

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO ENERGÉTICO DE UN HORNO PILOTO DE CURADO  
PARA TRATAMIENTO DE ACABADO POR PINTURA  
ELECTROSTÁTICA EN SUPERFICIES METÁLICAS Y MDF**

**Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller**

**ISAAC ISRAEL RAMOS JIMÉNEZ**

**ASESOR: MG. FERNANDO OCTAVIO JIMÉNEZ UGARTE**

**Lima, Agosto del 2020**



A mis abuelitos.

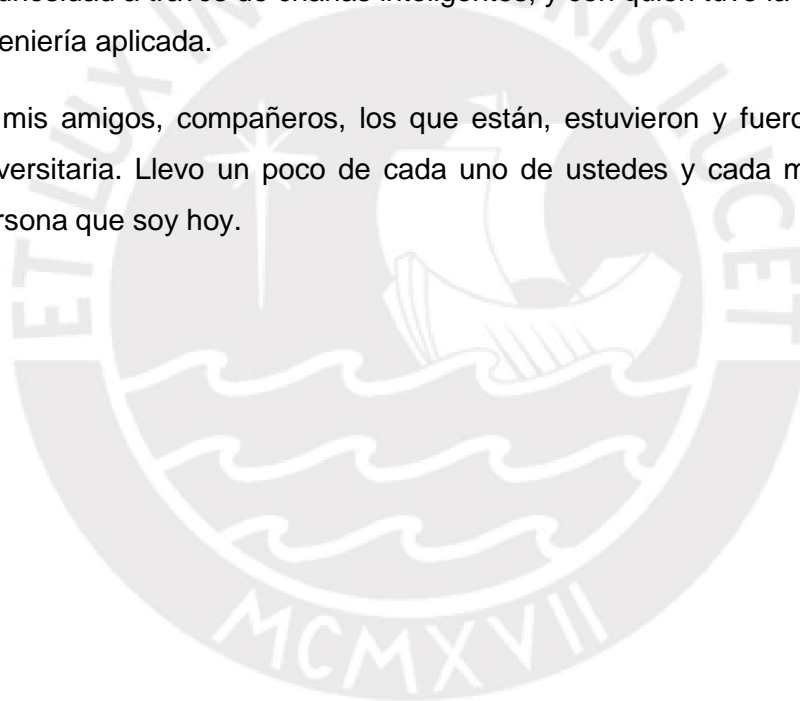


## AGRADECIMIENTOS

Definitivamente una parte de mí se encuentra en este documento, no puedo evitar sentir afecto por cada una de las palabras redactadas en esta tesis. Leo cada párrafo y me transporta a distintos momentos de un trayecto que sirvió para forjarme como persona.

Agradezco en primer lugar a mi familia. Mis padres tuvieron un rol protagónico en mi formación y los considero tan o más responsables de este logro. Una mención especial a Erika, que posee un talento especial para recordar las cosas con insistencia. A mis abuelos, cuyos cuidados aprecio demasiado, a mis tíos y todo el resto de mi familia que aportaron a esta empresa conjunta: los logros de todos. Al profe Jiménez, quien logró estimular mi curiosidad a través de charlas inteligentes, y con quien tuve la oportunidad de conocer la ingeniería aplicada.

Finalmente a mis amigos, compañeros, los que están, estuvieron y fueron parte de mi formación universitaria. Llevo un poco de cada uno de ustedes y cada momento vivido aportó a la persona que soy hoy.



## RESUMEN

La presente tesis está enfocada en el diseño energético de un horno para el curado de pintura electrostática, que forma parte de una línea de acabados que contempla la implementación de la tecnología de plaforización.

El diseño toma como punto de partida las necesidades de una empresa dedicada a la manufactura de estructuras comerciales, así como las exigencias energéticas que se deben cumplir para el funcionamiento del horno. Descrita a grandes rasgos, la metodología seguida inició con la etapa de investigación, que consiste en empaparse de las tecnologías involucradas en el proyecto y conocer los parámetros que lo delimitan; luego se realizaron los cálculos preliminares (dimensionamiento) de la línea de producción; después se pasó a la selección de tecnologías y equipos en base a los cálculos realizados; a continuación se estableció la configuración definitiva. Por último, se construyó la línea piloto, donde los resultados fueron validados y analizados.

En el capítulo 3 de este documento se exponen los cálculos. Se realizaron análisis para funcionamiento en continuo en base a un volumen de control definido, el cálculo de cargas térmicas, el cálculo de potencia de las fuentes seleccionadas, el diseño del sistema de convección, equilibrio de presiones y flujos, entre otros. Finalmente, en el capítulo 4 se describe la propuesta elaborada, la misma que fue implementada y sometida a pruebas de campo, de modo que se pudiera validar el cumplimiento de los requerimientos planteados. En torno a la evaluación de resultados obtenidos se elaboraron conclusiones y observaciones de calidad presentados en el capítulo 5.

## TEMA DE TESIS

<b>PARA OPTAR</b>	: Título profesional de Ingeniero Mecánico
<b>TEMA</b>	: Diseño energético de un horno piloto de curado para tratamiento de acabado por pintura electrostática en superficies metálicas y MDF
<b>ÁREA</b>	: Energía
<b>ASESOR</b>	: Fernando Jiménez Ugarte
<b>ALUMNO(S)</b>	: Isaac Israel Ramos Jiménez – 20110292
<b>FECHA</b>	: 02-04-2019
<b>MÁXIMO</b>	: 100 páginas

---

### DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Para la fabricación de mobiliario para locales comerciales usualmente se utiliza acero y tableros de fibra de media densidad (MDF) como materia prima. Con la finalidad de obtener una alta calidad de acabado y reducir costos los proveedores de tecnología han desarrollado recientemente el proceso de plaporización, que es un proceso de un solo paso para limpiar, desengrasar, y fosfatizar superficies metálicas de forma previa al proceso de pintado electrostático.

La implementación del proceso de plaporización en una línea de producción requiere diseñar el sistema de protección y recubrimiento de las partes metálicas según los **parámetros** inherentes a esta nueva tecnología.

El objetivo del presente tema de tesis es el diseño energético de un horno piloto de curado de acuerdo a los requerimientos planteados al formular la línea de producción considerando el proceso de plaporización.

## TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DISEÑO ENERGÉTICO DE UN HORNO PILOTO DE CURADO PARA  
TRATAMIENTO DE ACABADO POR PINTURA ELECTROSTÁTICA EN  
SUPERFICIES METÁLICAS Y MDF

### INTRODUCCION

1. CONTEXTUALIZACIÓN
2. MARCO TEÓRICO
3. ANÁLISIS SITUACIONAL
4. DIMENSIONAMIENTO ENERGÉTICO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN
5. DISEÑO ENERGÉTICO DEL HORNO DE CURADO
6. CONFIGURACIÓN DEFINITIVA

### CONCLUSIONES

### RECOMENDACIONES

### BIBLIOGRAFÍA

### ANEXOS

### PLANOS



Ing. Fernando Jiménez Ugarte  
Asesor



# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

TEMA DE TESIS

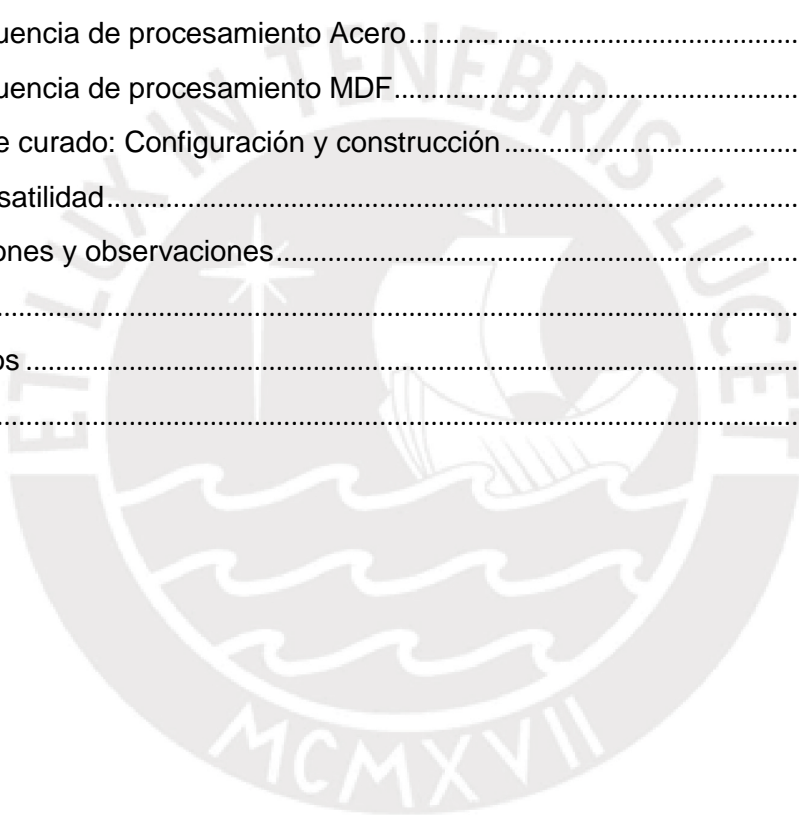
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN .....	15
1.1. Descripción de la empresa.....	15
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	19
2.1 Revestimiento (Coating) .....	19
2.2 Pintura electrostática (Powder Coating) .....	20
2.2.1 Línea de acabado por pintura electrostática .....	22
2.2.1.1 Pre-tratamiento .....	23
2.2.1.2 Aplicación.....	24
2.2.1.3 Curado.....	25
2.2.2 Powder Coating en MDF .....	27
2.2.2.1 Inducción de la adherencia electrostática.....	28
2.2.2.2 Beneficios de utilizar powder coating en MDF.....	29
2.3 Tecnología de Plaforización.....	29
2.3.1 Cuestiones básicas del proceso.....	29
2.3.2 Ventajas sobre los procesos convencionales .....	30
2.4 Teoría de la radiación infrarroja .....	31
2.4.1 Mecanismo de Calentamiento .....	32
2.4.2 Tecnología de radiación infrarroja en la industria de los procesos de acabado. ....	33
2.4.2.1 Paneles infrarrojos (catalíticos) .....	34
CAPÍTULO III. ANÁLISIS SITUACIONAL .....	37
3.1 Análisis del problema.....	37
3.1.1 Definición del problema .....	37
3.1.2 Objetivos .....	37
3.1.3 Listado de requerimientos .....	38

3.1.4	Marco Metodológico .....	38
3.2	Análisis Situacional .....	39
3.2.1	Descripción de los procesos que componen la línea .....	39
3.2.2	Descripción de la situación inicial de la planta .....	41
CAPÍTULO IV. DIMENSIONAMIENTO ENERGÉTICO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN		46
4.1.	Descripción de las piezas a tratar .....	46
4.2.	Dimensionamiento preliminar de los procesos .....	47
4.2.1.	Parámetros de diseño para la línea de producción .....	47
4.2.1.1.	Proceso de Pre-tratamiento .....	47
4.2.1.2.	Proceso de Post-tratamiento.....	49
4.2.2.	Velocidad de transportador aéreo .....	49
4.2.3.	Longitud por etapas .....	50
CAPÍTULO V. DISEÑO DEL HORNO DE CURADO.....		51
5.1	Dimensionamiento del horno .....	51
5.1.1	Flujo másico de metal .....	52
5.1.2	Calor para calentar el acero del volumen de control .....	53
5.1.3	Cálculo del calor perdido en las fronteras .....	53
5.1.4	Cálculo precalentamiento.....	54
5.1.4.1	Calor para calentar el aire interno inicial.....	55
5.1.4.2	Calor para calentar las paredes internas del horno .....	55
5.1.5	Valores Obtenidos .....	57
5.1.6	Selección de la potencia del horno .....	57
5.1.7	Cálculo del espesor de aislante .....	57
5.1.8	Dimensionamiento del sistema de radiación.....	60
5.1.8.1	Determinación del número de paneles .....	60
5.1.8.2	Configuración y potencia.....	61
5.1.9	Dimensionamiento del sistema de convección.....	62
5.1.9.1	Cálculo del flujo másico de gases requerido – análisis termodinámico.....	62
5.1.9.2	Determinación de la relación aire/combustible para obtener gases a 250°C – Balance térmico (análisis del quemador) .....	64
5.1.9.3	Determinación del flujo másico de combustible – Análisis termodinámico del quemador .....	65



5.1.9.4	Cálculo de los flujos máxicos de aire .....	67
5.1.9.5	Potencia y selección del quemador .....	67
5.1.9.6	Dimensionamiento del generador de gases .....	68
5.1.9.7	Dimensionamiento del sistema de circulación de gases calientes.....	71
5.1.9.7.1	Intake (múltiple de admisión).....	72
5.1.9.7.2	Exhaust (múltiple de escape) .....	73
5.1.9.8	Cálculo de la potencia del ventilador.....	75
CAP VI. CONFIGURACIÓN DEFINITIVA.....		80
6.1	Propuesta.....	80
6.1.1	Secuencia de procesamiento Acero.....	81
6.1.2	Secuencia de procesamiento MDF.....	82
6.2	Horno de curado: Configuración y construcción.....	82
6.2.1	Versatilidad.....	83
Recomendaciones y observaciones.....		87
Conclusiones.....		88
Lista de Anexos .....		89
Bibliografía.....		90



## Listado de imágenes

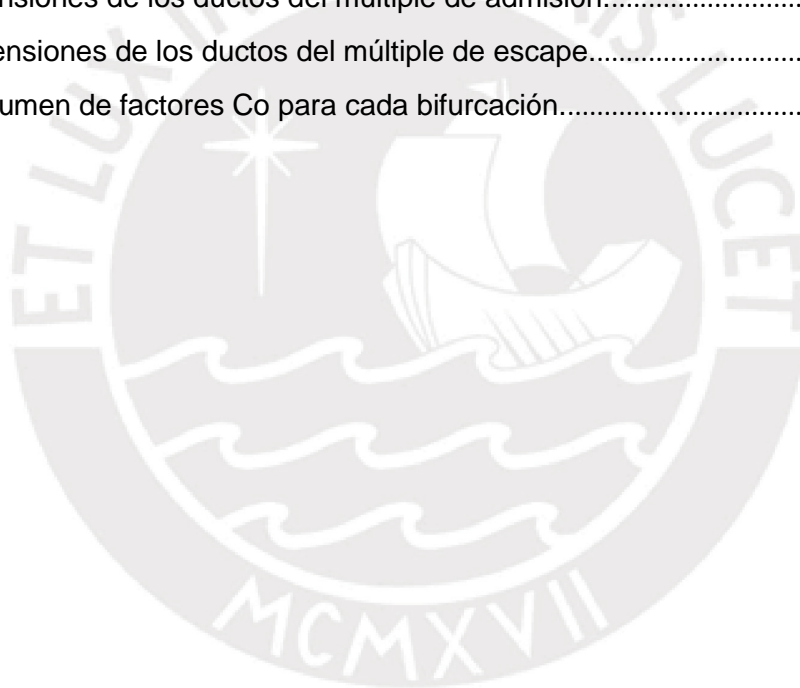
Figura 1.1: Mobiliario comercial fabricado por Matransa. Proyecto Saga Falabella. ....	15
Figura 1.2: Mobiliario comercial fabricado por Matransa. Proyecto Marquis .....	16
Figura 1.3: Mobiliario comercial fabricado por Matransa. Proyecto Casa & Ideas .....	16
Figura 1.4: Croquis de la ubicación de la planta. ....	17
Figura 1.5: Procesos realizados en el nivel uno de la planta. ....	17
Figura 1.6: Procesos realizados en el nivel dos de la planta .....	18
Figura 2.1: Ejemplos de recubrimiento. Pintura anti fuego (izquierda), protección anticorrosión de un panel metálico (derecha) .....	19
Figura 2.2: Ejemplos de tratamiento de acabado por pintura electrostática .....	20
Figura 2.3: Esquema del proceso convencional de acabado por pintura electrostática .....	22
Figura 2.4: Ejemplo de pasivación. Capa de óxido de cromo para proteger el acero inoxidable .....	23
Figura 2.5: Esquema de aplicación de pintura electrostática con pistola .....	24
Figura 2.6: Aplicación de pintura electrostática en MDF .....	28
Figura 2.7: Aspersores aplicando fluido de plaforización .....	30
Figura 2.8: Posición de la radiación infrarroja dentro del espectro electromagnético .....	32
Figura 2.9: Carrocería de un auto dentro de un horno de curado de lámparas eléctricas infrarrojas .....	34
Figura 2.10: : Reacción química que ocurre al interior del panel catalítico .....	35
Figura 2.11: Paneles catalíticos infrarrojos instalados (izquierda). Elementos internos del panel catalítico (derecha) .....	35
Figura 3.1: Diagrama de flujo de la línea planteada .....	39
Figura 3.2: Vista de planta e isométrica del túnel de pre-tratamiento .....	42
Figura 3.3: Isometría del sistema de aspersion y detalle de la boquilla .....	43
Figura 3.4: Isometría del túnel de post-tratamiento .....	43
Figura 3.5: Isometría del transportador aéreo y detalle del sistema motriz. ....	44
Figura 3.6: Isometría del ciclón de recuperación .....	45
Figura 3.7: Ciclón de recuperación .....	45
Figura 4.1: Dimensiones de la pieza metálica modelo (medidas en mm) .....	46
Figura 4.2: Dimensiones de un tablero de MDF promedio. ....	47



Figura 5.1: Gráfico temperatura de pieza vs longitud de horno.....	51
Figura 5.2: Volumen de control considerado para los cálculos energéticos (superficie naranja).....	52
Figura 5.3: Esquema del Volumen de control considerado para los cálculos energéticos (medidas en milímetros).....	52
Figura 5.4: Esquema de la transferencia de calor en las paredes del horno.....	53
Figura 5.5: Esquema de la transferencia de calor en las paredes del horno.....	58
Figura 5.6: Sección del tramo de radiación, posición de los paneles radiantes.....	61
Figura 5.7: Configuración utilizada en hornos comerciales.....	61
Figura 5.8: Diagrama termodinámico del sistema de convección, generador de gases + horno de convección.....	62
Figura 5.9: Diagrama termodinámico del horno de convección.....	63
Figura 5.10: Diagrama termodinámico del generador de gases.....	65
Figura 5.11: Diagrama termodinámico del quemador.....	65
Figura 5.12: Quemador seleccionado.....	68
Figura 5.13: Sistema de circulación de gases calientes, leyenda de los componentes a dimensionar.....	71
Figura 5.14: Vista superior del plenum de admisión (“piso” del horno).....	72
Figura 5.15: Plano del sistema de circulación.....	74
Figura 5.16: Modelo del horno de curado dimensionado.....	79
Figura 6.1: Propuesta definitiva para la línea de acabados.....	81
Figura 6.2: Generador de gases calientes.....	83
Figura 6.3: Vista transversal. Detalle de la disposición de los paneles a la entrada del horno.....	84
Figura 6.4: Entrada del horno en vista transversal: Configuración de paneles 2.....	85
Figura 6.5: Elementos constituyentes del control para la alimentación de gas.....	85
Figura 6.6: Detalle plenum superior (intake manifold).....	86
Figura 6.7: Sistema de circulación de gases calientes.....	86

## Listado de Tablas

Tabla 1: Magnitudes de la pieza modelo .....	46
Tabla 2: Magnitudes de un panel MDF promedio .....	47
Tabla 3: Parámetros de la etapa de aplicación .....	48
Tabla 4: Parámetros de la etapa de escurrido.....	48
Tabla 5: Parámetros de la etapa de secado .....	49
Tabla 6: Parámetros de la etapa de curado.....	49
Tabla 7: Tabla resumen de los parámetros para los procesos involucrados .....	50
Tabla 8: Tabla resumen etapa de curado.....	57
Tabla 9: Dimensiones de los ductos del múltiple de admisión.....	73
Tabla 10: Dimensiones de los ductos del múltiple de escape.....	74
Tabla 11: Resumen de factores Co para cada bifurcación.....	76



# INTRODUCCIÓN

Los productos manufacturados utilizados para diversas aplicaciones en la vida cotidiana se encuentran expuestos a entornos agresivos inherentes a su función, a la acción ambiental, o simplemente al efecto del paso del tiempo. Para mejorar su desempeño ante dicha exposición, se les otorga un tratamiento de recubrimiento utilizado en todo proceso de manufactura a nivel mundial conocido como proceso de acabado.

El proceso de acabado de superficies (*Surface finishing process en inglés*) abarca un amplio rango de procesos industriales cuya finalidad es alterar la superficie de un elemento para lograr ciertas propiedades mecánicas durante su funcionamiento. Los procesos de acabado pueden ser empleados para mejorar la apariencia, adhesión, soldabilidad, resistencia a la corrosión, al desgaste, etc.

Una de las técnicas de acabado más utilizadas y difundidas es el acabado por pintura en polvo o pintura electrostática (powder coating). La pintura electrostática tiene como principio la adhesión electromagnética entre las partículas de pintura ionizadas y la pieza a tratar. Un buen proceso de pintado en polvo aumenta la resistencia a la corrosión, ayuda a preservar el material y mejora las propiedades mecánicas de la pieza tratada. No obstante su alta funcionalidad, no es un procedimiento autosuficiente; por lo que es necesario un pre-tratamiento que elimine las impurezas y prepare la superficie, y un post-tratamiento que cristalice la estructura de la pintura depositada.

El contexto de la tesis se sitúa en el proyecto de una empresa dedicada a la fabricación de mobiliario personalizado para interiores comerciales. El proyecto consiste en el desarrollo e implementación de una nueva línea de producción para la aplicación de procesos de acabado por pintura electrostática, en metal y paneles de MDF, utilizando una tecnología de pre-tratamiento distinta a las convencionales.

De modo que el presente documento describe el proyecto, muestra las fases de implementación, los retos y problemas a solucionar, y el procedimiento seguido para el diseño energético del horno de curado para la línea de producción de acuerdo a los requerimientos planteados.

Se inicia con la descripción de la empresa, las labores que desempeña y el mercado que abarca. Sigue el marco teórico, que pretende introducir los conceptos relevantes para el entendimiento completo del documento y del proyecto planteado, así como las decisiones tomadas y su respectiva justificación. A continuación, se describe la situación inicial del proyecto, el listado de requerimientos y el marco metodológico. Finalmente, se define una propuesta.

El proyecto es ambicioso y de gran relevancia, pues aparte de contribuir al desarrollo tecnológico nacional, la planta sería la primera en el Perú en contar con un proceso de pre-tratamiento por plañorización; y una de las pocas en el mundo capaz de procesar en una misma línea de producción superficies de acero y MDF.



# CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN

El objetivo de esta sección es brindar una breve reseña acerca de la empresa en la que se va a realizar el proyecto descrito.

## 1.1. Descripción de la empresa

La empresa Matransa se dedica a implementar proyectos de mobiliario para interiores comerciales. La misión de la empresa es construir interiores comerciales que conviertan el punto de venta en una experiencia de compra memorable.

Para convertir en realidad la visión de los clientes, se interpreta la visión del proyectista, se define la técnica de ingeniería constructiva y finalmente se ejecuta el proceso de manufactura.

Actividad(es) principal(es)

- Diseño de proyectos personalizados
- Fabricación e instalación de mobiliario comercial en base a acero y MDF
- Asesoría en proyectos arquitectónicos para el sector retail



Figura 1.1: Mobiliario comercial fabricado por Matransa. Proyecto Saga Falabella - tiendas por departamento. (Matransa, 2018)





Figura 1.2: Mobiliario comercial fabricado por Matransa. Proyecto Marquis - tiendas por departamento. (Matransa, 2018)



Figura 1.3: Mobiliario comercial fabricado por Matransa. Proyecto Casa & Ideas - tiendas por departamento. (Matransa, 2018)

La planta se encuentra en la zona industrial de Villa el Salvador. Comparte ubicación estratégicamente con otros fabricantes de muebles, plantas comercializadoras de acero y demás industrias relacionadas.



Figura 1.4: Croquis de la ubicación de la planta. (Matransa, 2018)

La planta se divide en dos niveles. El primer nivel consiste en estaciones para trabajos en acero. En este nivel se pueden encontrar soldadoras, cortadoras, fresadoras, máquinas CNC, hornos, etc



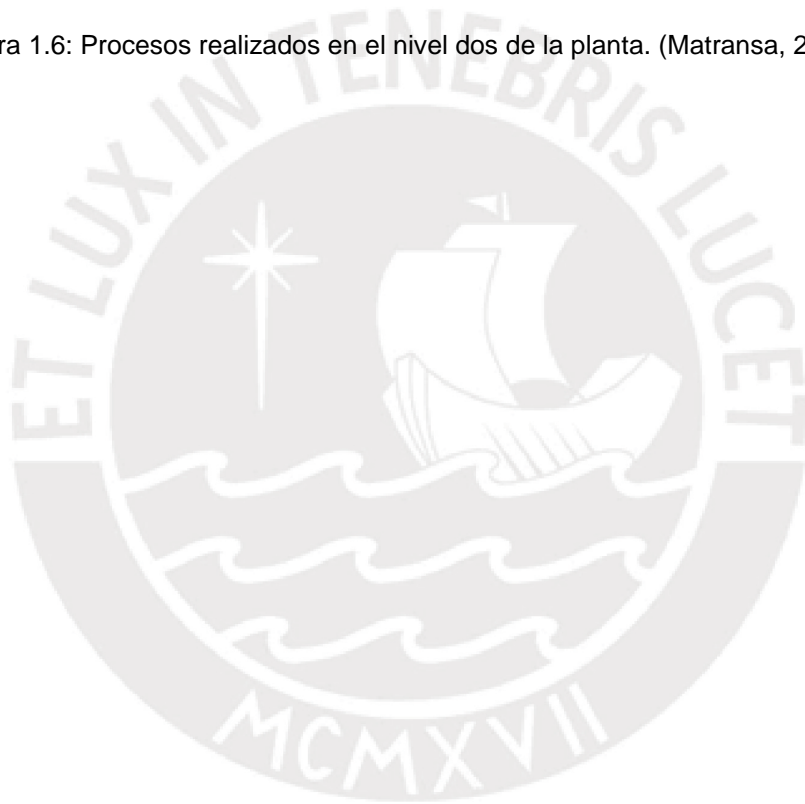
Figura 1.5: Procesos realizados en el nivel uno de la planta. (Matransa, 2018)

El segundo nivel está destinado al tratamiento de MDF. La separación existe para evitar la contaminación cruzada por la fibra desprendida de las superficies de MDF tratadas.

Adicionalmente a las estaciones de trabajo, en el segundo nivel se encuentran las oficinas administrativas y la sala de reuniones.



Figura 1.6: Procesos realizados en el nivel dos de la planta. (Matransa, 2018)





## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Revestimiento (Coating)

El proceso de acabado, también conocido como revestimiento (coating), consiste en aplicar una capa de recubrimiento sobre la superficie de un objeto, usualmente referido como sustrato, con propósitos decorativos, funcionales o ambos.

Los revestimientos funcionales son aplicados con el objetivo de adquirir ciertas propiedades en la superficie tratada. Las funciones que cumplen estos revestimientos son variadas, por lo que un conocimiento de las condiciones de operación del objeto tratado es fundamental para la correcta decisión sobre el tipo y forma de aplicación del revestimiento aplicado.

Algunas de las propiedades funcionales de revestimientos aplicados industrialmente son:

- Adhesivas; mejoran la adhesión de las capas posteriores
- Ópticas; revestimientos reflexivos, anti-reflexivos, absorción de radiación, pigmentación
- Magnéticas, eléctricas o electrónicas, respuesta magnéticas o conductividad eléctrica
- Protección; proteger el sustrato, propiedades impermeables, anti-desgaste, anti-corrosión, anti-fuego, aislamiento, etc.



Figura 2.1: Ejemplos de recubrimiento. Pintura anti fuego (izquierda), protección anticorrosión de un panel metálico (derecha).

## 2.2 Pintura electrostática (Powder Coating)

El proceso de acabado por pintura electrostática, también llamado pintura en polvo o Powder coating (*en inglés*) es un tipo de recubrimiento industrial 100% sólido, que suele ser utilizado para crear un acabado duro, más resistente que la pintura convencional, con excelentes resultados en términos de acabado y sellado. Este recubrimiento es utilizado ampliamente a nivel industrial debido a su facilidad de aplicación, eficiencia y beneficios en términos de seguridad ambiental y operativa.

Para lograr el recubrimiento, las partículas del polvo son cargadas electrostáticamente y luego depositadas en el sustrato a través de distintos métodos. Las partículas cargadas se adhieren al sustrato conectado a tierra, para ser luego fundidas durante el proceso de curado y formar un revestimiento uniforme de alta calidad, atractivo y duradero.

El proceso de acabado por pintura electrostática,

- logra un sellado resisten raspones, corrosión, abrasión, químicos y detergentes;
- no requiere ventilación, pues no contiene compuestos orgánicos volátiles (VOCs);
- teóricamente el 100% de la pintura en polvo puede ser recuperado y reutilizado, la reutilización es bastante alta incluso tomando en cuenta las pérdidas en el filtro y en la cadena transportadora;
- requiere mínima capacitación del operador y supervisión en comparación con otras tecnologías.

“In short, powder coating can provide the “Five E’s”: economy, efficiency, energy savings, environmental compliance and an excellent finishing.” (Talbert, 2015)



Figura 2.2: Ejemplos de tratamiento de acabado por pintura electrostática. (Coatingsworld, 2016)

## Elementos constituyentes de la pintura electrostática

La pintura en polvo es un compuesto de resinas sintéticas, endurecedores, aditivos, pigmentos y cargas. Los porcentajes en los cuales estos se presenten, darán a la pintura las características finales: color, resistencia, flexibilidad, acabado superficial, etc. (Lizárraga, 2016)

Está constituida fundamentalmente de cargas y resinas, que son las encargadas de unir las partículas sólidas, pigmentos y cargas una vez esté seca la pintura, y de brindar la mayoría de propiedades mecánicas. Las cargas, extendedores o fillers (de naturaleza inorgánica) aportan cuerpo, materia sólida y dan estructura, viscosidad y reología a la pintura. También proporcionan espesor de capa, opacidad, propiedades anticorrosivas, etc. (Alonso, 2013) (Carpenter & Carpenter)

Otro componente importante son los pigmentos, encargados del color de la pintura. El porcentaje y el tipo de pigmentos utilizados en la pintura dictarán la tonalidad y el color final. La principal característica que deben aportar los pigmentos es una buena resistencia a la decoloración durante el proceso de curado, es decir, soportar altas temperaturas.

Por último, los aditivos y disolventes. Los disolventes son utilizados para solubilizar las resinas, regular su velocidad de evaporación y controlar la viscosidad. Los aditivos son productos que se dosifican en pequeñas cantidades y tienen como función aportar características concretas a la película de pintura seca, entre ellas crear las condiciones adecuadas para que el secado se produzca de forma correcta y para estabilizar la pintura en el periodo de almacenamiento.

## 2.2.1 Línea de acabado por pintura electrostática

Para la aplicación del proceso de recubrimiento por pintura electrostática, el sustrato/pieza a tratar debe pasar por una serie de sub-procesos: Pre-tratamiento, aplicación y curado

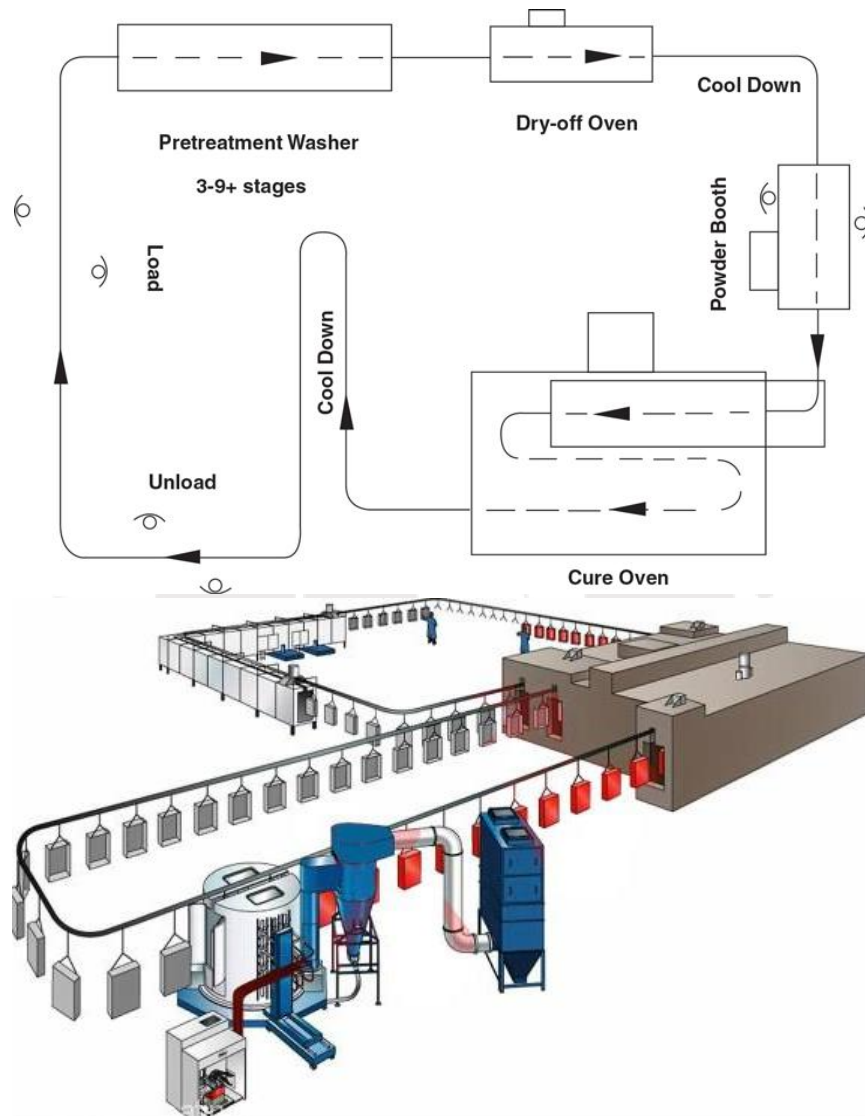


Figura 2.3: Esquema del proceso convencional de acabado por pintura electrostática.

### 2.2.1.1 Pre-tratamiento

El primer paso en el proceso de acabado por pintura electrostática es preparar la superficie de las piezas a tratar. La superficie es expuesta a operaciones de limpieza para asegurar que se encuentre libre de grasas, polvos y otros contaminantes inorgánicos (como corrosión). Esta limpieza se puede realizar por medios mecánicos o por medios químicos.

Luego de la limpieza, la superficie es sometida al proceso de pasivación. La pasivación consiste en la formación de una película inerte sobre la superficie de un material (sustrato), que lo protege en contra de la acción de agentes externos. Como se menciona en un fragmento de la revista Ferrero: Recubrimientos Fosfatados, se dice que un material se convierte en “pasivo” cuando no reacciona o reacciona químicamente muy poco a su entorno, por lo que se ve menos afectado o corroído. La pasivación implica la creación de un “micro-recubrimiento” protector.

Existen muchas técnicas para crear la película pasivante, el proceso elegido dependerá del material del sustrato y de las propiedades finales a alcanzar durante la operación de las piezas tratadas. Los pretratamientos más utilizados son el fosfatado de hierro para el acero, el fosfatado de zinc para piezas galvanizadas y fosfatado de cromo para sustratos de aluminio.

Luego de que la etapa de pasivación es completada, las piezas son secadas en un horno de baja temperatura. Una vez finalizado el secado, las piezas están listas para ser pintadas.



Figura 2.4: Ejemplo de pasivación. Capa de óxido de cromo para proteger el acero inoxidable.



### 2.2.1.2 Aplicación

La aplicación de la pintura en polvo en una superficie se basa en el principio electrostático: dos cargas opuestas se atraen. La pintura es aplicada por equipos especializados, los cuales se encargan de transportar la pintura por mangueras a través de un sistema de vacío creado por aire comprimido a alta velocidad, hasta la pistola de aplicación. Las pistolas canalizan y direccionan el flujo de partículas, y con la ayuda de un inyector controlan el patrón de aplicación, tamaño, forma, densidad y razón de deposición de las partículas. La aplicación puede ser manual o automatizada.

La adherencia se logra gracias a que las pistolas generan un campo electrostático (de alto voltaje y bajo amperaje) entre el electrodo y la pieza a tratar. Las partículas de polvo que pasan a través del campo electrostático, ionizado en la punta del electrodo, son cargadas negativamente y finalmente depositadas en la superficie de la pieza conectada a tierra. También se puede obtener la carga electrostática por fricción, para esto es necesario forzar el roce entre las partículas de polvo y un conductor dentro de la pistola, de modo que se produzca un desprendimiento de electrones de las partículas de polvo.

Alternativamente a la aplicación con pistolas existen muchos otros métodos, sin embargo la aplicación con pistolas es el método más extendido, versátil, desarrollado y validado.

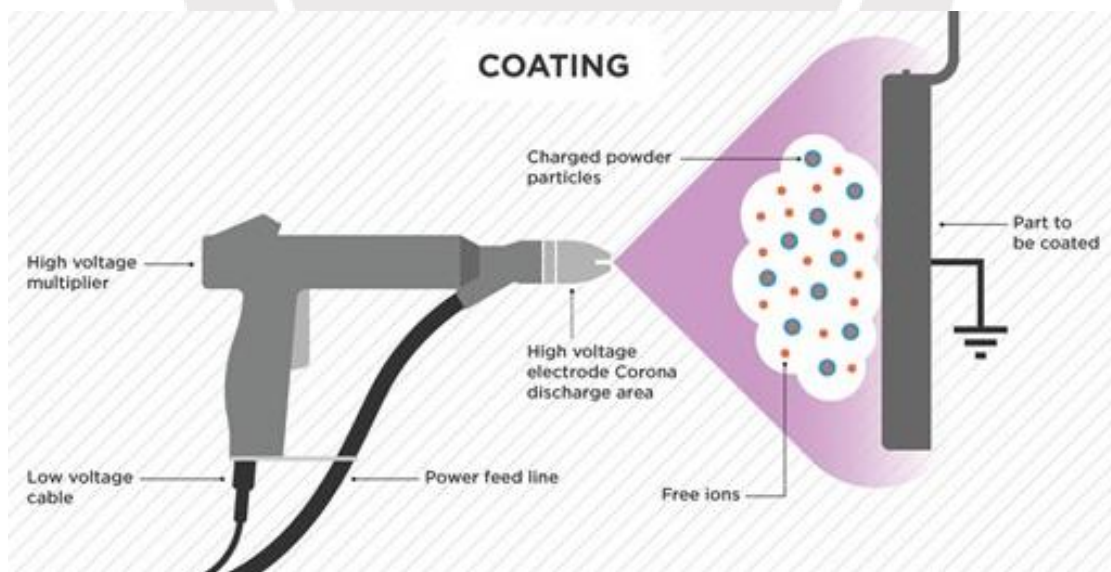


Figura 2.5: Esquema de aplicación de pintura electrostática con pistola.

### 2.2.1.3 Curado

La pintura electrostática requiere de cierta cantidad de calor aplicado durante un tiempo determinado para que se produzcan las reacciones químicas necesarias que permitan unir las partículas al sustrato. Las partículas una vez expuestas al calor necesario se funden, fluyen formando una capa y se unen químicamente. (Talbert, 2016)

Al proceso anteriormente descrito se le conoce como curado o polimerización. Consta básicamente consta de activar las reacciones químicas del sistema de resinas por medio de calor. “El curado de la pintura en polvo ocurre en el horno y permite conseguir una película homogénea, resistente y con el aspecto final deseado; por lo tanto, esta etapa es crítica en el desarrollo de las propiedades visuales y funcionales del recubrimiento.

Se pueden diferenciar cinco etapas desde que la pieza con el polvo adherido entra en el horno hasta que la pieza se encuentra correctamente recubierta:

#### Etapas del Curado

- **Fusión:** Las partículas de polvo pasan del estado sólido a un “estado fundido” (un semilíquido), estado en el cual pierden la identidad de partícula y se van transformando paulatinamente en una masa común.
- **Flujo:** El polvo ya se encuentra completamente líquido por lo es capaz de fluir y, si la cantidad de pintura depositada en la pieza es suficiente, cubrir la superficie completamente. Esta etapa es crítica para lograr una adecuada nivelación de la pintura.
- **Reacción:** Ocurre cuando el calor absorbido es suficiente para permitir el inicio de las reacciones de entrecruzamiento en la pintura. En esta etapa ocurren las reacciones físico-químicas que determinan las propiedades físicas del film.
- **Gelificación:** Es el punto en el que el nivel de entrecruzamiento alcanzado es suficiente para que el film pase del estado líquido a sólido. La pintura expulsa los componentes volátiles y termina de desgasificarse.
- **Curado:** En esta etapa concluyen las reacciones de entrecruzamiento y se alcanzan las propiedades de resistencia química máxima de la pintura.

Entender lo que ocurre en las distintas etapas del proceso de curado permite a los aplicadores optimizar las condiciones del mismo y lograr un acabado excelente en todos los sentidos.” (El Sitio de la Pintura en Polvo)

Varios métodos pueden ser utilizados para suministrar el calor necesario para el curado:

- Hornos de convección

Utilizan una fuente de calor (quemador) para transferir la energía de combustión al aire, y un ventilador para distribuir el aire caliente dentro del horno. El aire se encarga de transferir el calor a las partículas de pintura. Es el tipo de curado más común y difundido.

- Hornos infrarrojos (IR)

Utilizan gas o electricidad como fuente de energía para emitir radiación en la longitud de onda infrarroja que es absorbida por las partículas de polvo y el sustrato inmediatamente adyacente a la capa de partículas hasta la temperatura de curado. El calentamiento focal permite un rápido aumento de la temperatura, y por lo tanto, menores tiempos de curado. Sin embargo, la forma y densidad de la pieza pueden afectar la uniformidad del curado.

- Hornos IR + convección

Utilizan generalmente IR en la zona inicial para fundir las partículas de polvo rápidamente antes de entrar en la etapa de convección. La etapa inicial permite que la zona de convección pueda utilizar velocidades de flujo de aire mayores sin el riesgo de desprendimiento de las partículas de pintura, lo que significa un aumento de velocidad de transferencia de calor y periodos de curado más cortos.

- Hornos de radiación ultravioleta (UV)

Requiere pinturas especialmente formuladas para que puedan ser curadas a través de la exposición a luz ultravioleta. Las partículas necesitan primero ser



expuestas a suficiente calor, de modo que al momento de la exposición a la energía UV se encuentren fundidas. Durante la exposición un componente en la composición de la pintura absorbe la energía UV y convierte la película fundida en una capa sólida curada en cuestión de segundos.

Las tecnologías de radiación siguen desarrollándose y diversificando sus aplicaciones. Tecnologías como la radiación ultravioleta (UV) y rayo de electrones (EB) tienen potencial para abrir nuevas oportunidades para la aplicación de pintura electrostática en sustratos sensibles al calor como la madera o el plástico.

### 2.2.2 Powder Coating en MDF

Un tablero de fibra de densidad media (MDF) es una combinación de fibras de madera aglutinadas con resinas sintéticas mediante fuerte presión y calor, en seco, hasta alcanzar una densidad media. Presenta una estructura uniforme y homogénea y una textura fina que permite que sus caras y cantos tengan un acabado perfecto. Se trabaja prácticamente igual que la madera maciza, pudiéndose fresar y tallar en su totalidad.

El continuo desarrollo en las tecnologías permite que las aplicaciones para el revestimiento por pintura electrostática se expandan constantemente. Muchos avances se han conseguido en superficies sensibles al calor como plásticos o madera, y el futuro es promisorio para muchas más aplicaciones imaginables. De hecho, el mercado de revestimiento en madera tiene el potencial de ser tan grande como el mercado de revestimiento de superficies metálicas.

Es así como la pintura electrostática está revolucionando el mercado de MDF pues ofrece libertad en el diseño frente a otros métodos de acabado y laminado. Debido a que presenta una estructura homogénea y una baja porosidad, el MDF es un sustrato ideal para este proceso, resultando en un acabado de alta calidad.

Existen dos métodos para procesar la pintura electrostática en sustratos de madera: pintura térmica y pintura UV. Ambas son tecnologías validadas que se utilizan actualmente en la industria.

El proceso UV ha ganado terreno debido a su ciclo más corto y menor espacio requerido en contraste con los hornos de convección utilizados en el revestimiento con pinturas térmicas que igualan los tiempos de proceso del metal.

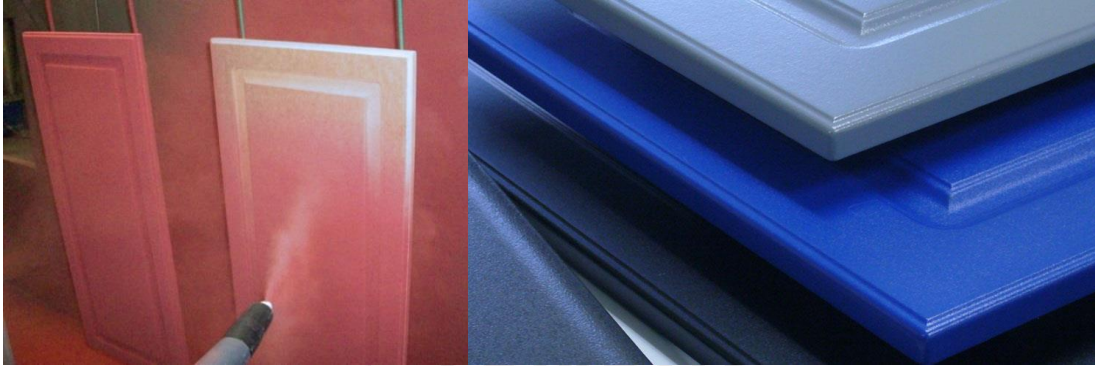


Figura 2.6: Aplicación de pintura electrostática en MDF.

#### 2.2.2.1 Inducción de la adherencia electrostática

Hasta hace un tiempo, la pintura electrostática estuvo limitada a materiales conductivos como metales. Sin embargo, el estudio del sustrato ha permitido crear métodos para obtener la conductividad eléctrica necesaria para llevar a cabo el proceso de pintado.

Mediante el estudio del sustrato MDF se llegó a la conclusión de que la resistencia eléctrica es influenciada por la temperatura y el contenido de humedad del panel. Incrementando el contenido de humedad y temperatura, la resistencia eléctrica decrece y, por lo tanto, la adherencia de la pintura en polvo al sustrato MDF mejora. (Jocham, 2011)

Por supuesto, para que se logre un precalentamiento y una conductividad adecuada es necesario que la pieza posea una densidad uniforme de las fibras con la que es construida.

Además de la inducción de la conductividad eléctrica por precalentamiento del sustrato, existen productos que se pueden aplicar sobre la superficie para mejorar la conductividad llamados “primers”. Estos productos son aplicados en el caso de que las piezas presenten formas muy complejas con esquinas muy pronunciadas donde es difícil la deposición homogénea de las partículas.

### 2.2.2.2 Beneficios de utilizar powder coating en MDF

- Utilización de material. Las partículas rociadas pueden ser recuperadas dentro de la cabina de pintura con una eficiencia de utilización por encima del 97%.
- Procedimiento de un paso. No requiere aplicaciones sucesivas, ni etapas de secado.
- Bajo costo de operación. En muchos casos solo se necesita una persona para la operación/mantenimiento de la línea de pintado.
- Alta productividad. Bajos tiempos de operación permiten una mayor producción.
- Flexibilidad de diseño. Permite tratar elementos de diversas formas y texturas.
- Durabilidad del acabado. Brinda al sustrato resistencia a raspones, impacto y químicos.

## 2.3 Tecnología de Plaforización

La tecnología de pre-tratamiento por *Plaforización* es un proceso de un solo paso para limpiar, desengrasar, y fosfatizar superficies metálicas de forma previa al proceso de acabado por pintura electrostática. (Guidetti, 2009)

### 2.3.1 Cuestiones básicas del proceso

Desde un punto de vista químico, la plaforización es muy diferente a los procesos convencionales basados en agua. Su composición química está basada en una serie de fluidos orgánicos de alto punto de ebullición, y una resina orgánica polimérica. El proceso es de un solo paso, ningún desengrasado preliminar es requerido, y ningún enjuague es realizado después del pre-tratamiento. La aplicación puede ser por inmersión o por spray, a temperatura ambiente.

Durante la aplicación ocurren distintos procesos de forma simultánea:

- Los contaminantes óleos son disueltos por los fluidos orgánicos, mientras que las partículas sólidas como polvo, suciedad, contaminantes, etc., son lavadas y removidas por la solución.
- La superficie de metal es atacada por el ácido fosfórico parte de la resina orgánica.
- La resina orgánica polimérica forma uniones con la superficie metálica creando una capa uniforme con un espesor de alrededor de 1 micra. Esta capa provee excelente resistencia frente a la corrosión, y potencia la adhesión de capas posteriores.

Una vez terminado este proceso simultáneo, los contaminantes óleos disueltos en el producto son capturados por la estructura polimérica sin interferir en la interacción entre el polímero y la capa metálica superficial. Se puede resaltar el hecho de que en lugar de ser un desperdicio, los aceites se convierten en una parte útil del proceso, actuando como agentes plastificantes en la resina. (Guidetti, 2009)



Figura 2.7: Aspersores aplicando fluido de plañorización.

### 2.3.2 Ventajas sobre los procesos convencionales

- Simplicidad y ahorro de tiempo  
El proceso es de un solo paso, de modo que todos los equipos relacionados a los procesos convencionales son suprimidos.

- Buenas prestaciones y calidad consistente
  - Proceso de gran eficacia;
  - Ofrece una adecuada protección superficial por varias semanas;
  - Buena adherencia a recubrimientos posteriores (enlaces covalentes);
  - Mayor resistencia al impacto y al doblado, debido a la incorporación de los componentes aceitosos en la película formada.
  
- Proceso multi-metal
 

Con el mismo producto químico, los usuarios pueden tratar acero, aluminio, acero galvanizado, hierro fundido, aleaciones de aluminio e incluso acero inoxidable.
  
- Costos
 

Ausencia de virtualmente todos los costos típicamente relacionados a los procesos convencionales, como calentamiento, enjuagado, remoción de lodo, mantenimiento, etc.
  
- Impacto ambiental
  - No crea lodos o desechos para ser tratados o descartados;
  - No utiliza agua, de modo que no hay agua contaminada como resultante;
  - Los fluidos orgánicos son no inflamables y libres de cloruros;
  - Los fluidos, una vez evaporados al ambiente, son biodegradados rápidamente en dióxido de carbono y agua.
  
- Equipo necesario para cada proceso
 

Debido a la simplicidad del tratamiento, y las bajas presiones de operación, los costos de equipamiento se ven significativamente reducidos comparados con los sistemas convencionales.

## 2.4 Teoría de la radiación infrarroja

La energía infrarroja es una forma de radiación que cae entre la luz visible y las ondas microondas dentro del espectro electromagnético. Como las demás formas de energía electromagnética, las ondas infrarrojas viajan en ondas.



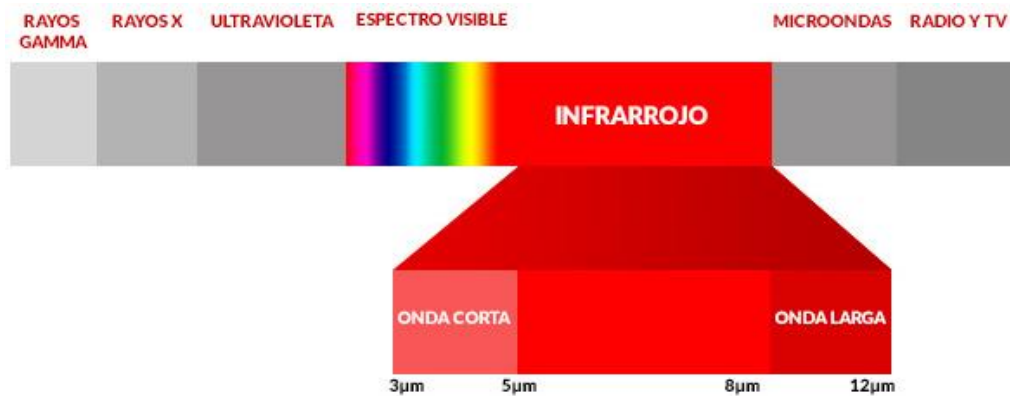


Figura 2.8: Posición de la radiación infrarroja dentro del espectro electromagnético.

### 2.4.1 Mecanismo de Calentamiento

“El calentamiento por medio de la radiación infrarroja se muestra como una alternativa viable para el progreso del sector productivo, no solo por poder brindar mejores eficiencias en el sistema y calidad en los productos, sino también por ampliar las posibilidades para el uso de otros recursos energéticos, utilizando tecnologías más eficientes que permitan reducir los costos de producción.

La emisión de energía en forma de radiación, debido a los cambios en los niveles de rotación y vibración de las moléculas, se describe en dos diferentes teorías. Una de ellas sustenta que se emite en paquetes denominados fotones o cuantos, mientras otra sostiene que la radiación se emite en forma de “luz”, o más propiamente, en forma de ondas electromagnéticas. En conjunto ambos puntos de vista es lo que se conoce como la dualidad Onda-Partícula.

La radiación térmica, como su nombre lo indica, se refiere a la radiación que emiten los cuerpos, debido a la excitación que sus electrones constituyentes sufren a causa del aumento de la temperatura. La emisión de estas ondas se caracteriza por su naturaleza espectral, la cual está relacionada con la longitud y/o la frecuencia de onda, y con la direccionalidad de esta.” (Suárez Castañeda, Amell Arrieta, & Cadavid Sierra, 2012)

Los objetos calientes irradian ondas electromagnéticas. Cuando una onda electromagnética alcanza un objeto frío, los campos eléctricos y magnéticos cambiantes

de la onda electromagnética actúan en las partículas cargadas de los átomos del objeto frío. Cuando las ondas electromagnéticas son absorbidas por un objeto, excitan los átomos del objeto provocando una vibración, y generando un aumento en la temperatura.

A medida que la energía vibratoria de los átomos aumenta, lo hace también la temperatura del objeto frío. De esta manera, los átomos del objeto frío absorben la energía de la onda electromagnética. La energía es transferida del objeto caliente al objeto frío sin contacto físico y sin un medio entre los mismos.

#### 2.4.2 Tecnología de radiación infrarroja en la industria de los procesos de acabado

La tecnología infrarroja en la industria se aplica utilizando hornos de radiación con configuraciones personalizadas de acuerdo a los requerimientos de la producción. Dentro de dichos hornos la energía infrarroja puede ser absorbida directamente por el sustrato, a diferencia del calentamiento por convección, que necesita primero calentar el medio (aire, fluido) para transmitir energía al objeto a calentar.

Existen dos formas de generación de energía radiante dentro de un horno: Los sistemas con llama y los sistemas sin llama. Los sistemas con llama utilizan combustible para producir una llama que calienta un emisor cerámico generador de radiación infrarroja. Para los sistemas sin llama la radiación puede ser generada tanto por fuentes eléctricas o gas. En el caso de ser generada por una fuente eléctrica, generalmente un filamento encapsulado en un tubo de cuarzo provee las ondas infrarrojas. Dependiendo del material del filamento, se puede variar la longitud de onda generada. Mientras que en caso de obtener la radiación por gas, el combustible es oxidado catalíticamente en paneles especiales para producir una reacción que emite radiación infrarroja.

Los sistemas IR son usualmente descritos como de alta, media o baja intensidad; esto se refiere al nivel de energía de la fuente. Existe una relación entre la longitud de onda, la frecuencia y el nivel de energía; la energía aumenta a medida que la longitud de onda decrece. En el proceso de pintado electrostático la longitud de onda media es la más

utilizada para el curado debido a que la energía es absorbida directamente por el recubrimiento.

Una de las limitaciones de esta tecnología es que viaja en línea recta, como una linterna iluminando un área; por este motivo, la configuración de los hornos debe asegurar que la pieza sea expuesta por todos lados.



Figura 2.9: Carrocería de un auto dentro de un horno de curado de lámparas eléctricas infrarrojas.

#### 2.4.2.1 Paneles infrarrojos (catalíticos)

Los paneles catalíticos emiten calor por medio de ondas infrarrojas y operan mediante la oxidación del gas en total ausencia de la llama. Se pueden utilizar para procesos de precalentamiento, curado y secado para una variedad amplia de sectores industriales.

##### Principio de operación

Un catalizador es una sustancia que acelera un proceso químico. La reacción se produce entre el gas de alimentación (combustible) que pasa al interior del panel y el oxígeno de la atmosfera circunstante (comburente). El contacto entre los dos elementos, a través del catalizador oportunamente precalentado, engendra una oxidación del gas con producción de energía de tipo exotérmica desarrollando calor bajo la forma de rayos infrarrojos.



Se aplica energía eléctrica al elemento que precalienta el panel catalizador. El sistema de distribución de combustible se encarga de hacer ingresar el combustible a través de un orificio adecuadamente aislado y de generar suficiente presión para asegurar una distribución uniforme en todo el panel catalítico. Finalmente el catalizador, a la temperatura de precalentamiento, convierte el combustible en energía infrarroja.

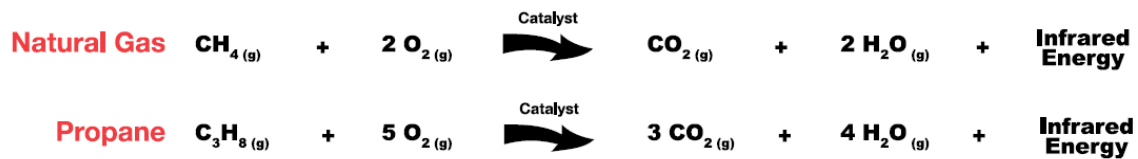


Figura 2.10: Reacción química que ocurre al interior del panel catalítico. (Cata-Dyne, 2017)



Figura 2.11: Paneles catalíticos infrarrojos instalados (izquierda). Elementos internos del panel catalítico (derecha).

### Ventajas del panel catalítico

De acuerdo a la información del fabricante Infragas, la tecnología catalítica presenta ventajas significativas:

- Oxidación sin llama

El catalizador activa la oxidación del combustible a una temperatura más baja que la de combustión, por lo que el proceso se produce en total ausencia de llama. Además, esto lo convierte en un proceso seguro, con posibilidad de aplicarse en atmósferas potencialmente explosivas.

- Tecnología eco-amigable

La oxidación catalítica de gas genera exclusivamente anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O), sin emisión de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) o hidrocarburos no combustos (HC). Además, los VOCs (Volatile Organic Compounds) y otros químicos contaminadores son descompuestos a nivel molecular, y transformados en vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>).

- Temperatura modulable

Posibilidad de graduar la temperatura de la superficie del catalizador y, por consiguiente, la longitud de onda de los rayos infrarrojos emitidos, actuando en la presión del gas de alimentación.”



## CAPÍTULO III. ANÁLISIS SITUACIONAL

Este capítulo desarrolla el problema a solucionar. Se define el problema, se listan las necesidades y se describe el proceso para llegar a la solución. En la segunda parte de este capítulo se presenta la situación de la línea de acabados en términos de ingeniería.

### 3.1 Análisis del problema

#### 3.1.1 Definición del problema

La empresa Matransa, dedicada a la fabricación de mobiliario para locales comerciales, busca implementar la tecnología de plaforización en su proceso de producción. Dicha implementación requiere el diseño de distintos sistemas, siendo uno de los más importantes el diseño del horno de curado.

#### 3.1.2 Objetivos

Objetivo principal: Diseñar un horno piloto de curado que cumpla con los requerimientos planteados al formular la línea de producción.

Objetivos específicos:

- Identificar los requerimientos del cliente
- Establecer una base teórica (investigar/dominar las tecnologías involucradas)
- Dimensionar los procesos de manera preliminar
- Seleccionar las tecnologías de acuerdo a los conocimientos adquiridos
- Realizar cálculos definitivos (cargas térmicas, potencias, flujos)
- Seleccionar equipos y configuración
- Elaborar recomendaciones y conclusiones

### 3.1.3 Listado de requerimientos

- Una línea que permita manufacturar productos de alta calidad, de estándares internacionales.
- Asegurar un proceso continuo/fluido de inicio a fin.
- Establecer/diseñar dos sistemas de trabajo con sus parámetros respectivos que funcionen en la misma línea de producción: superficies metálicas y MDF
- Asegurar la seguridad en todos los procesos (elementos de seguridad y control)
- Versatilidad: capacidad para tratar piezas y geometrías variadas
- Diseñar un proceso eficiente y eco-amigable.

### 3.1.4 Marco Metodológico

A continuación se describe el procedimiento planteado para llegar a la propuesta definitiva. Se plantean las tareas a desarrollar distinguiendo las tres fases de un proyecto.

#### 1. Planteamiento

- ✓ Se propone realizar una consulta bibliográfica extensa y elaborar una recopilación de toda la información relacionada y/o pertinente al proyecto, de modo que se logre estudiar las tecnologías involucradas y establecer una base teórica que permitirá desarrollar los criterios para decisiones posteriores.
- ✓ Concertar reuniones entre las partes del proyecto implicadas y expertos en el rubro.

#### 2. Desarrollo

- ✓ Una vez dominado el tema, se procede al dimensionamiento preliminar de procesos (Cálculos de cargas térmicas, longitudes, tiempos, etc), para tener una idea más concreta de la magnitud del proyecto. Esto permite también establecer comparaciones concluyentes.

- ✓ Se procede a la selección de las tecnologías adecuadas, de acuerdo a criterios como presupuesto, necesidades a cubrir, volumen de producción, eficiencia, limpieza, seguridad, etc.
- ✓ Se procede a desarrollar los cálculos definitivos, refinados con las decisiones tomadas.
- ✓ Se realiza la selección de equipos de acuerdo a los cálculos, tecnologías elegidas y a los proveedores disponibles.

### 3. Cierre

- ✓ Se define la propuesta definitiva.
- ✓ Se elaboran propuestas de mejora, recomendaciones y conclusiones.

## 3.2 Análisis Situacional

### 3.2.1 Descripción de los procesos que componen la línea

La línea piloto automatizada prevista consta de tres procesos diferenciados: Pre-tratamiento, aplicación o tratamiento, y curado o post-tratamiento.

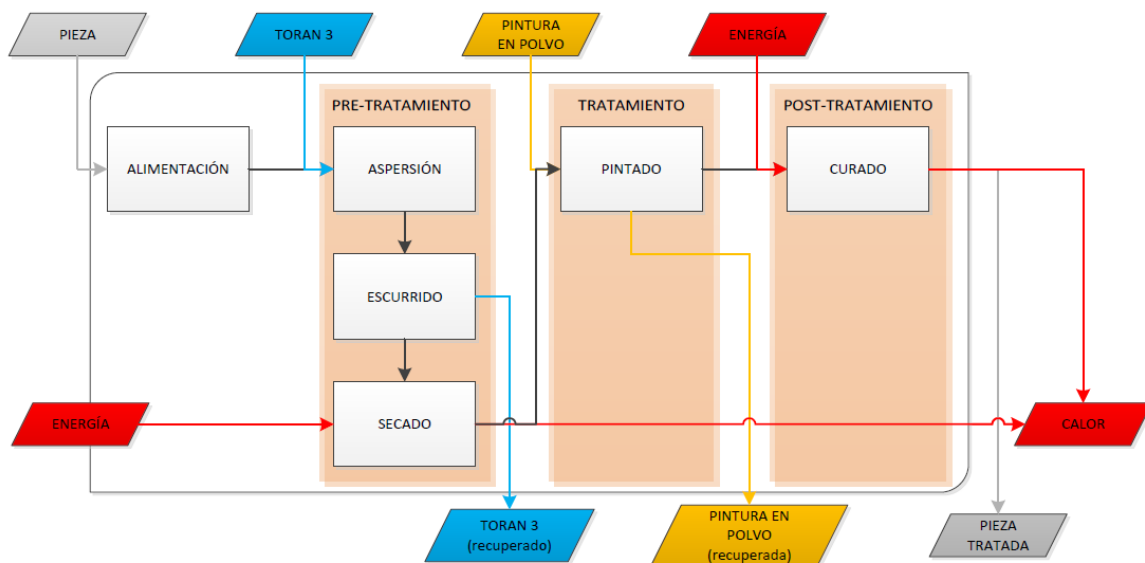


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la línea planteada.

## Alimentación

Previo a cualquier proceso, las piezas a tratar son colgadas en el transportador aéreo.

## Aspersión

La etapa con la que inicia el pre-tratamiento consiste en la aplicación del fluido de plaforización (TORAN 3). Para dicha aplicación se puede elegir entre dos métodos: aplicación por aspersión y aplicación por inmersión. La función de esta etapa es bañar la pieza a tratar de modo que se forme una película delgada adyacente al sustrato.

## Escurrido

La segunda etapa del proceso de pre-tratamiento consiste en dejar escurrir la pieza luego de la etapa de aplicación. Este proceso tiene como objetivo principal eliminar el exceso de fluido aplicado, y como objetivo secundario recuperar la máxima cantidad de fluido utilizado durante la aplicación.

## Secado

El secado es la etapa final del pre-tratamiento. El objetivo de esta etapa es entregar calor de modo que las reacciones químicas de enlazamiento entre el fluido de plaforización y el sustrato se activen. Para tal fin se puede optar por mecanismos de transferencia de calor por convección, radiación o ambos.

Las piezas ingresan a un horno a temperatura constante ( $\pm 3^\circ$ ), el mínimo porcentaje de fluido que no ha terminado de escurrir se volatiliza, y los componentes óleos son incorporados a la capa externa polimérica formada, culminando así la pasivación del metal.

Para el caso de tableros o elementos de MDF este proceso tiene como objetivo el precalentamiento para mejorar la adherencia de la pintura en polvo.

## Pintado

El pintado es un proceso de una sola etapa, que consiste en la aplicación de la pintura electrostática sobre la pieza a tratar. Simultáneamente, al interior de la cámara se recupera la pintura sobrante por medio de un ciclón de recuperación. Se puede distinguir

esencialmente entre dos métodos de aplicación: automático, mediante equipos controlados por sistemas computarizados, y manual, mediante operarios; no obstante, se pueden combinar los sistemas de acuerdo al nivel de automatización disponible para crear sistemas semi-automáticos.

## Curado

El proceso de curado es el último de la línea, y quizás el más sensible, ya que dicta la calidad final y define las propiedades mecánicas. De manera análoga al secado, este proceso consiste en suministrar el calor necesario a la pintura para activar las reacciones químicas de enlazamiento. Para suministrar calor se puede optar por mecanismos de convección, radiación, o sistemas combinados (revisar capítulo I).

El proceso inicia con el calentamiento de las piezas salidas del proceso de pintado hasta la temperatura de operación. Una vez alcanzada la temperatura de operación, las partículas de pintura adheridas a la superficie de la pieza se funden para formar una capa uniforme de pintura. El tiempo en este proceso depende de la pintura aplicada, el material a tratar y la tecnología elegida.

### 3.2.2 Descripción de la situación inicial de la planta

Basados en visitas presenciales a plantas foráneas del mismo rubro y recomendaciones de fabricantes y expertos en el área, se inició la construcción de los elementos físicos de la línea, hasta donde fue posible llegar sin la injerencia de ingeniería. De modo que, como situación inicial del proyecto, la planta cuenta con espacios físicos delimitados y algunos componentes adquiridos. Se cuenta con un túnel de aplicación construido para los procesos de pre-tratamiento y curado, un transportador aéreo, un tanque de fluido de pre-tratamiento, bombas y un ciclón de recirculación.

- Tanque de Fluido de pre-tratamiento

El tanque, así como todas las superficies en contacto con el fluido de pre-tratamiento, es de acero inoxidable y tiene una capacidad de 1.5 m<sup>3</sup>. Se encuentra bajo el nivel del suelo, aproximadamente al centro de la longitud del túnel de pre-tratamiento. Cuenta con un medidor de nivel de vasos comunicantes y se mantiene a temperatura



ambiente. Por recomendación el tanque se debe llenar con máximo 2/3 de su capacidad total.

- Bombas

La planta cuenta con dos bombas para circular el fluido de plaforización por la etapa de aspersión. Las bombas son de baja presión debido a que no se requiere alcanzar la atomización del producto, sino simplemente una “ducha” que bañe la pieza a tratar.

- Túnel de pre-tratamiento

El túnel de pre-tratamiento es un túnel de acero inoxidable de 15.44m de longitud y 1.48 m de ancho, sostenido por soportes formados por tubos cuadrados soldados al perímetro externo a intervalos regulares y anclados al piso. En los primeros cuatro metros, el túnel cuenta con 8 pares de costillas para la aplicación del TORAN por aspersión. Cada costilla cuenta con 13 orificios, lo que resulta en un total de 208 orificios de aspersión. El resto del túnel es destinado al escurrido del producto después de su aplicación, por lo que no hay ningún elemento adicional. El túnel cuenta con una pendiente negativa al inicio y una positiva al final, de modo que el punto más bajo queda aproximadamente al medio de la longitud. Esta configuración fue pensada para maximizar la recuperación de producto. Los detalles estructurales e información detallada sobre la geometría del túnel y del sistema de aspersión se encuentran en el Anexo I y II respectivamente.

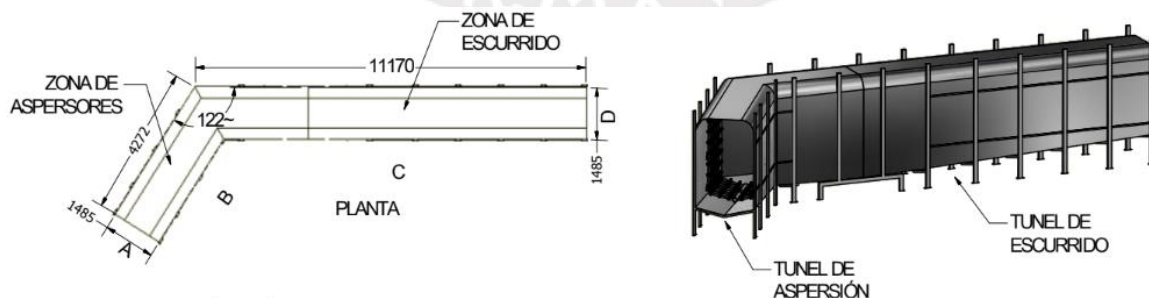


Figura 3.2: Vista de planta e isométrica del túnel de pre-tratamiento. (Matransa, 2018)

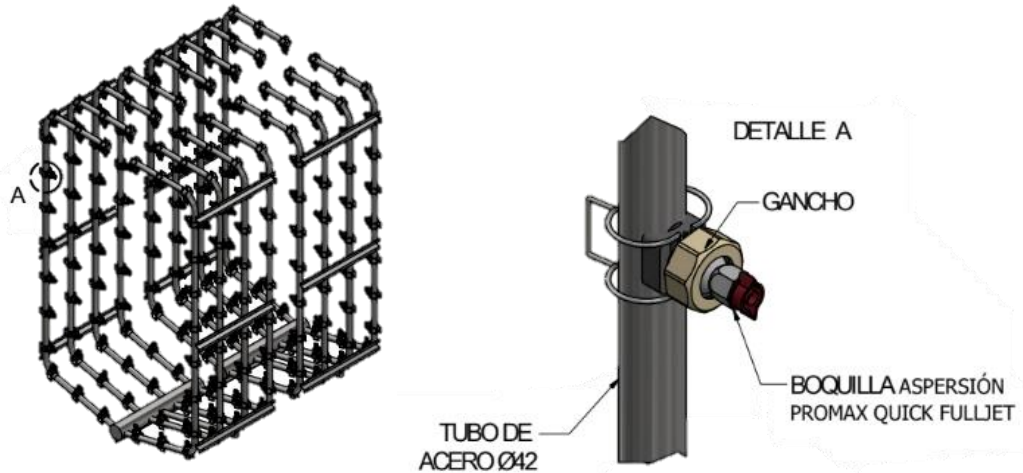


Figura 3.3: Isometría del sistema de aspersión y detalle de la boquilla. (Matransa, 2018)

- Túnel de post-tratamiento

El túnel destinado al curado tiene un revestimiento interior de plancha de acero de 1.2mm soportado por una estructura de tubos rectangulares. El túnel tiene 12.37m de longitud, 1.48m de ancho y 3.49m de altura. Los detalles estructurales e información detallada sobre la geometría del túnel se encuentran en el Anexo 4.

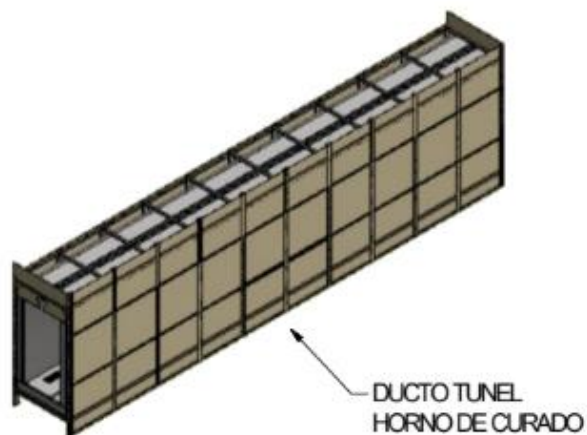


Figura 3.4: Isometría del túnel de post-tratamiento. (Matransa, 2018)

- Transportador aéreo

El transportador aéreo consta de colgadores formados por dos planchas metálicas de 1.8mm de espesor y rodajes en la parte superior para aportar movilidad. Los rodajes se desplazan por un riel formado por un tubo de acero galvanizado de 1 1/4 de pulgada de diámetro y 1.8mm de espesor. Todos los colgadores están unidos por una cadena y espaciados 30cm del consecutivo. Un motor conectado a una catarina, donde encajan los eslabones de la cadena, se encarga del movimiento. Es posible regular la velocidad de la línea de transporte con un variador de velocidad digital. El transportador aéreo está presente en toda la longitud de la línea. Los detalles estructurales e información detallada sobre la geometría del transportador se encuentran en el Anexo 5.

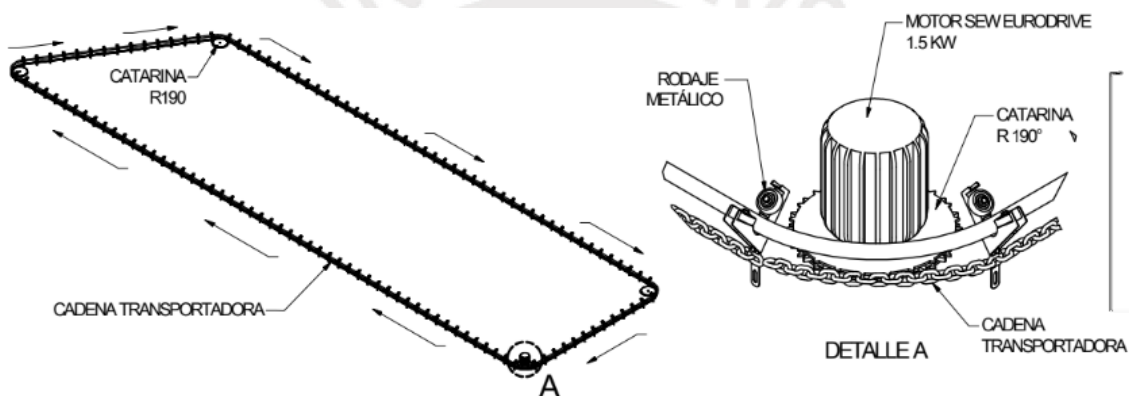


Figura 3.5: Isometría del transportador aéreo y detalle del sistema motriz. (Matransa, 2018)

- Grupo de filtrado

Se cuenta con un grupo de filtrado que filtra las partículas externas al fluido de pre-tratamiento (polvo e impurezas). El grupo consta de filtros de 25 micras colocados al reingreso del fluido al tanque luego de la recuperación. El filtro instalado es más fino del recomendado; se tomaron estas precauciones para asegurar la calidad de la etapa de aspersion.

- Ciclón de recuperación

Para este proyecto se adquirió un mono ciclón de recuperación para reducir tanto el impacto energético/ambiental como los costos del proceso de pintura en polvo. El ciclón absorbe el aire proveniente de la cámara de pintado luego de la aplicación de

las partículas de pintura. Al interior del ciclón, las partículas de polvo y el aire se mueven en sentido helicoidal, provocando la separación de las partículas de pintura por acción de la fuerza centrífuga. Las partículas de polvo son empujadas hacia las paredes internas del ciclón y recuperadas cuando descienden; mientras que el aire con las partículas más finas es extraído hacia un filtro y luego expulsado al exterior.

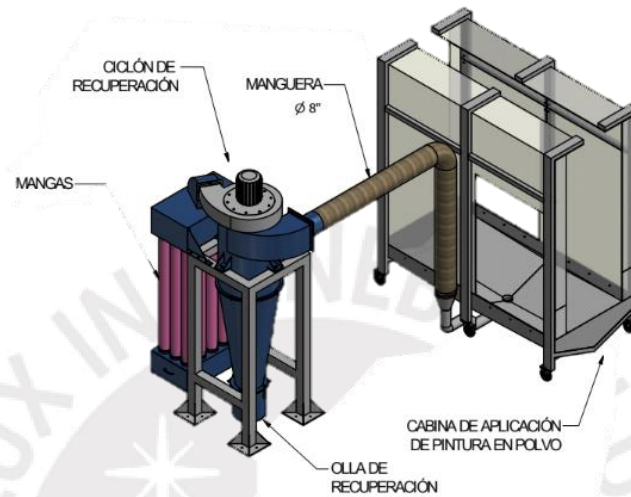


Figura 3.6: Isometría del ciclón de recuperación. (Matransa, 2018)



Figura 3.7: Ciclón de recuperación

# CAPÍTULO IV. DIMENSIONAMIENTO ENERGÉTICO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN

En este capítulo se determinarán las magnitudes presentes en la línea de producción de modo que sean parámetros de ingreso al cálculo energético.

## 4.1. Descripción de las piezas a tratar

La planta necesita responder al requerimiento de tratar satisfactoriamente piezas y geometrías variadas. Se dimensiona una pieza modelo (recurrente) como base para el diseño de las cargas.

Las piezas modelo serán bastidores formados por tubos cuadrados de acero de 1.8mm de espesor soldados entre sí. En la figura 4.1 se muestra un esquema de la geometría de la pieza con sus respectivas dimensiones. Cada pieza pesa en promedio 25kg. Cada pieza es colgada a una distancia de 1 metro respecto a la siguiente.

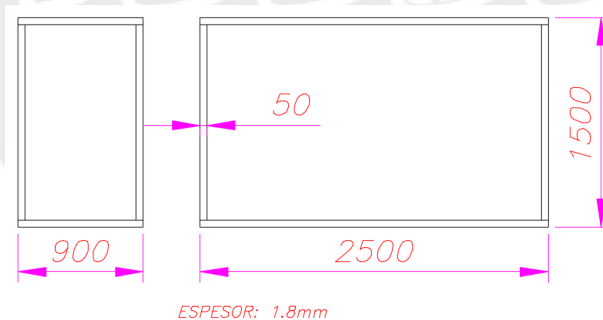


Figura 4.1: Dimensiones de la pieza metálica modelo (medidas en mm).

Magnitud	Valor	Unidad
Volumen	6910	$cm^3$
Área superficial	3.84	$m^2$

Tabla 1: Magnitudes de la pieza modelo



La empresa procesa, además, tableros de MDF que recubren el exterior de las estructuras metálicas. Se trabaja con tableros de mediana densidad conseguidos de distribuidores locales. En la figura 4.2 se dimensiona un tablero promedio.

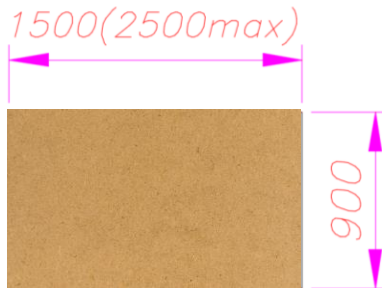


Figura 4.2: Dimensiones de un tablero de MDF promedio (unidades en mm).

Magnitud	Valor	Unidad
Volumen	67500	$cm^3$
Área superficial	1.35	$m^2$

Tabla 2: Magnitudes de un panel MDF promedio

## 4.2. Dimensionamiento preliminar de los procesos

En esta sección del capítulo se profundizará en la determinación de los parámetros necesarios para el funcionamiento de la línea de producción. Se describirán las situaciones presentadas y los procedimientos seguidos para la obtención de datos relevantes.

### 4.2.1. Parámetros de diseño para la línea de producción

Los parámetros descritos a continuación fueron obtenidos de la ficha técnica del producto de plaforización (TORAN 3) (Chemtec, 2015), bibliografía sobre el curado de pintura en polvo y recomendaciones de expertos.

#### 4.2.1.1. Proceso de Pre-tratamiento

## Aspersión

La etapa de plaforización inicia con la aplicación del fluido de tratamiento. La aplicación se realizará por medio del sistema de aspersión instalado en el túnel de aplicación descrito en el capítulo anterior.

### Parámetros de operación

Temperatura (°C)	Ambiente
Tiempo de tratamiento (s)	60 - 120
Presión de aspersión (bar)	0.2 - 0.3

Tabla 3: Parámetros de la etapa de aplicación. (Chemtec, 2015)

El rendimiento del producto es entre  $20 - 25 m^2$  de superficie metálica tratada por litro de fluido. Para el proceso de aplicación es importante operar con una presión de aspersión menor a 0.5 bar, la atomización del producto siempre debe ser evitada. (Chemtec, 2015)

## Ecurrido

La etapa de escurrido abarca desde el final de la etapa de aplicación, hasta el inicio de la etapa de secado. Se busca maximizar el tiempo de escurrido para recuperar la mayor cantidad de fluido posible.

### Parámetros de operación

Temperatura (°C)	Ambiente
Tiempo de tratamiento (min)	4 - 6

Tabla 4: Parámetros de la etapa de escurrido (Chemtec, 2015)

## Secado

El secado es la etapa final del proceso de pre-tratamiento. Esta etapa se inicia al finalizar la etapa de escurrido.

### Parámetros de operación

Temperatura (°C)	130 - 140
Tiempo de tratamiento (min)	5 - 8

Tabla 5: Parámetros de la etapa de secado (Chemtec, 2015)

#### 4.2.1.2. Proceso de Post-tratamiento

Las piezas salen de la cabina de pintado e ingresan a la etapa de curado donde se endurece y sella la capa de pintura. Los parámetros para esta etapa son los siguientes.

### Parámetros de operación

Temperatura (°C)	180 - 200
Tiempo de tratamiento (min). IR / Conv	1 -5 / 10-15

Tabla 6: Parámetros de la etapa de curado (Pintuco, 2017)

#### 4.2.2. Velocidad de transportador aéreo

Longitud total del túnel de pre-tratamiento ( $L_{tt}$ ): 15.44m

Tiempo total del proceso ( $T_t$ ): 15min (tiempo estimado de acuerdo a las recomendaciones del fabricante)

$$\text{Velocidad del transportador requerida: } V_{trans} = \frac{L_{tt}}{T_t} = \frac{15.44}{15} = 1.03m/min$$

Velocidad real elegida  $V_{trans} = 1 m/min$

La velocidad obtenida coincide con la velocidad ideal de 1m/min recomendada por fabricantes y expertos en el rubro.

### 4.2.3. Longitud por etapas

Longitud de la etapa de aplicación:  $L_A = V_{trans} * T_A = 1 * 2 = 2m$  , donde  $T_A$ :  
Tiempo de la etapa de aplicación.

Longitud de la etapa de escurrido:  $L_E = V_{trans} * T_E = 1 * 6 = 6m$ , donde  $T_E$ :  
Tiempo de la etapa de escurrido.

Longitud de la etapa de secado:  $L_S = V_{trans} * T_S = 1 * 7 = 7m$  , donde  $T_A$ : Tiempo  
de la etapa de secado.

Valores Obtenidos

Proceso	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Longitud (m)
Aspersión	Ambiente	1-2	4
Escurrido	Ambiente	4-8	6
Secado	130-140	5-10	7
Curado	180-200	10-15	12

Tabla 7: Tabla resumen de los parámetros para los procesos involucrados.

# CAPÍTULO V. DISEÑO DEL HORNO DE CURADO

## 5.1 Dimensionamiento del horno

El horno de curado será diseñado a partir de la configuración constructiva inicial de la línea de producción, adecuándose a los parámetros y exigencias del proyecto.

La etapa de curado debe ser diseñada de modo que, en la longitud del horno, las piezas pasen de la temperatura inicial de 15°C (ambiente asumida) a una de 180°C (Pintuco, 2017) y se mantengan el tiempo de tratamiento indicado.

Se optó por la configuración de horno pre-gel que combina tecnologías de radiación infrarroja y convección. Como está descrito en el capítulo dos, se coloca un anillo de paneles catalíticos infrarrojos delante del horno de convección con el fin de acelerar el proceso, reducir los tiempos y espacio utilizados. La combinación descrita aportará la versatilidad de curado requerida para curar piezas de configuración diversa. La configuración responde adicionalmente a criterios de presupuesto, ubicación, instalación, y otros criterios decisivos.

Se destina la labor de calentamiento enteramente a la parte radiante, donde el calor proporcionado calienta el metal hasta la temperatura de tratamiento; mientras que el tiempo de tratamiento recomendado para el curado de la pintura estará a cargo de la zona de convección, donde se suministra el calor necesario para que el horno se mantenga a una temperatura constante.

Se presentan los cálculos energéticos pertinentes a la etapa de curado y al diseño del horno.

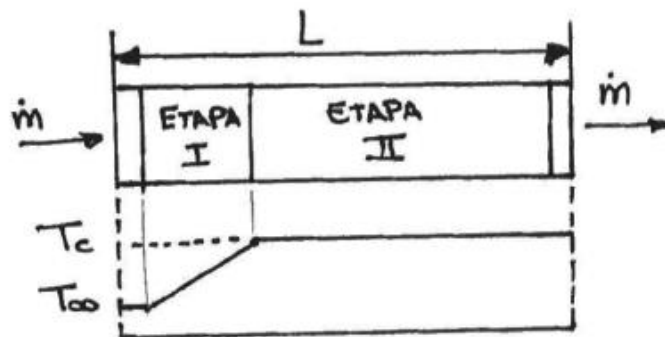


Figura 5.1: Gráfico temperatura de pieza vs longitud de horno.



### 5.1.1 Flujo másico de metal

Debido a que el flujo es continuo, para el cálculo del flujo másico se selecciona un volumen de control que contiene la pieza a tratar y una porción de cadena y colgador. Cada pieza será colgada con una separación de 1m de la siguiente.

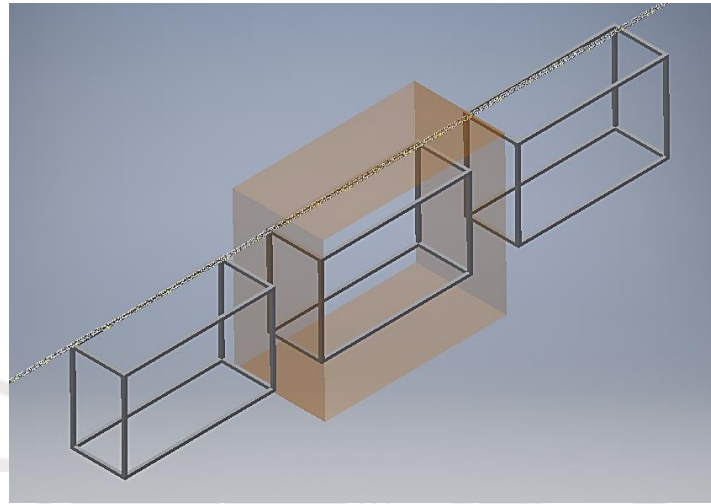


Figura 5.2: Volumen de control considerado para los cálculos energéticos (superficie naranja).

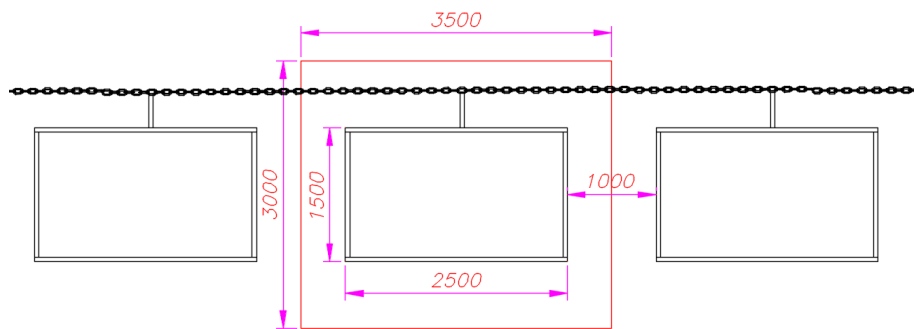


Figura 5.3: Esquema del Volumen de control considerado para los cálculos energéticos (medidas en milímetros).

$$v_{trans} = 1 \frac{m}{min}$$

$$t_{pieza} = 3.5m / 1 \frac{m}{min} = 3.5min \quad ; \text{cada pieza pasa cada } 3,5min$$

$$\dot{m}_{pieza} = 45 \text{ kg} / 3.5 \text{ min} = 12.9 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$\dot{m}_{trans} = 5 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \text{ (estimación)}$$

$$\dot{m}_{acero} = \dot{m}_{pieza} + \dot{m}_{trans} = 17.9 \frac{\text{kg}}{\text{min}} = 0.298 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### 5.1.2 Calor para calentar el acero del volumen de control

$$C_{p \text{ acero}} = 0.460 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}$$

$$T_{i \text{ pieza}} = 15^\circ\text{C} = 288 \text{ K} \text{ (Temperatura ambiente asumida)}$$

$$T_{f \text{ pieza}} = 180^\circ\text{C} = 453 \text{ K}$$

$$Q_{acero} = \dot{m}_{acero} * C_{p \text{ acero}} * \Delta T$$

$$Q_{acero} = 0.298 * 0.460 * (453 - 288) = 22.6 \text{ KW} \dots\dots\dots (1)$$

### 5.1.3 Cálculo del calor perdido en las fronteras

A continuación se calculan las pérdidas en las fronteras del horno de curado. Por motivos de seguridad, se apunta a una temperatura en la superficie exterior del horno de 30°C.

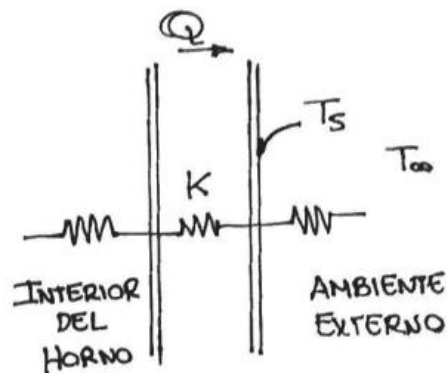


Figura 5.4: Esquema de la transferencia de calor en las paredes del horno.

$$T_s = 45\text{ }^\circ\text{C} = 318\text{K}$$

$$T_\infty = 15\text{ }^\circ\text{C} = 288\text{K}$$

$$L_{hc} = 8\text{m}; H_{hc} = 2\text{m}; B_{hc} = 1.5\text{m}$$

$$A_{lat} = (L_{hc} * H_{hc}) = 16\text{ m}^2$$

$$A_{sup} = (L_{hc} * B_{hc}) = 12\text{m}^2$$

$$h_{ext} = 10.7 \frac{\text{W m}^2}{\text{K}} \text{ (Anexo 9)}$$

$$\dot{Q}_{pfh} = h_{ext} * 2 * (A_{lat} + A_{sup}) * (T_s - T_{amb}) = 18\text{kW} \dots\dots\dots(2)$$

Dónde:

$\dot{Q}_{pfh}$ : Calor perdido en las fronteras del horno de curado ( $\frac{J}{s}$ )

$A_{lat}$ : Área de la cara lateral del horno de curado ( $\text{m}^2$ )

$L_{hc}$ : Longitud del horno de curado (m)

$H_{hc}$ : Altura del horno de curado (m)

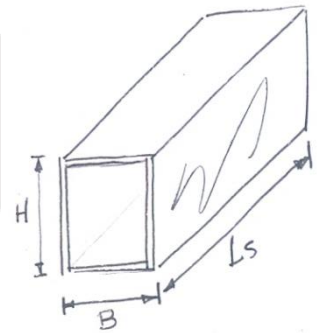
$A_{sup}$ : Área de la cara  $\frac{\text{superior}}{\text{inferior}}$  del horno de curado ( $\text{m}^2$ )

$B_{hc}$ : Ancho del horno de curado (m)

$h_{ext}$ : Coeficiente de convección externo ( $\frac{\text{W m}^2}{\text{K}}$ )

$T_s$ : Temperatura de la superficie exterior del horno (K)

$T_\infty$ : Temperatura ambiente (K)



#### 5.1.4 Cálculo precalentamiento

Previo al funcionamiento, el horno necesita precalentarse. Esto implica el calentamiento del aire interno inicial y las paredes internas del horno a la temperatura de tratamiento (180°C / 453K).

#### 5.1.4.1 Calor para calentar el aire interno inicial

$$Q_{aire} = m_{aire} * C_{p\ aire} * (T_f - T_i)$$

$$T_f = 180\ ^\circ\text{C} = 453\text{K}$$

$$T_i = 15\ ^\circ\text{C} = 288\text{K}$$

$$m_{aire} = V_{interno} * \rho_{aire}$$

$$\rho_{aire@288\text{K}} = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ [Anexo 10]}$$

$$V_{interno} = 8 * 2 * 1.5 = 24\ \text{m}^3$$

$$C_{p\ aire@288\text{K}} = 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \text{ [Anexo 10]}$$

$$\dot{m}_{aire} = 24 * 1.225 = 29.4\ \text{kg}$$

$$Q_{aire} = 29.4 * 1.007 * (453 - 288) = 4.88\ \text{KJ} \dots\dots\dots (3)$$

Dónde:

$Q_{aire}$ : Calor para calentar el aire interno inicial ( $\frac{\text{J}}{\text{s}}$ )

$T_f$ : Temperatura del aire final al interior del horno (K)

$T_i$ : Temperatura de aire inicial (temp. ambiente)(K)

$V_{interno}$ : Volumen interno del horno ( $\text{m}^3$ )

$\rho_{aire@288\text{K}}$ : Densidad del aire a 288°K ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

$C_p$ : Calor específico del aire a 288°K ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ )

$\dot{m}_{aire}$ : Masa del aire contenido en el volumen del horno ( $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ )

#### 5.1.4.2 Calor para calentar las paredes internas del horno

En esta sección se calcula el calor necesario para que el acero que conforma las paredes internas del horno llegue a la temperatura de operación.

$$Q_{cpi} = m_{ac\ int} * C_{p\ acero} * (T_f - T_i)$$

$$e_{pl} = 1.2mm \text{ (espesor de las planchas instaladas)}$$

$$A_{lat} = 16m^2 ; A_{sup} = 12m^2$$

$$m_{ac\ int} = V_{pl\ int} * \rho_{acero}$$

$$\rho_{acero} = 7850 \frac{kg}{m^3}$$

$$V_{pl\ int} = e_{pl} * 2(A_{lat} + A_{sup}) = 0.0672 m^3$$

$$m_{ac\ int} = 527.5kg$$

$$Q_{cpi} = 527.5 * 0.460 * (453 - 288) = 40 KJ..... (4)$$

Dónde:

$Q_{cpi}$ : Calor de calentamiento de las paredes internas del horno ( $\frac{J}{s}$ )

$m_{ac\ int}$ : Masa de acero interno ( $\frac{kg}{s}$ )

$C_{p\ acero}$ : Calor específico del acero ( $\frac{kJ}{kg K}$ )

$T_f$ : Temperatura final del acero de la parte interna del horno (K)

$T_i$ : Temperatura inicial del acero de la parte interna del horno (K)

$V_{pl\ int}$ : Volumen ocupado por las planchas de acero ( $m^3$ )

$\rho_{acero}$ : Densidad del acero ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$e_{pl}$ : Espesor de la plancha de acero que recubre las paredes internas del horno (m)

$A_{lat}$ : Área de la cara lateral del horno de curado ( $m^2$ )

$A_{sup}$ : Área de la cara superior/ inferior del horno de curado ( $m^2$ )

$$Q_{precal} = Q_{cpi} + Q_{aire} = 44.9 KJ.....(5)$$



### 5.1.5 Valores Obtenidos

Calor para calentar el acero del VC	22.6	kJ/s
Calor perdido en las fronteras del horno	18	kJ/s
Calor para precalentar el horno	44.9	kJ

Tabla 8: Tabla resumen etapa de curado.

El horno necesita suministrar 22.6kW para calentar hasta 180°C la pieza modelo. Durante la etapa de tratamiento, el horno solo necesita suministrar el calor para compensar las pérdidas (18kW) en las fronteras, pues tanto el aire interno como la pieza están a la temperatura deseada.

### 5.1.6 Selección de la potencia del horno

En total se necesitaría (idealmente) un horno de 40.6kW, el precalentamiento se efectúa en vacío. Afectado por un factor que incluye la seguridad, la geometría y densidad variable de las piezas, la eficiencia de los materiales y la pérdida de eficiencia del conjunto en el tiempo, que se define como 2 (considerado de acuerdo a la proyección de carga asumida) tanto para la carga de calentamiento como para la carga de compensación de pérdidas se tiene que:

$$P_{horno} = 2 * (Q_{cal} + Q_{pfh}) = 81.2kW \dots\dots\dots(6)$$

Adicionalmente a los criterios de cálculo antes mencionados, se debe diseñar de modo que el tiempo de calentamiento se encuentre dentro de un rango realista y aceptable para los fines operativos. Se llegó a un consenso en cuanto al tiempo de precalentamiento: 2h aprox.

### 5.1.7 Cálculo del espesor de aislante

Para el cálculo del espesor de aislante en las paredes del horno se considera que la temperatura externa no debe superar los 45°C por temas de seguridad y confort hacia los trabajadores. Para el cálculo se utiliza el método de resistencias térmicas.

$$q_{i-e} = \frac{T_i - T_e}{R_{total}}$$

$$R_{total} = \sum_{i-e} R_i = \frac{1}{h_{int}A} + \frac{e_1}{k_1A} + \frac{e_2}{k_2A} + \frac{e_3}{k_3A} + \frac{1}{h_{ext}A}$$

Dónde:

$h_{int}$ : Coeficiente de convección forzada en el interior del horno ( $\frac{W}{m^2K}$ )

$h_{ext}$ : Coeficiente de convección forzada en el exterior del horno ( $\frac{W}{m^2K}$ )

$A$ : Área de transferencia de calor ( $m^2$ )

$e_1$ : Espesor de la plancha interna de acero (m)

$e_2$ : Espesor del aislante (m)

$e_3$ : Espesor de la plancha externa de acero (m)

$k_{1,2,3}$ : Conductividad térmica de pl. interna, aislante y pl. externa respectivamente ( $\frac{W}{mK}$ )

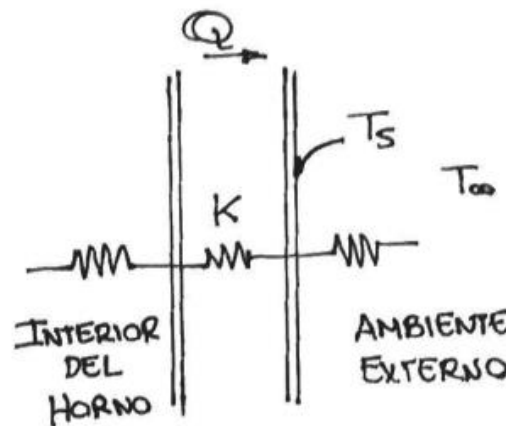


Figura 5.5: Esquema de la transferencia de calor en las paredes del horno.

$$e_1 = 3mm$$

$$e_3 = 7mm$$

$$T_i = 180\text{ }^\circ\text{C} = 453K$$

$$T_s = 45\text{ }^\circ\text{C} = 318K$$

$$T_\infty = 15\text{ }^\circ\text{C} = 288K$$

$$A_{lat} = 16 \text{ m}^2$$

$$A_{sup} = 12 \text{ m}^2$$

$$h_{ext} = 10.7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \text{ [Anexo 9]}$$

$$k_{1,3} = 16.3 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m K}} \right] \text{ (Conductividad térmica del acero)}$$

$$k_2 = 0.032 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m K}} \right] - 0.044 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m K}} \right] \text{ (lana de vidrio)}$$

$$q_{p.lat} = h_{ext} * A_{lat} * (T_s - T_{\infty})$$

$$q_{p.lat} = 5136 \text{ W}$$

$$q_{p.sup} = h_{ext} * A_{sup} * (T_s - T_{\infty})$$

$$q_{p.sup} = 3852 \text{ W}$$

Se reconoce al área superior/inferior como crítica.

$$R_{total} = \frac{T_i - T_{\infty}}{q_{p.lat}} = 0.042835$$

$$R_{total} = \frac{e_1}{k_1 A_{lat}} + \frac{e_2}{k_2 A} + \frac{e_3}{k_3 A} + \frac{1}{h_{ext} A} \dots\dots\dots(7)$$

$$e_2 = 26.0 \text{ mm}$$

Se realiza el cálculo con los valores de lana de vidrio como aislante modelo.

Luego del cálculo y de la búsqueda de proveedores comerciales, se decidió utilizar el aislamiento industrial SCR de la empresa Owens Corning de un espesor de 2 pulg. (Anexo 11)

$$e_{real} = 2" = 50.8 \text{ mm}$$

### 5.1.8 Dimensionamiento del sistema de radiación

El sistema de radiación infrarroja es el encargado de suministrar calor para calentar la pieza. Se debe escoger el número de paneles para lograr dicha tarea.

Para el diseño del sistema de radiación se afecta la potencia de radiación por un factor que cubra las circunstancias ya mencionadas en la sección anterior, y se toma como potencia de diseño:

$$P_{rad} = 2 * Q_{cal} = 45.2kW$$

De acuerdo a la accesibilidad/disponibilidad y las dimensiones del horno se selecciona el panel INFRACAT 16.51. Los datos técnicos con los que se van a realizar los cálculos se encuentran en el anexo 12.

#### 5.1.8.1 Determinación del número de paneles

$$P_{panel} = 10.5 - 6.3kW$$

$$A_{panel} = 0.535 m^2$$

$$\frac{P}{A} = 19.6 - 11.8 \frac{kW}{m^2}; \quad \text{Potencia por unidad de área}$$

Área de paneles necesaria

$$A_{necesaria} = \frac{P_{diseño}}{P/A} = \frac{45.2}{11.8} = 3.83 m^2; \quad \text{Se necesitan } 3.83m^2 \text{ de paneles para suministrar la potencia necesaria.}$$

Número de paneles necesarios

$$\#_{panel} = \frac{A_{necesaria}}{A_{panel}} = 7.16 = 8; \quad \text{Se requieren 8 paneles para cubrir la potencia}$$

### 5.1.8.2 Configuración y potencia

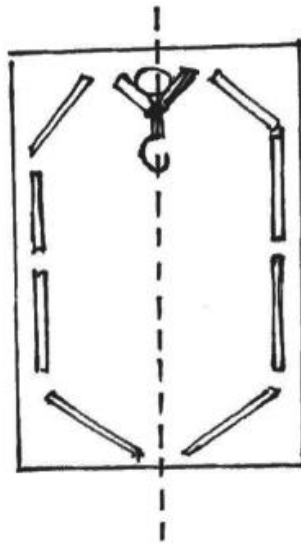


Figura 5.6: Sección del tramo de radiación, posición de los paneles radiantes.

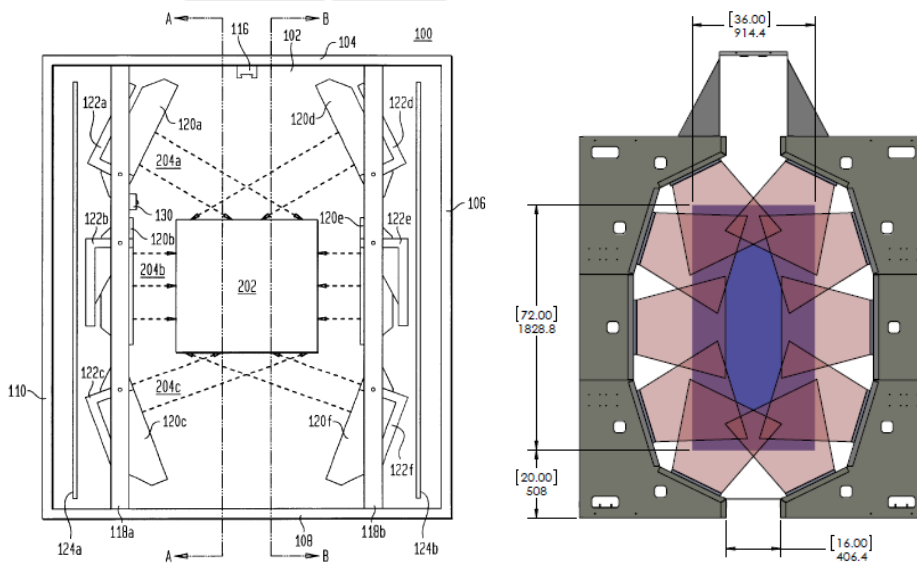


Figura 5.7: Configuración utilizada en hornos comerciales. (Matransa, 2018)

$$P_{sistema} = 8 * (10.5 - 6.3) = (84 - 50.4)kW (286620 - 171972 \text{ btu/hr}) \dots\dots(8)$$



### 5.1.9 Dimensionamiento del sistema de convección

A continuación se presentan los cálculos para el dimensionamiento del sistema de convección. Se plantea alimentar al horno mediante un generador de gases calientes consistente en un quemador y una cámara de mezcla. Dicho generador entregará aire caliente a 250°C dentro del horno, y será el encargado de proporcionar el calor necesario para mantener el horno a la temperatura de curado (180°C).

El generador de gases consiste en una cámara de combustión, acoplada al quemador, y una cámara de mezcla. En la cámara de combustión se produce la combustión con 20% más de aire estequiométrico para asegurar una buena combustión y la inocuidad de los productos. En la cámara de mezcla se mezcla el aire de recirculación proveniente de la salida del horno con los gases generados en la cámara de combustión.

$$P_{diseño} = 40kW (\approx 2 * Q_{pfh})$$

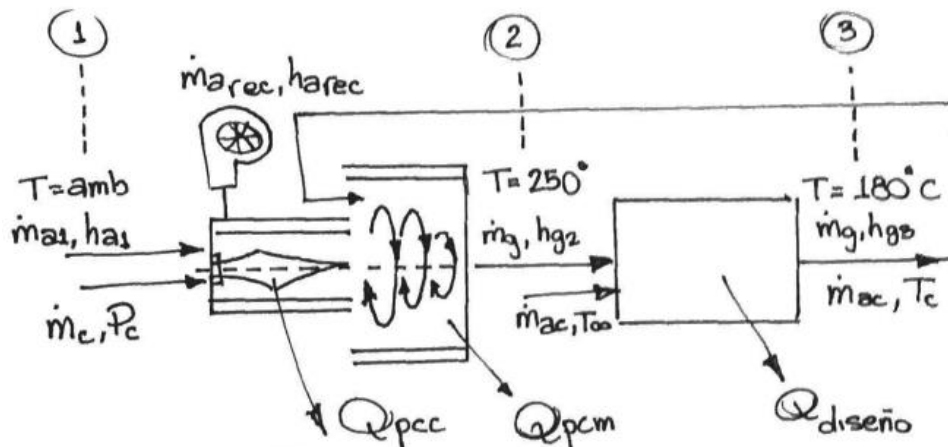


Figura 5.8: Diagrama termodinámico del sistema de convección, generador de gases + horno de convección.

#### 5.1.9.1 Cálculo del flujo másico de gases requerido – análisis termodinámico

$$\dot{m}_g h_{g2} - Q_{diseño} = \dot{m}_g h_{g3} \dots\dots\dots(9)$$

$$T_2 = 250^\circ C = 523K$$

$$T_{rec} = 180^{\circ}\text{C} = 453\text{K}$$

$$h_{g2} = 526.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (aire a } T_2)\text{[Anexo 10]}$$

$$h_{g3} = 454.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ (aire a } T_3)\text{ [Anexo 10]}$$

Dónde:

$Q_{diseño}$ : Calor entregado por el sistema de convección para compensar las pérdidas ( $\frac{\text{J}}{\text{s}}$ )

$\dot{m}_g$ : Masa de gases calientes (kg)

$h_{g2}$ : Entalpía de los gases en el punto 2: Salida del generador/ entrada horno ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )

$h_{g3}$ : Entalpía de los gases en el punto 3: Salida del horno ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )

$T_2$ : Temperatura de los gases en el punto 2 (K)

$T_3$ : Temperatura de los gases a la salida del horno (K)

$$\dot{m}_g = \frac{Q_{diseño}}{h_{g2} - h_{g3}} = 0.557 \text{ Kg/}$$

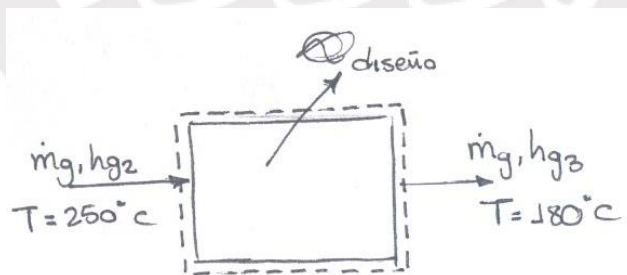


Figura 5.9: Diagrama termodinámico del horno de convección.

5.1.9.2 Determinación de la relación aire/combustible para obtener gases a 250°C – Balance térmico (análisis del quemador)

En esta sección se busca calcular la relación enunciada utilizando la primera ley de la termodinámica

$$\dot{m}_{at} C_p \Delta T = \dot{m}_c P_c \dots\dots\dots(10)$$

$$C_{p \text{ aire@453K}} = 1.017 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$P_{c \text{ propano}} = 46350 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_{ing} = 180^\circ\text{C} = 453\text{K}$$

$$T_{sal} = 250^\circ\text{C} = 523\text{K}$$

Dónde:

$\dot{m}_{at}$ : Masa de aire total ( $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ )

$\dot{m}_c$ : Masa de combustible ( $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ )

$C_p$ : Calor específico del aire ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ )

$P_c$ : Poder calorífico del propano ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )

$T_{sal}$ : Temperatura de los gases a la salida del quemador (K)

$T_{ing}$ : Temperatura de los gases a la entrada del quemador (K)

$$\frac{\dot{m}_{at}}{\dot{m}_c} = \frac{P_{c \text{ propano}}}{C_{p \text{ aire}} (T_{sal} - T_{ing})} = 651.1$$

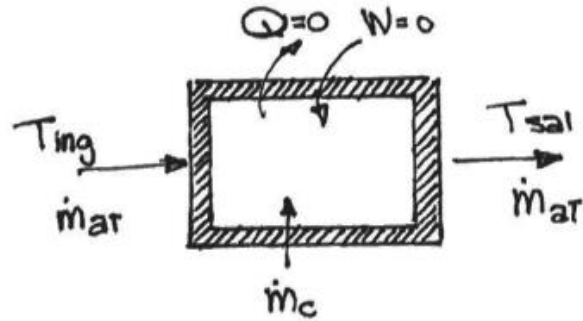


Figura 5.10: Diagrama termodinámico del generador de gases.

### 5.1.9.3 Determinación del flujo másico de combustible – Análisis termodinámico del quemador

En esta sección se realiza un balance termodinámico utilizando como volumen de control al quemador para encontrar una relación que permita, con los datos previamente obtenidos, calcular el flujo másico de combustible necesario para la operación. Se estima que las pérdidas no sobrepasan el 10% de la energía obtenida.

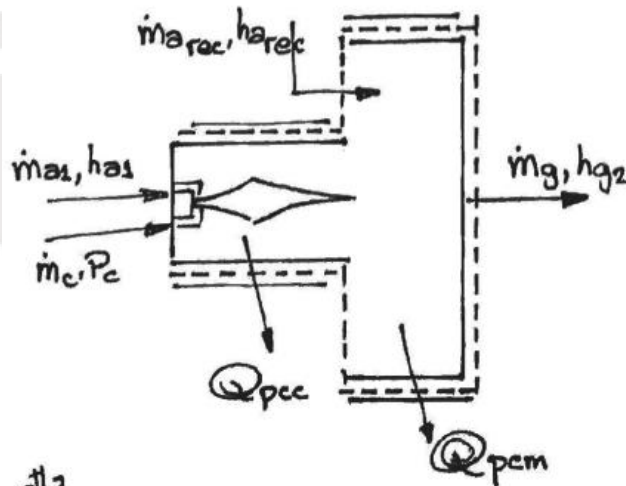


Figura 5.11: Diagrama termodinámico del quemador.

$$\dot{m}_c P_c + \dot{m}_{a1} h_{a1} + \dot{m}_{ar} h_{rec} - (Q_{pcc} + Q_{pcm}) - \dot{m}_g h_{g2} = 0 \dots\dots\dots(11)$$

$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{rec} = \dot{m}_{at} \dots\dots\dots(12)$$

$$h_{a1} = h_{rec} = h_{at} \dots\dots\dots(13)$$

$$|Q_{pcc}| + |Q_{pcm}| = 0.1\dot{m}_c P_c \dots\dots\dots(14)$$

(12), (13) y (14) en (11)

$$0.9\dot{m}_c P_c + \dot{m}_{at} h_{at} = \dot{m}_g h_{g2} \dots\dots\dots(15)$$

$$\dot{m}_{at} = r_{a/c} \dot{m}_c \dots\dots\dots (16)$$

(16) en (15)

$$0.9\dot{m}_c P_c + r_{a/c} \dot{m}_c h_{at} = \dot{m}_g h_{g2} \dots\dots\dots(17)$$

Dónde:

$\dot{m}_{a1}$ : Masa de aire para la combustión ( $\frac{kg}{s}$ )

$\dot{m}_c$ : Masa de combustible ( $\frac{kg}{s}$ )

$\dot{m}_g$ : Masa de gases ( $\frac{kg}{s}$ )

$\dot{m}_{rec}$ : Masa de aire de recirculación ( $\frac{kg}{s}$ )

$h_{a1}$ : Entalpía del aire para la combustión (temperatura ambiente) ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$h_{rec}$ : Entalpía del aire de recirculación (180°C) ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$h_{g2}$ : Entalpía en el punto 2: Salida del generador/entrada horno ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$P_c$ : Poder calorífico del propano ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$Q_{cc}$ : Calor perdido en la cámara de combustión ( $\frac{kJ}{s}$ )

$Q_{cm}$ : Calor perdido en la cámara de mezcla ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$r_{a/c}$ : Relación aire combustible

$$\dot{m}_g = 0.557 \frac{kg}{s}$$

$$h_{g2} = 526.7 \frac{kJ}{kg}$$

$$P_{c\text{propano}} = 46350 \frac{kJ}{kg}$$

$$r_{a/c} = 651.1 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$$

$$h_{rec} = 454.9 \frac{kJ}{kg} (180^\circ C)$$

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_g h_{g2}}{0.9P_c + r_{a/c} h_{rec}} = 8.682 * 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

#### 5.1.9.4 Cálculo de los flujos másicos de aire

$$r_{\frac{a}{c} 120\%} = 18.7 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$$

Relación aire combustible para una combustión con un exceso del 20% de aire estequiométrico

$$\dot{m}_{at} = r_{a/c} \dot{m}_c = 0.565 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{a1} = r_{\frac{a}{c} 120\%} \dot{m}_c = 0.0162 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{rec} = \dot{m}_{at} - \dot{m}_{a1} = 0.549 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{at} + \dot{m}_c = 0.566 \frac{kg}{s}$$

#### 5.1.9.5 Potencia y selección del quemador

$$P_q = \dot{m}_c P_c = 40.2 \text{ kW} (137 \text{ 304 btu/hr})$$

Tomando en cuenta la disponibilidad del equipo, las potencias involucradas y los tiempos de preparación previstos, se elige un quemador MERCURY BURNER modelo GB-08-G-89F [Anexo 13]. Se eligió un quemador modulante para adecuarse a la versatilidad requerida.



## MERCURY BURNER



Figura 5.12: Quemador seleccionado. (Anexo 13)

### 5.1.9.6 Dimensionamiento del generador de gases

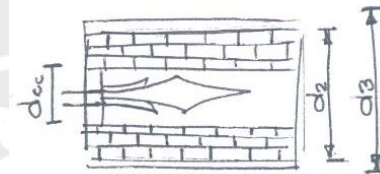
Se plantea dimensionar el generador de gases siguiendo las recomendaciones del diseño de cámaras de combustión de baja temperatura y de diseño de ciclones para la cámara de mezcla. Este cálculo sirve como un primer acercamiento para el diseño final. Para este dimensionamiento se tomó como referencia el ítem 2, de la bibliografía.

$$I_c = 3238 - 3890 \frac{kW}{m^3} \quad (\text{Ascencio Tiza, 2007})$$

$$d_{cc} = 0.184m \quad \text{Diámetro del quemador [Anexo 13]}$$

$$V_{cc} = \frac{P_q}{I_c} = 0.0124 m^3$$

$$V_{cc} = \frac{\pi}{4} d_{cc}^2 L_{cc} \rightarrow L_{cc} = 0.466m$$



Dónde:

$I_c$ : Intensidad de combustión ( $\frac{kW}{m^3}$ )

$d_{cc}$ : Diámetro de la cámara de combustión (m)

$V_{cc}$ : Volumen de la cámara de combustión ( $m^3$ )

$L_{cc}$ : Longitud de la cámara de combustión (m)

## Cálculo de la velocidad de los gases en el combustor

$$v = 5.32 \frac{m^3}{kg}$$

$$\dot{m}_{gc} = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_c = 0.017 \frac{kg}{s}$$

$$A_{comb} = \frac{\pi}{4} d_{cc}^2 = 0.027 m^2$$

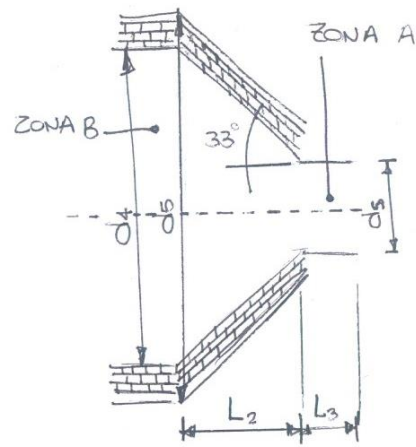
$$V_{comb} = \frac{\dot{m}_t v}{A_{comb}} = 3.43 \frac{m}{s}$$

### Diseño de la sección anular (Zona B)

$$\rho_{180} = 0.7788 \frac{kg}{m^3} \text{ (Anexo 10)}$$

$$q_{asa} = \frac{\dot{m}_{a2}}{\rho_{180}} = 0.705 \frac{m^3}{s}$$

$$A_{sa} = \frac{q_{asa}}{V_{comb}} = 0.206 m^2$$



Dónde:

$v$ :  $\frac{1}{\rho}$  del aire luego de la combustión (temperatura de llama adiabática)  $(\frac{m^3}{kg})$

$\dot{m}_{gc}$ : Masa de gases de combustión (kg)

$A_{comb}$ : Área transversal de la sección cámara de combustión ( $m^2$ )

$V_{comb}$ : Velocidad de los gases de combustión  $(\frac{m}{s})$

$\rho_{180}$ : Densidad del aire a 180°C  $(\frac{kg}{m^3})$

$q_{asa}$ : Caudal de gases que pasan por el área transversal de la sección anular  $(\frac{m^3}{s})$

$A_{asa}$ : Área transversal de la sección anular ( $m^2$ )

$$d_1 = d_{cc} = 0.184 m$$

Diámetro del quemador

$$d_2 = 0.387 m$$

d1 + 4" de refractario

$$d_3 = 0.4m$$

d2 + ¼" de plancha de acero

$$A_{sa} = \frac{\pi}{4}(d_4 - d_3)^2 \rightarrow d_4 = 0.649m$$

$$d_5 = 0.865m$$

d4 + 4" de refractario + ¼" de plancha de acero

### Zona A

$$V_s = 10 m/s$$

Velocidad elegida para la circulación de gases el interior de ductos

$$A_{ss} = \frac{q_{asa}}{V_s} = 0.07$$

$$W_{ss} = \sqrt{A_{ss}} = 0.27m$$

$$L_3 = 0.3m$$

Longitud asumida para uniformizar el flujo

Dónde:

$V_s$ : Velocidad de salida de los gases de la cámara de mezcla ( $\frac{m}{s}$ )

$A_{ss}$ : Área de la sección transversal de la salida de la cámara de mezcla ( $m^2$ )

$W_{ss}$ : Lado de la sección de salida (sección cuadrada) (m)

$L_3$ : Longitud de la sección de salida (m)

### Zona B

$$2y = d_4 - d_s \rightarrow y = 0.192m$$

$$\tan(33^\circ) = \frac{y}{L_2} \rightarrow L_2 = 0.296m \text{ (Ascencio, 2007)}$$

### Sección de reingreso

$$q_t = \frac{m_g}{\rho_{180}} = 0.727m^3/s$$

$$v_{en} = 13m/s$$

Velocidad mayor a los gases de la cámara, elegida para favorecer la mezcla

$$A_{en} = \frac{q_t}{v_{en}} = 0.056m^2$$

$$W_{en} = \sqrt{A_{en}} = 0.236m$$

Dónde:

$q_t$ : Caudal total de gases que circulan en el sistema ( $\frac{m^3}{s}$ )

$v_{en}$ : Velocidad de reingreso ( $\frac{m}{s}$ )

$A_{en}$ : Área de la sección de reingreso ( $m^2$ )

$W_{en}$ : Lado de la sección de reingreso (sección cuadrada) (m)

#### 5.1.9.7 Dimensionamiento del sistema de circulación de gases calientes

Se diseña el sistema de circulación de modo que asegure un correcto flujo dentro del horno. Se optó por trabajar con bajas velocidades de circulación dentro del horno (1m/s), ya que acelerar el caudal en circulación a velocidades mayores requeriría un gasto de potencia enorme.

Se opta por una configuración de ductos rectangulares debido a la simplicidad constructiva frente a secciones circulares. El diseño del múltiple de admisión responde a secciones cuadradas, mientras que el escape fue diseñado respondiendo a las limitaciones de altura y accesibilidad. La velocidad de circulación de los gases dentro de los ductos será de 11m/s de acuerdo a recomendaciones de Ashrae. (Ashrae, 2013)

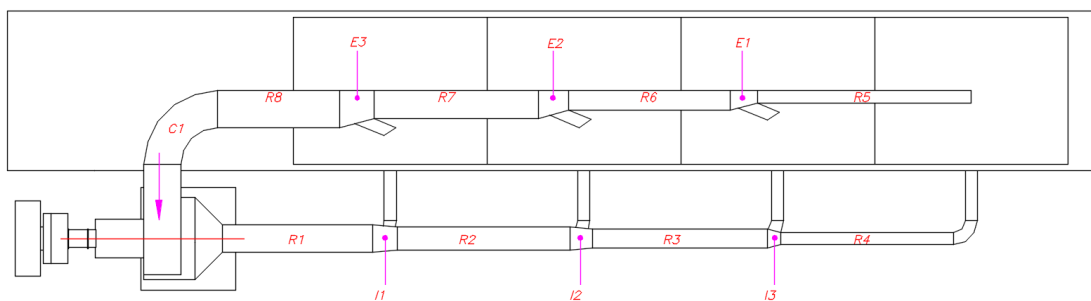


Figura 5.13: Sistema de circulación de gases calientes, leyenda de los componentes a dimensionar.

### 5.1.9.7.1 Intake (múltiple de admisión)

$$\dot{m}_g = 0.566 \frac{kg}{s}$$

$$\rho_{250} = 0.675 \frac{kg}{m^3}$$

$$q_{int} = \frac{\dot{m}_g}{\rho_{250}} = 0.839 \frac{m^3}{s}$$

Dónde:

$\dot{m}_g$ : Masa de los gases calientes ( $\frac{kg}{s}$ )

$\rho_{250}$ : Densidad del aire a 250°C (saliendo del quemador) ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$q_{int}$ : Caudal que pasa por el intake manifold ( $\frac{m^3}{s}$ )

Diámetro de los agujeros del Plenum de admisión

$$q_i = \frac{q_{int}}{4} = 0.21 \frac{m^3}{s}$$

$$v_i = 1m/s$$

$$A_i = \frac{q_i}{v_i} = 0.21m^2$$

$$A_{sup} = 2m * 1m = 2m^2$$

$$\frac{A_i}{A_{sup}} * 100\% = 10.49\%$$

$$A_i = \frac{45\pi}{4} d_i^2 \rightarrow d_i = 0.077m$$

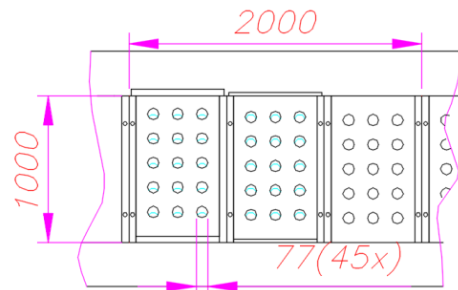


Figura 5.14: Vista superior del plenum de admisión ("piso" del horno)

Dónde:

$q_i$ : Caudal que pasa por cada plenum (4 secciones) ( $\frac{m^3}{s}$ )

$v_i$ : Velocidad a la que circulan los gases a través de los agujeros ( $\frac{m}{s}$ )

$A_i$ : Área ocupada por los agujeros (agujereada) ( $m^2$ )

$A_{sup}$ : Área de la superficie del plenum de admisión ( $m^2$ )

$d_i$ : Diámetro de agujero ( $m$ )

Dimensiones ductos

Ejemplo de cálculo Ramal 1 (R1)

$$q_{r1} = q_{int}$$

$$v_{r1} = 11m/s$$

$$A_{r1} = \frac{q_{r1}}{v_{r1}} = 0.076m^2$$

$$W_{r1} = \sqrt{A_{r1}} = 0.276m$$

Dónde:

$q_{r1}$ : Caudal que pasa por el ramal 1

$v_{r1}$ : Velocidad a la que circulan los gases dentro del ramal 1

$A_{r1}$ : Área transversal del ramal 1

$W_{r1}$ : Lado del ramal 1 (sección cuadrada)

		R1	R2	R3	R4
Caudal contenido	m3/s	$q_{int}$	$\frac{3}{4} q_{int}$	$\frac{1}{2} q_{int}$	$\frac{1}{4} q_{int}$
Velocidad del fluido	m/s	11	11	11	11
Área de la sección transversal	m2	0.076	0.057	0.038	0.019
Dimensiones ducto	mm	276x276	239x239	195x195	138x138

Tabla 9: Dimensiones de los ductos del múltiple de admisión.

#### 5.1.9.7.2 Exhaust (múltiple de escape)

$$\dot{m}_g = 0.566 \frac{kg}{s}$$

$$\rho_{180} = 0.7788 \frac{kg}{m^3}$$



$$q_{exh} = \frac{\dot{m}_g}{\rho_{180}} = 0.727 \frac{m^3}{s}$$

Dónde:

$\dot{m}_g$ : Masa de los gases calientes

$\rho_{180}$ : Densidad del aire a 180°C (interior del horno)

$q_{exh}$ : Caudal que pasa por el exhaust manifold

### Dimensiones ductos

		R8	R7	R6	R5
Caudal contenido	m <sup>3</sup> /s	$q_{exh}$	$\frac{3}{4} q_{exh}$	$\frac{1}{2} q_{exh}$	$\frac{1}{4} q_{exh}$
Velocidad del fluido	m/s	11	11	11	11
Área de la sección transversal	m <sup>2</sup>	0.066	0.05	0.033	0.017
Dimensiones ducto	mm	200x330	200x250	182x182	130x130

Tabla 10: Dimensiones de los ductos del múltiple de escape.

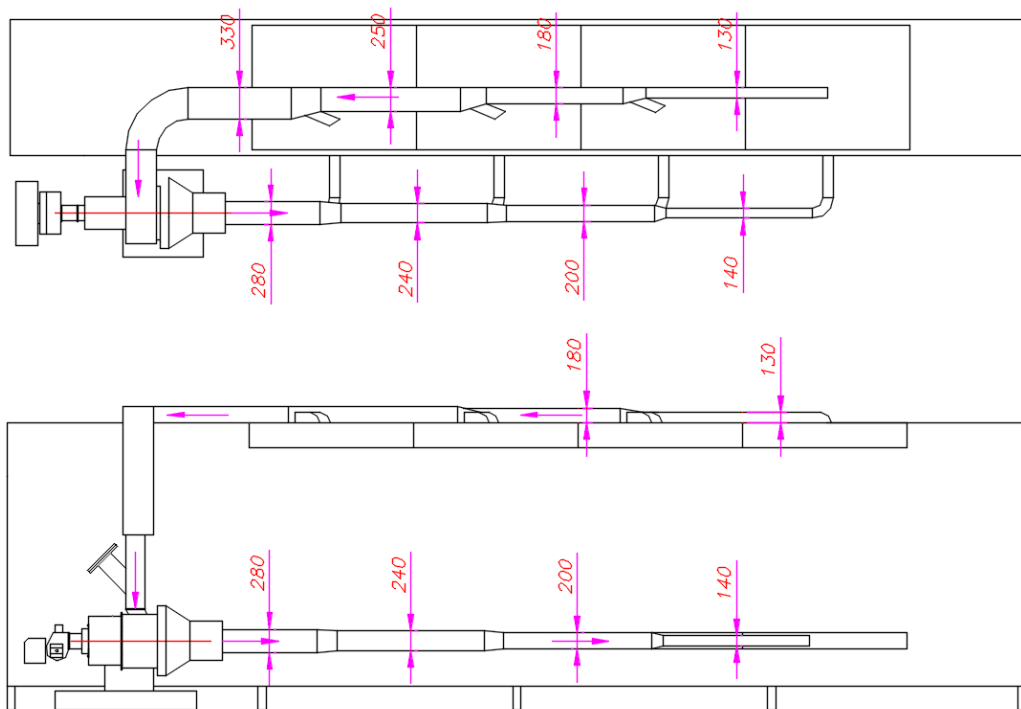


Figura 5.15: Plano del sistema de circulación.

### 5.1.9.8 Cálculo de la potencia del ventilador

Se procede a calcular la potencia necesaria del ventilador para hacer circular el aire caliente dentro del horno. El ventilador debe ser lo suficientemente potente para mover el flujo másico de aire caliente por los ductos a la velocidad determinada (10-11m/s), superando todas las pérdidas existentes.

Se calculan las pérdidas más importantes a continuación. El método de cálculo y los factores necesarios son tomados del capítulo 32 del Ashrae Handbook (diseño de ductos). (Ashrae, 2013)

#### Pérdida de presión en el generador de gases

Para este cálculo se toma como referencia el cálculo de modelo de ciclones utilizado en el ítem 2 de la bibliografía.

Debido a que la geometría del generador de gases calientes es similar a la geometría de un ciclón, procederemos al cálculo de la caída de presión mediante el método propuesto en el artículo "Diseño óptimo de ciclones" (Ref. Echeverri Lodoño, Carlos Alberto, año 2006, pág 124-139).

$$\Delta P_{gg} = \frac{1}{2} \rho V_i^2 N_H \dots \dots \dots (18)$$

$\Delta P_{gg}$  = Caída de presión en el generador de gases (Pa)

$\rho_{180}$  = Densidad del gas a 250°C = 0,6746 kg/m<sup>3</sup>

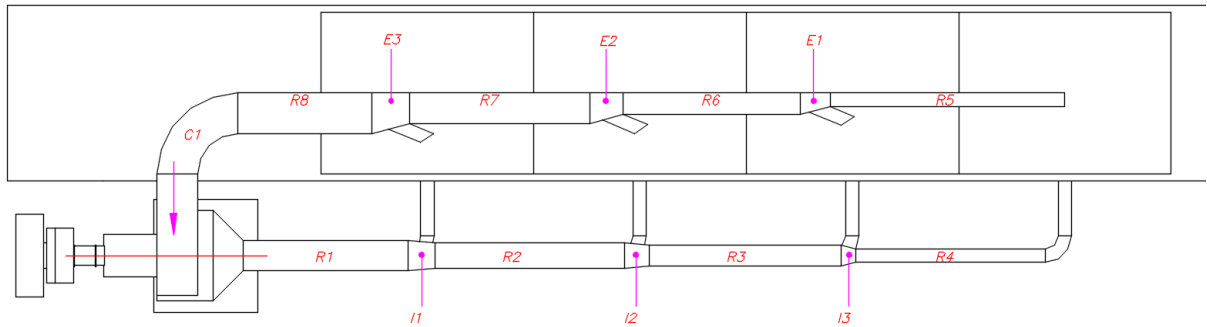
$V_i$  = Velocidad de entrada del gas al generador de gases =  $\frac{q}{A_i}$  = 13.8 m/s

El número de cabezas de velocidad de un ciclón se puede hallar con la siguiente ecuación

$$N_H = K_{CI} \left( \frac{W_i^2}{D_s^2} \right) = 4.37 \quad \text{Kci=Constante, toma el valor de 16 para entrada tangencial}$$

$$\Delta P_{gg} = 324.1 Pa$$

## Pérdida de presión en las bifurcaciones de los múltiples



$$\Delta P_{bif} = C_o \rho \left( \frac{W}{1097} \right)^2 ; \rho \text{ en } \frac{lb}{pie}, W \text{ en pies/min}$$

Intake	Item	Co	Exhaust	Item	Co
	I1	0.35		E1	0.48
I2	0.35	E2	0.27		
I3	0.52	E3	0.05		

Tabla 11: Tabla resumen de factores Co para cada bifurcación.

$$\Delta P_{bif} = 0.32 \text{ pulg. column } H_2O = 79.7 Pa$$

## Pérdida de presión en los Dampers

Se colocan Dampers como sistema de control para uniformizar el flujo y la temperatura dentro del horno. El sistema en total cuenta con nueve: 4 en cada entrada al plenum inferior, 4 en cada salida del plenum superior, y uno a la entrada de aire exterior.

Para el cálculo se asume la situación crítica en la que todos los dampers están al máximo de su apertura 30°; se calculan los coeficientes con este valor.

$$\Delta P_{damp} = C_o \rho \left( \frac{W}{1097} \right)^2 ; \rho \text{ en } \frac{lb}{pie}, W \text{ en pies/min}$$

Todos los Co son 3.3

$$\rho_{180} = 0.7788 \frac{kg}{m^3} = 0.0486 \frac{lb}{pie^3}$$

$$W = 11 \frac{m}{s} = 2165.4 \frac{pie}{min}$$

$$\Delta P_{damp-exh} = 5 C_o \rho \left( \frac{W}{1097} \right)^2 = 3.12 \text{ pulg. column } H_2O = 777.12 Pa$$

$$\Delta P_{damp-int} = 2.5 \text{ pulg. column } H_2O = 622.7 Pa$$

### Selección de ventiladores

Los ventiladores deben tener la suficiente potencia para proporcionar el flujo requerido y compensar la caída presión total (accesorios, ductos, etc.)

Para la selección se convino introducir un factor de corrección de 1.5 debido a otros efectos no cuantificables como las pérdidas de presión en los codos, reductores y amplificadores.

De modo que, con fines de obtener un flujo operativo uniforme se disponen dos ventiladores: uno antes del generador de gases, con la función de propulsar los gases calientes a la cámara; y uno después, con la función de extraer los gases calientes del horno para sus recirculación.

### Exhaust ventilador

$$\Delta P_{tot-exh} = \left( \frac{\Delta P_{gg}}{2} + \frac{\Delta P_{bif}}{2} + \Delta P_{damp-exh} \right) = 977.5 Pa$$

$$q_{tot} = 0.727 \frac{m^3}{s}$$

$$\eta = 0.6$$

$$P_{vent} = \frac{1.5 * q_t * \Delta P_{tot-exh}}{\eta} \approx 1780 W$$

Dónde:

$\Delta P_{tot-exh}$ : Potencia total requerida para superar las pérdidas en el exhaust manifold

$q_{tot}$ : Caudal total de gases que circula por el exhaust manifold

$P_{vent}$ : Potencia del ventilador

Intake ventilador

$$\Delta P_{tot-int} = \frac{\Delta P_{gg}}{2} + \frac{\Delta P_{bif}}{2} + \Delta P_{damp-int} = 823.6 Pa$$

$$q_{tot} = 0.727 \frac{m^3}{s}$$

$$\eta = 0.6$$

$$P_{vent} = \frac{1.5 * q_t * \Delta P_{tot-int}}{\eta} \approx 1500 W$$

Dónde:

$\Delta P_{tot-int}$ : Potencia total requerida para superar las pérdidas en el intake manifold

$q_{tot}$ : Caudal total de gases que circula por el intake manifold

$P_{vent}$ : Potencia del ventilador

Se requiere, por lo tanto, dos ventiladores centrífugos: Uno de 1.5kW al ingreso del horno, y uno de 1.78kW al reingreso.

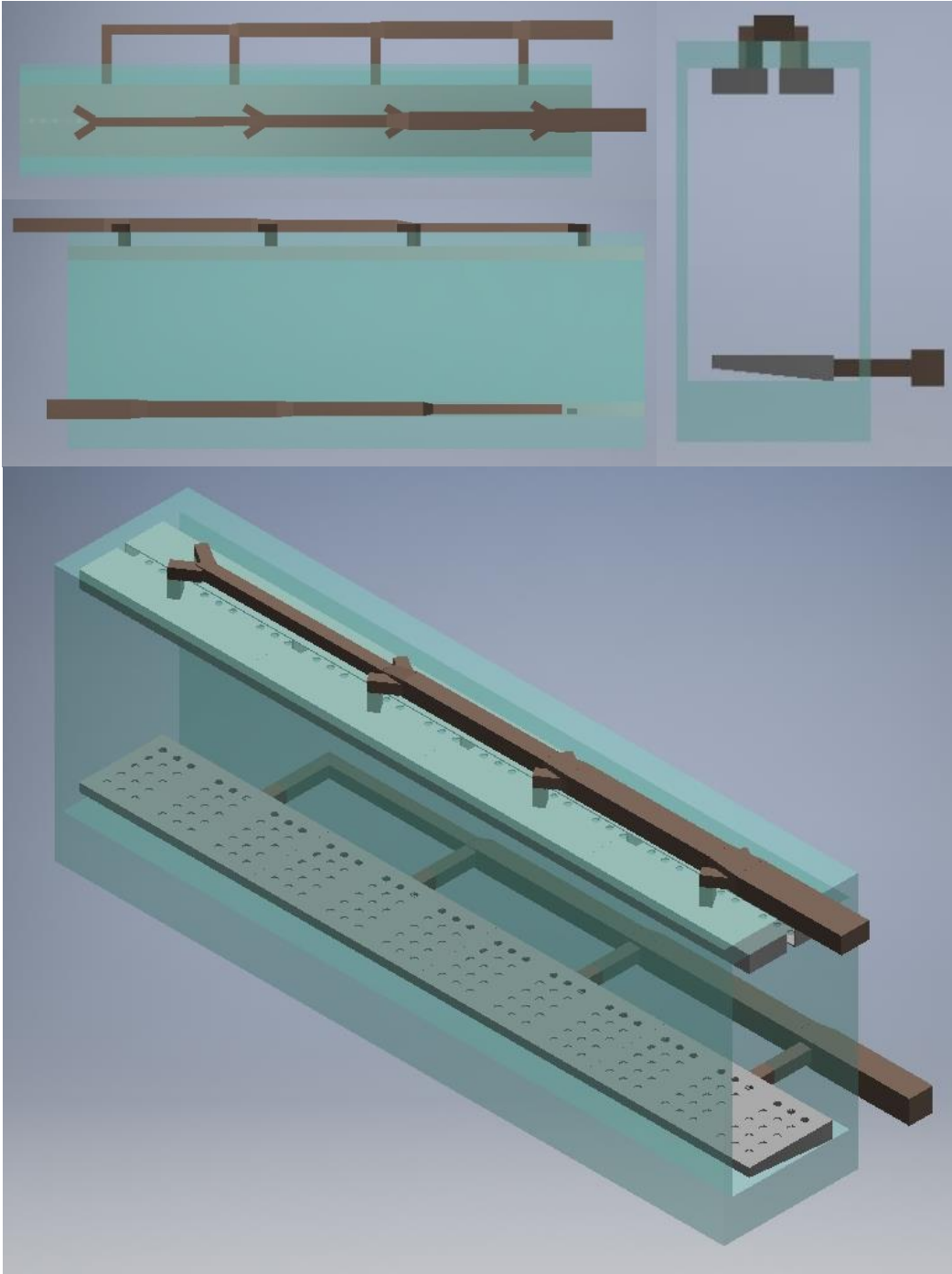


Figura 5.16: Modelo del horno de curado dimensionado.



## CAP VI. CONFIGURACIÓN DEFINITIVA

En este capítulo se define la propuesta definitiva. Los resultados obtenidos en el capítulo anterior son interpretados de tal forma que permitan definir una propuesta capaz de cumplir los requerimientos del proyecto.

### 6.1 Propuesta

Los cálculos preliminares ofrecieron un acercamiento y representan un punto de partida para la evaluación y toma de decisiones. Permitieron comparar tecnologías, analizar las ventajas y desventajas de los sistemas previstos, estimar tamaños y potencias de hornos, velocidades aproximadas y otros parámetros importantes para la posterior compra de equipos.

Se plantea el uso de la tecnología de plaforización para el proceso de pre-tratamiento, luego un proceso de pintado con pintura en polvo, y finalmente un proceso de curado utilizando una combinación de radiación infrarroja y convección.

Se optó por un horno combinado, con la primera etapa compuesta por un horno de radiación infrarroja (IR) y la segunda compuesta por un horno de convección forzada. Esto responde al ahorro de tiempo y espacio y a la necesidad de que la línea trate elementos con geometrías complejas. Los equipos definidos fueron comprados e implementados según se describe en los esquemas y fotografías mostradas en el presente capítulo.

Se definen dos secuencias de procesamiento:

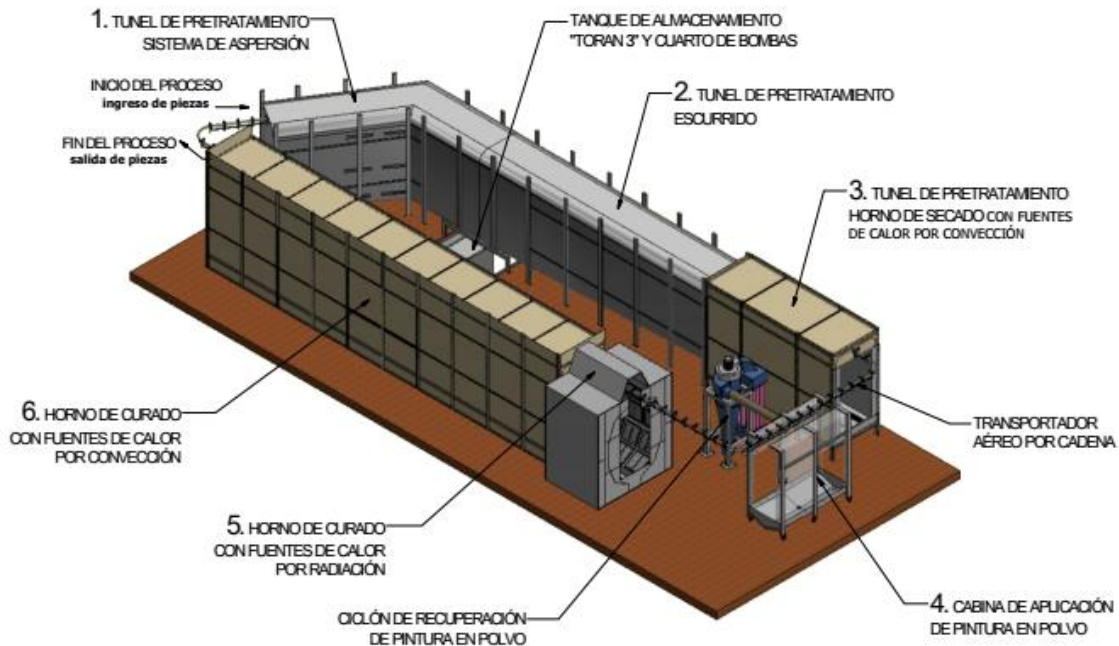


Figura 6.1: Propuesta definitiva para la línea de acabados. (Matransa, 2018)

### 6.1.1 Secuencia de procesamiento Acero

1. Las piezas a tratar son colgadas en los colgadores del transportador aéreo e inician su proceso de acabado ingresando al túnel por la zona de pre-tratamiento, en donde son bañadas por el fluido de plaporización mediante aspersión.
2. Luego las piezas continúan por un proceso de escurrido.
3. A continuación ingresan al horno de secado.
4. La segunda parte del proceso consiste en la aplicación de la pintura electrostática. Las piezas tratadas ingresan a la cámara de pintado donde un operario aplica la pintura manualmente. El proceso es continuo.
5. Una vez terminado el pintado, la pieza ingresa a la tercera parte del proceso de acabado: el curado. Las piezas ingresan al túnel de curado y se encuentran con la combinación de IR & convección.
6. Finalmente, Las piezas son removidas de la línea de producción al finalizar el proceso. Dichas piezas son ahora funcionales pues han adquirido las características mecánicas que un buen proceso de acabado otorga.

### 6.1.2 Secuencia de procesamiento MDF

7. Las piezas a tratar son colgadas en los colgadores del transportador aéreo e inician su proceso de acabado ingresando al túnel por la zona de pre-tratamiento directamente al horno de secado.
8. Dentro del horno las piezas son sometidas a un precalentamiento para favorecer las propiedades magnéticas del material.
9. Paso seguido, ingresan al proceso de aplicación de la pintura electrostática. Las piezas tratadas ingresan a la cámara de pintado donde un operario aplica la pintura manualmente. El proceso es continuo.
10. A continuación las piezas ingresan al horno de curado, donde solamente la parte radiante estará encendida. Esta será la encargada del curado respectivo.
11. Finalmente, Las piezas son removidas de la línea de producción al finalizar el proceso. Dichas piezas son ahora funcionales pues han adquirido las características mecánicas que un buen proceso de acabado otorga.

### 6.2 Horno de curado: Configuración y construcción

Una vez obtenidas las cargas térmicas, se esbozó un diseño para el horno de curado. Luego de evaluar las configuraciones existentes, se tomó la decisión de implementar la configuración de horno pre-gel, es decir, una zona de calentamiento por radiación infrarroja al inicio, y una zona de convección forzada para el resto de la longitud. Esta configuración tiene como objetivo el calentamiento acelerado de las piezas por medio de una mayor entrega de energía en la zona radiante. Como resultado, se ahorra tiempo y espacio.

Siguiendo los criterios de versatilidad inherentes a la naturaleza del proyecto (horno piloto) se planteó un diseño flexible. Se tomó como referencia la patente US1888573 [Anexo 17] para el diseño de la estructura y la determinación del sentido de flujo de gases calientes, tomando en cuenta las necesidades particulares.

Debido a que la altura del establecimiento es limitada, se colocó la entrada de gases calientes (intake) de forma lateral. Dicho cambio afecta el flujo natural de los gases; se

tomaron en cuenta todas las restricciones y complicaciones al momento de calcular las pérdidas, de modo que el diseño fuera completamente funcional.

### 6.2.1. Versatilidad

De modo que el horno está preparado no solo para tratar con éxito piezas tanto de metal como de MDF, sino que la variación de los parámetros le permite tratar variedades y configuraciones de piezas ya materiales diversos.

Parámetros de control:

Generador de gases (modulante)

- Masa de aire ( $m_1, m_2$ ). Su característica modulante permite el control del ingreso de aire para el ajuste de la temperatura y flujo másico de gases calientes.
- Inyección de combustible ( $m_c$ ). Permite regular la potencia de salida.



Figura 6.2: Generador de gases calientes.

## Horno – Sección radiación

- Soportes de paneles ajustables. Configuración envolvente, configuración plana o personalizada.
- Control de flujo de combustible mediante las válvulas de la línea de alimentación para regular la temperatura y energía entregada.
- Control de presión de combustible mediante los equipos de la línea de alimentación para regular la temperatura y energía entregada. Los elementos de control fueron seleccionados de acuerdo a la potencia y al caudal. Fueron comprados al mismo fabricante que los paneles para garantizar el óptimo funcionamiento.



Figura 6.3: Vista transversal. Detalle de la disposición de los paneles a la entrada del horno.





Figura 6.4: Entrada del horno en vista transversal: Configuración de paneles 2.



Figura 6.5: Elementos constituyentes del control para la alimentación de gas.



## Horno – Sección convección

La función principal de los elementos en esta sección es alcanzar un flujo uniforme a lo largo de toda la longitud del horno.

- Dampers. Colocados en los múltiples de admisión y escape, permiten la regulación del flujo de gases calientes.
- Paneles deslizantes. Control del flujo de aire caliente dentro del horno.



Figura 6.6: Detalle plenum superior (intake manifold).



Figura 6.7: Sistema de circulación de gases calientes (generador de gases + ventiladores)

# RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

## Recomendaciones y observaciones

- Para el diseño de líneas piloto, se recomienda realizar un diseño lo más abierto a la personalización posible. Las situaciones a presentarse no pueden ser predichas en su totalidad, por lo que se necesita poder controlar los parámetros a voluntad.
- El consenso general respecto a los parámetros óptimos de funcionamiento, es que nada reemplaza la experimentación. Se recomienda utilizar los rangos como una referencia, luego ajustar los parámetros de acuerdo a los resultados de la experiencia empírica para obtener los mejores resultados.
- Para el correcto curado de estas pinturas es muy importante mantenerse dentro de los rangos establecidos puesto que un sobre-curado de las mismas puede traer consecuencias negativas como cambio de color, disminución de brillo, manchas y disminución de propiedades mecánicas.
- Se recomienda el uso de lámparas catalíticas para procesos donde un requerimiento del producto final sea la apariencia estética.
- Se recomienda darle la debida atención a la instalación de gas, parte muchas veces olvidada y subestimada; sin embargo fundamental para el funcionamiento del horno. De no contar con los conocimientos adecuados, destinar la instalación a un experto debido a los riesgos que implica.
- Por motivos de seguridad, una vez instalado el sistema de circulación, lo mejor es hacer pruebas en frío para ajustar los parámetros físicos que controlan el flujo (dampers, agujeros de manifolds de entrada/salida). La regulación debe ser tal que no permita una contrapresión hacia el quemador. Se recomienda implementar un switch de presión para apagar el sistema cuando la presión sobrepase el límite de seguridad.

- Si la productividad generada con esta renovación tecnológica resulta mayor a la demanda interna de la empresa, prestar servicios a terceros sería una opción bastante atractiva.
- Se determinó necesario sacrificar porcentajes del rendimiento en favor de la facilidad de fabricación, como por ejemplo implementar tubos de sección rectangular en lugar de ductos de sección circular.

## Conclusiones

- Se concluye, luego de las pruebas de adherencia (Anexo 18), que los resultados del túnel piloto son satisfactorios. Se cumple con los requerimientos descritos en la lista, la línea tiene la capacidad de aceptar y tratar satisfactoriamente todo tipo de piezas de metal y MDF, teniendo como única restricción que la pieza cumpla con los límites dimensionales operativos.
- El sistema que mejor se acomoda a las necesidades de la empresa es la combinación de horno infrarrojo de paneles catalíticos + horno de convección. La alta densidad de energía entregada por superficie de panel se traduce en ahorro en tiempos y espacio.
- Hay que prestar especial atención a las pruebas/puesta a punto para llegar a las condiciones de operación deseada. Asimismo, es importante tomar como referencia el cálculo teórico y dejar un margen para los factores que afectan el resultado en la práctica y no han sido considerados, o requieren mecanismos de cálculo más complejo.
- Se concluye que la pintura es un aspecto fundamental del proceso, ya que dicta los parámetros y está directamente ligada a la calidad final del acabado. Para el proyecto se tuvo en consideración el tipo de pintura a utilizar y se adecuó el diseño del horno a la misma, de modo que se cumplan sus requerimientos técnicos.

## Lista de Anexos

Anexo 1: CATÁLOGO CATA-DYNE: Explosion-Proof Gas Catalytic Heaters

Anexo 2: DUCTO DE PRETRATAMIENTO CON SISTEMA DE ASPERSIÓN

Anexo 3: DETALLE ESTRUCTURA SISTEMA DE ASPERSIÓN

Anexo 4: DUCTO TÚNEL HORNO DE CURADO

Anexo 5: SISTEMA DE TRANSPORTE AÉREO POR CADENA

Anexo 6: CABINA DE APLICACIÓN DE PINTURA EN POLVO

Anexo 7: TORAN 3. SAFETY DATA SHEET

Anexo 8: TORAN 3. TECHNICAL DATA SHEET CHEMTEC

Anexo 9: Cálculo del Hext

Anexo 10: TABLA DE PROPIEDADES DEL AIRE A 1ATM DE PRESIÓN

Anexo 11: AISLAMIENTO INDUSTRIAL OWENS CORNING

Anexo 12: INFRAGAS: SISTEMAS RADIANTES PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Anexo 13: Cotización del quemador

Anexo 14: HORNO DE CURADO

Anexo 15: DISEÑO SISTEMA AUTOMATIZADO A NIVEL PILOTO

Anexo 16: GENERADOR DE GASES

Anexo 17: PATENTE US1888573

Anexo 18: Resultados del ensayo de adherencia

## Bibliografía

- Convection vs Infrared. (2006). *Finishing today magazine*, 50-51.
- Alonso Felipe, J. (2013). *Pinturas, barnices y afines: Composición, formulación y caracterización*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Ascencio Tiza, I. C. (2007). *Aplicación de un generador de gases calientes a gas natural en un secador de paprika de 330 kg/día de capacidad*. Lima.
- Carpenter, M., & Carpenter, S. (n.d.). *Questions and answers dealing with Plaforization, Plaforization Plus and Toran - the one step, room temperature, no sludge, and no waste systems for degreasing and phosphating of metal surfaces*. Boston: Carpenter Chemicals.
- Cata-Dyne. (n.d.). *Explosion-Proof Gas Catalytic Heaters*.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*.
- CHEMTEC. (2010). *TORAN 3 Technical Data Sheet*. Milano: CHEMTEC.
- Colorado Cálad, D., & Posada Jaramillo, M. (2014). *Evaluación de un proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática para el recubrimiento de paneles de Fibra de Densidad Media (MDF)*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Corporation, N. (2004). Powder on MDF - A process Analysis. *Paint & Powder*.
- Cruz. (n.d.). *Transferencia de Calor: Tablas termodinámicas*. Lima: Ingeniería Mecánica PUCP.
- El Sitio de la Pintura en Polvo*. (n.d.). Retrieved Enero 2018
- Grapp, H. (1948). *Patent No. 2,446,822*. Estados Unidos.
- GUIDETTI, G., GUIDETTI, C., & CARPENTER, M. (2009). *Plaforization Process for Cleaning, Degreasing, and Phosphating*. Metal Finishing.
- Incropera, F., & Dewitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor, convección y radiación*. USA.
- Jocham, C., Schmidt, T., Wuzella, G., Teischinger, A., & Kandelbauer, A. (2011). Adhesion Improvement of Powder Coating on Medium Density Fibreboard (MDF) by Thermal Pre-treatment. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1937-1946.
- Lizárraga, G. (n.d.). *Diseño de línea para pintado electrostático*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Madera Transformada S.A.* (n.d.). Retrieved Marzo 2018, from <http://www.matransaperu.com>

- Marketline. (2016). *Global Paints & Coatings*.
- Nightingale, E. (2017, Septiembre 29). Planta De Matransa. (I. Ramos, Interviewer)
- Portalanza, J. A. (2014). *Diseño y construcción de un cuarto de secado de pintura electrostática para tableros eléctricos combinando energía renovable y no renovable*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Prendi, L. (2010). *Automotive Powder Coatings: An investigation of parameters affecting finish appearance and durability*. Ontario, Canada: University of Windsor.
- Sadwith, R. (1932). *Patent No. 1,888,573*. United states.
- Sadwith, R. (1932). *Patent No. 1.888.573*. US.
- Sherwin-Williams. (2016). Powder Coatings Market. *Coatings World*, 29-32.
- Smith, A. (2002). *Patent No. 6.394.796*. US.
- Smith, A. D. (2002). *Patent No. US 6,394,796 B1*. Estados Unidos.
- Suárez Castañeda, J. L., Amell Arrieta, A. A., & Cadavid Sierra, F. J. (2012). *La radiación infrarroja como mecanismo de transferencia de calor de alta calidad en procesos de calentamiento*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Talbert, R. (2015). Fundamentals of powder coating. *Products finishing*, 86.
- Watlow. (1997). Radiant Heating With Infrared. *A Technical Guide To Understanding And Applying Infrared Heaters*. New England, US.
- Zak, L. (2016). Influence of the Curing Process on the Quality of Powder Coating. *MM Science Journal*, 1382-1386.