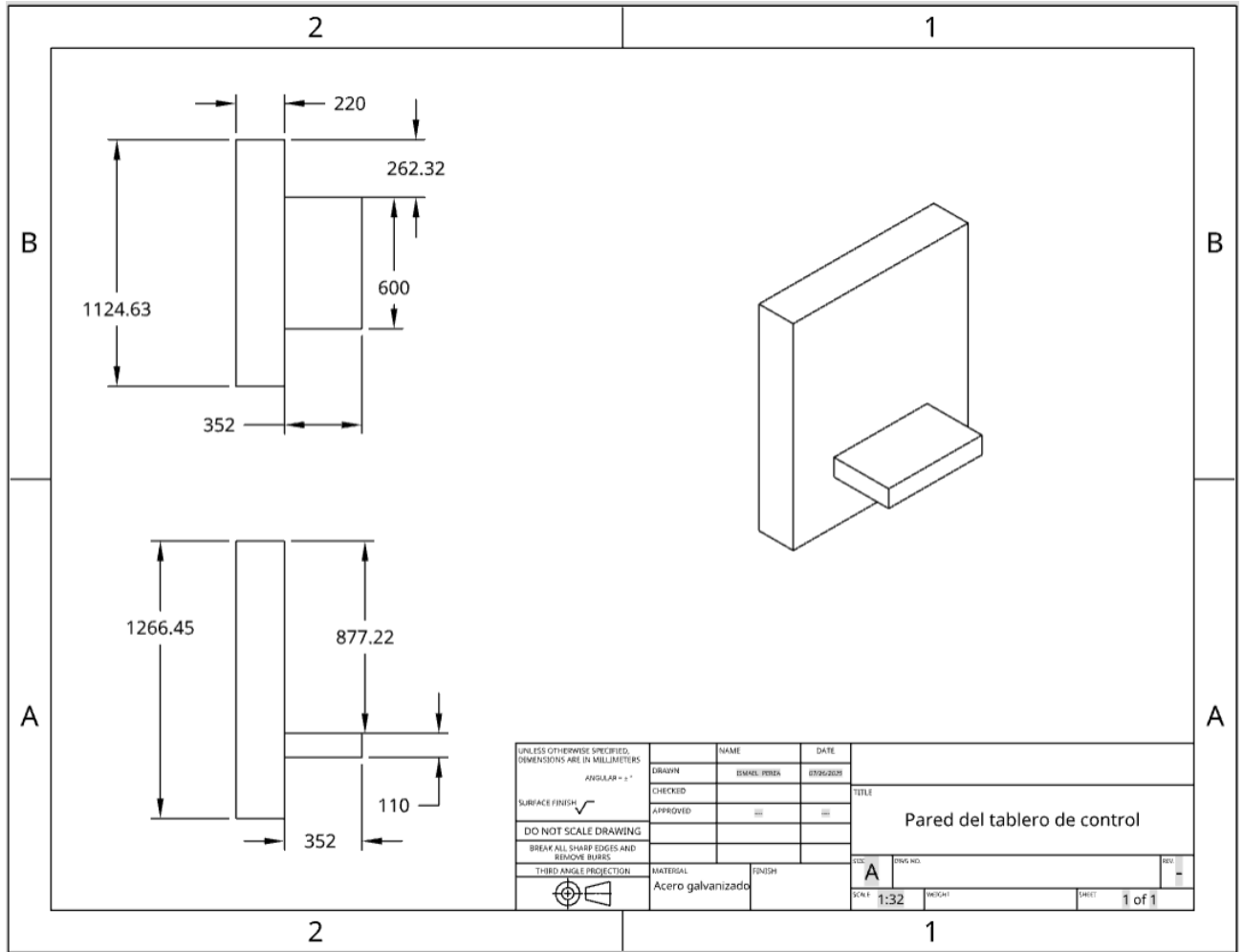
Anexo 19. Planos de la cremallera



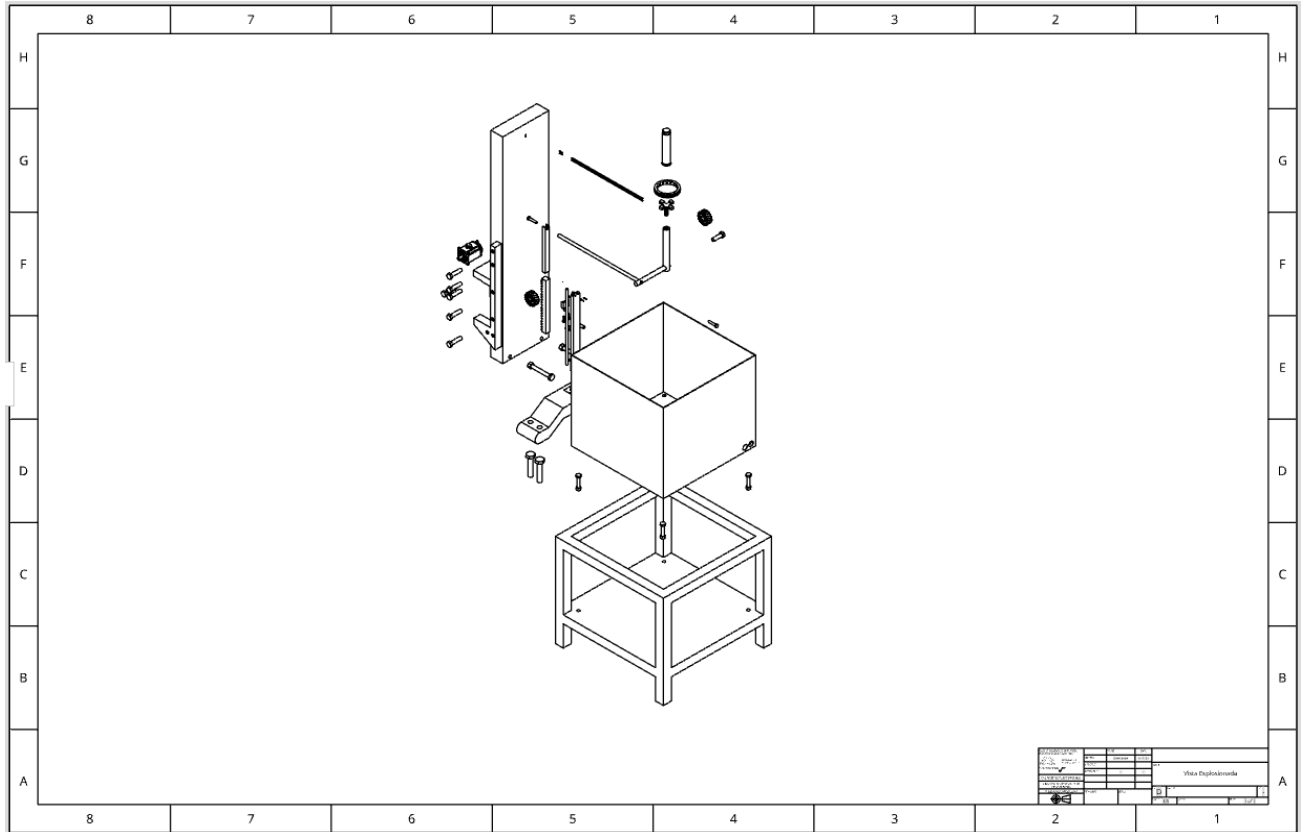
Anexo 20. Planos del piñón



Anexo 21. Planos del motor de paso controlado



Anexo 22. Planos del soporte de tablero de control



Anexo 23. Planos de la vista explosionada del diseño mecánico

Calculos de Tornillos

Tuerca M16 \rightarrow Ancho = 24mm

Pasos para el calculo del tornillo Hexagonal Regular = 14,8 mm \rightarrow H

Gruesa Ranurada = 16,4 mm

Contra Tuerca = 8 mm

Paso 1

l = espesor de todo el material atravesado entre la cara del perno y la cara de la tuerca

Paso 2

$$L > l + H$$

$$L > 70 + 14,8 = 84,8$$

$$L_T = 2d + 6mm \text{ si } L \leq 125mm \quad d \leq 48mm \checkmark$$

$$L_T = 2(16mm) + 6mm \rightarrow \text{Paso 3}$$

$$L_T = 38mm$$

Paso 4

Longitud de la parte sin rosca en el acarre

$$l_d = L - L_T$$

$$l_d = 84,8 - 38mm$$

$$l_d = 46,8mm$$

Paso 5

$$l_t = l - l_d$$

$$l_t = 70mm - 46,8mm$$

$$l_t = 23,2mm$$

Paso 6

$$A_d = \pi d^2 / 4$$

$$A_d = \pi (16mm)^2 / 4$$

$$A_d = 201,06mm^2$$

Paso 7

Area de la parte rosca \rightarrow Area de esfuerzo de tensión

$$A_t \rightarrow \text{por tabla} = 157mm^2$$

Se necesita el módulo de elasticidad E del aluminio 6061 $\rightarrow E = 68,9GPa$

Paso 7

Cálculo de la rigidez del tornillo dentro de la zona de sujeción.

$$K_b = \frac{A_w A_t E}{A_d l_t + A_e l_d}$$

$$K_b = \frac{(201,06 \text{ mm}^2) \cdot (157 \text{ mm}^2) \cdot (68,9 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})}{(201,06 \text{ mm}^2) \cdot (23,2 \text{ mm}) + (157 \text{ mm}^2) \cdot (46,8 \text{ mm})}$$

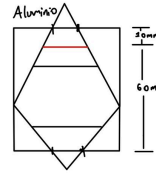
$$K_b = 181,059 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Paso 8

Debido a que hay 2 elementos incluidos en el agarre del sujetador, actúan como resortes de compresión en serie y de aquí la relación del total de elementos:

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}$$

Para calcular lo anterior se aplica el método de los troncos



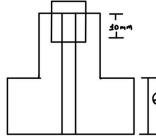
$\alpha = 30^\circ$
 $d_w = 1,5(d) = 24 \text{ mm}$ $t = 10 \text{ mm}$

$$K_1 = \frac{0,5774 \pi E d}{l_n \left(\frac{1,155t + D - d}{1,155t + D + d} \right) (D + d)}$$

Tronco 1

$$K_1 = \frac{0,5774 \pi (69 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}) (16 \text{ mm})}{l_n \left(\frac{1,155t + 24 - 20}{1,155t + 24 + 20} \right) (24 + 20)}$$

$$K_1 = 3125,22 \text{ kN/mm}$$



$$K_2 = \frac{0,5774 \pi E d}{l_n \left(\frac{1,155t + D - d}{1,155t + D + d} \right) (D + d)}$$

Tronco 2

$$K_2 = \frac{0,5774 \pi (200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}) (16 \text{ mm})}{l_n \left(\frac{1,155t + 20 - 20}{1,155t + 20 + 20} \right) (20 + 20)}$$

$$K_2 = 4595,8 \text{ kN/mm}$$

$D = 20 \text{ mm}$

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}$$

$$K_m = 5,38 \times 10^{-4} \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Continuación de cálculos para la precarga y la carga externa en la hoja de Excel

[Cálculos del tornillo, precarga a tensión del perno del soporte del tanque - Hojas de cálculo de Google](#)

Anexo 24. Cálculos de uno de los tornillos de la unión entre el tanque y el soporte

<https://drive.google.com/file/d/1IWGM7qWIKkFA4xMT4wVQe3bwaz=M8Tot/view?usp=sharing>

Anexo 25. Cálculos de Mecánica de sólidos, estática y esfuerzos del sistema de ejes de movimiento y sujeción del pasador