

Diseño y evaluación de una torre de enfriamiento para mejorar el proceso de producción de
madera plástica en Madecoplas S.A.S

Daniel Camilo Nossa Rivera (1) y Tania Isabel Torres Duarte (2)

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Doctor en ingeniería química

Codirector

Javier Mauricio Castellanos Olarte

Magíster en ciencias térmicas y energía

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico Mecánica

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a mi madre, por ser mi mayor ejemplo de fortaleza y amor. Gracias por estar siempre a mi lado, por apoyarme en cada paso y por creer en mí, incluso cuando yo dudaba; este logro también es tuyo.

A mi abuela, que desde el cielo me acompaña y guía, espero que se sienta orgullosa de lo que he alcanzado, porque cada uno de mis esfuerzos lleva un pedacito de su amor y enseñanzas.

Daniel Camilo Nossa Rivera

Dedico este trabajo de grado a mis padres, por creer siempre en mí y por enseñarme que todo es posible cuando se trabaja con esfuerzo y determinación. Gracias por ser mi ejemplo, por su amor incondicional y por impulsarme a alcanzar cada meta que me propongo.

A mi hermana, por su amor, su ternura y su apoyo constante a lo largo de este camino. A mis tíos, quienes me ofrecieron su mano y su ayuda en cada obstáculo que se presentó, convirtiéndose en un pilar fundamental durante esta etapa.

A mis abuelos, por todo su amor, sus consejos y el apoyo inquebrantable que siempre me han brindado. Y a cada uno de **los** miembros de mi familia, por acompañarme con su cariño y por regalarme sonrisas en los momentos en que más las necesitaba.

Finalmente, a todas las personas que han formado parte de mi vida y que, con su presencia, sus palabras o su ejemplo, han aportado un granito de arena para que hoy este sueño se haga realidad.

Tania Isabel Torres Duarte

Agradecimientos

Al director, doctor Yesid Javier Rueda Ordoñez, por su orientación, compromiso y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto.

Al codirector, magister Javier Mauricio Castellanos Olarte, por sus valiosos aportes, consejos y disposición constante para compartir sus conocimientos.

A la empresa Madecoplas SAS Socorro, por brindarnos el apoyo, los recursos y el espacio necesario para la realización de las prácticas empresariales. Su colaboración permitió que este proyecto se llevara a cabo de manera práctica y teórica.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron con su aporte y confianza.

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3. Marco teórico	15
3.1 Extrusión de plástico	15
3.2 Madera Plástica	17
3.2.1 Ventajas de la madera plástica	17
3.2.2 Usos y aplicaciones	18
3.3 Torre de enfriamiento.....	18
3.3.1 Torres de tiro mecánico.....	18
3.3.2 Torres de circulación natural.....	19
4. Metodología	21
4.1 Estudio técnico del sistema de desmoldeo	21
4.2 Diseño de la torre de enfriamiento	23
4.3 Evaluación y construcción de la torre de enfriamiento	26
5. Resultados	28
5.1 Estudio técnico del sistema de desmoldeo	28
5.1.1 Datos del proceso de desmolde y parámetros de diseño	28

5.1.2	Caracterización de materiales y piezas.....	30
5.1.3	Evaluación del consumo energético.....	32
5.1.4	Análisis de espacio e infraestructura.....	32
5.2	Diseño de la torre de enfriamiento.....	33
5.2.1	Definición de criterios de diseño.....	33
5.2.2	Selección del diseño óptimo de la torre.....	34
5.2.3	Selección del material de relleno.....	38
5.2.4	Sistema hidráulico de distribución de agua.....	41
5.2.5	Diagrama eléctrico de potencia y control (propuesta técnica).....	43
5.2.6	Elaboración de planos de detalle.....	46
5.3	Evaluación y construcción de la torre de enfriamiento.....	47
5.3.1	Construcción e instalación del sistema.....	47
5.3.2	Monitoreo del rendimiento del sistema.....	50
5.3.3	Evaluación económica del sistema de enfriamiento nuevo.....	52
6.	Conclusiones.....	54
	Referencias bibliográficas.....	56

Lista de Tablas

Tabla 1. Instrumentos utilizados en la toma de datos del proceso de extrusión	22
Tabla 2. Variables críticas registradas en el proceso de extrusión en Madecoplas S.A.S.	28
Tabla 3. Costo operativo del chiller	32
Tabla 4. Parámetros de diseño de la torre de enfriamiento.....	34
Tabla 5. Comparativo de los diseños propuestos para la torre de enfriamiento	37
Tabla 6. Componentes eléctricos arranque de ventilador	45
Tabla 7. Componentes eléctricos arranque de bomba sumergible.....	46
Tabla 8. Comparación entre parámetros de diseño y valores medidos.....	51
Tabla 9. Costo operativo de torre de enfriamiento	52

Lista de Figuras

Figura 1. Extrusora para granulación de plásticos	15
Figura 2. Extrusiones de plástico con contracción.....	16
Figura 3. Tipos de torres de enfriamiento	20
Figura 4. Análisis de una torre de enfriamiento de contraflujo	23
Figura 5. Muestra de medida de humedad relativa	29
Figura 6. Dimensiones de las piezas producidas	30
Figura 7. Composición de los materiales.....	31
Figura 8. Diseño 1	35
Figura 9. Diseño 2.....	35
Figura 10. Diseño 3.....	36
Figura 11. Diseño 4.....	36
Figura 12. Rellenos de torres de enfriamiento usados	39
Figura 13. Muestra de una botella cortada para construir el relleno.....	39
Figura 14. Relleno de fragmentos de Polietileno de Alta Densidad	40
Figura 15. Diseño final del relleno para la torre de enfriamiento	40
Figura 16. Bomba sumergible multietapas AQUA PAK KankiPlus 64A-1127	42
Figura 17. Flauta de distribución de agua.....	43
Figura 18. Diagrama eléctrico ventilador	44
Figura 19. Diagrama eléctrico bomba sumergible.....	45
Figura 20. Laminas cortadas	47
Figura 21. Construcción de la campana.....	48
Figura 22. Construcción de la torre final	49

Figura 23. Instalación de la bomba seleccionada..... 50

Lista de anexos

Anexo A. Diseño de la torre de enfriamiento

Anexo B. Selección y características de la bomba del sistema

Anexo C. Planos técnicos de la torre de enfriamiento

Resumen

Título: Diseño y evaluación de una torre de enfriamiento para mejorar el proceso de producción de madera plástica en Madecoplas S.A.S

Autor: Daniel Camilo Nossa Rivera, Tania Isabel Torres Duarte

Palabras Clave: Torre de enfriamiento, madera plástica, extrusora

Descripción: Este proyecto se desarrolló en la empresa Madecoplas S.A.S., ubicada en Socorro, Santander, con el objetivo de diseñar e implementar una torre de enfriamiento que permita recircular el agua utilizada en el proceso de producción de madera plástica, específicamente en la etapa de refrigeración de los moldes. Este sistema busca optimizar el uso del recurso hídrico y mejorar la eficiencia del proceso productivo, reduciendo el impacto ambiental asociado al consumo de agua y energía.

La metodología empleada consistió, en primer lugar, en la recolección y análisis de datos tanto del entorno ambiental como del proceso de producción. Posteriormente, se seleccionó el diseño conceptual más adecuado para las condiciones de operación de la empresa. A partir de ello, se elaboraron los planos estructurales, se realizó la selección de equipos como bombas, ventiladores y tuberías, y finalmente se llevó a cabo la construcción y puesta en marcha del sistema.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que se logró reducir los precios de operación, disminuyendo el consumo energético y estabilizando la temperatura del agua de enfriamiento. Además, la torre de enfriamiento cumplió con los requerimientos de diseño y funcionamiento, permitiendo que los operarios realizaran el desmoldeo de forma más rápida y segura.

Como conclusión, este proyecto permitió optimizar el proceso de producción, reducir los costos operativos y minimizar los tiempos de desmoldeo, cumpliendo con los objetivos planteados por la empresa y demostrando la viabilidad técnica y ambiental del sistema propuesto

Trabajo de grado.

Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Ing. Yesid Rueda, Codirector: Ing. Javier Castellanos.

Abstract

Title: Design and evaluation of a cooling tower to improve the plastic wood production process at Madecoplas S.A.S

Author: Daniel Camilo Nossa Rivera, Tania Isabel Torres Duarte

Key Words: Cooling tower, plastic wood, struder

Description: This project was developed at the company Madecoplas S.A.S., located in Socorro, Santander, with the aim of designing and implementing a system that would allow the water used in the plastic wood production process to be recirculated, specifically in the cooling stage of the molds, this system seeks to optimize the use of water resources and improve the efficiency of the production process, reducing the environmental impact associated with water and energy consumption.

The methodology used consisted, firstly, in the collection and analysis of data on both the environmental environment and the production process. Subsequently, the most appropriate conceptual design for the company's operating conditions was selected. From this, the structural plans were drawn up, the selection of equipment such as pumps, fans and pipes was made, and finally the construction and commissioning of the system was carried out.

The results obtained were satisfactory, since it was possible to reduce operating prices, reducing energy consumption and stabilizing the temperature of the cooling water. In addition, the cooling tower met the design and operation requirements, allowing operators to perform demolding faster and safer.

In conclusion, this project allowed to optimize the production process, reduce operating costs and minimize demolding times. complying with the objectives set by the company and demonstrating the technical and environmental viability of the proposed system.

Undergraduate thesis.

Faculty of Physical–Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Advisor: Eng. Yesid Rueda, Co-advisor: Eng. Javier Castellanos.

Introducción

En la industria de la transformación de plásticos, los procesos térmicos son determinantes para garantizar la calidad del producto final y la eficiencia productiva. En el caso de Madecoplas S.A.S., empresa dedicada a la fabricación de madera plástica a partir de material reciclado, el proceso de desmoldeo de los perfiles extruidos requiere un enfriamiento controlado que permita evitar deformaciones en las piezas. Actualmente, el sistema de enfriamiento utilizado presenta altos consumos de energía eléctrica y bajos niveles de eficiencia térmica, generando retrasos en la producción y afectando el aprovechamiento energético dentro de la planta.

Frente a esta situación, el proyecto tuvo como propósito diseñar y implementar una torre de enfriamiento que permitiera optimizar el proceso de refrigeración de los moldes, reduciendo el consumo eléctrico y aprovechando materiales reciclados, en coherencia con las normas ambientales de la empresa.

El proyecto se justifica desde tres enfoques complementarios: técnico, económico y ambiental. Desde el aspecto técnico, se propuso un diseño adaptado a las condiciones reales de la planta; desde el económico, se buscó disminuir los costos energéticos frente al uso de chillers convencionales; y desde el ambiental, se promovió la reutilización de materiales plásticos reciclados.

1. Planteamiento del problema

La empresa Madecoplas S.A.S, ubicada en Socorro, Santander, se dedica a la fabricación de postes, varetas y tablas de madera plástica, así como la producción e instalación de parques infantiles, corrales, barandas, portillos y portones en madera plástica. El proceso de extrusión de postes de plástico en Madecoplas S.A.S es de suma importancia para la producción de todos sus productos; actualmente enfrenta problemas debido al sistema de enfriamiento.

El sistema de enfriamiento actual no cumple con las exigencias del proceso de extrusión, lo que provoca una serie de problemas que afectan la calidad y la eficiencia del proceso. La solidificación lenta del material resulta en defectos superficiales, una resistencia mecánica comprometida y tiempos de ciclo más largos. Estos problemas se agravan debido al sobrecalentamiento de los moldes, lo que causa deformaciones, disminuye la precisión dimensional y acelera el desgaste de los componentes, aumentando así los costos de mantenimiento; para resolver este problema, se propone el diseño de una torre de enfriamiento. Esta torre proporcionará una fuente constante de agua fría y controlada, mejorando la distribución del enfriamiento y asegurando una solidificación uniforme del material. La nueva torre de enfriamiento permitirá reducir los tiempos de ciclo, minimizar los defectos en el producto final y disminuir el desgaste de los componentes, lo que resultará en una mayor eficiencia y calidad en el proceso de extrusión.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

- Desarrollar una torre de enfriamiento para reducir el tiempo de producción de madera plástica en Madecoplas S.A.S.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las condiciones de operación utilizadas en el proceso de desmoldeo y los requerimientos de la torre de enfriamiento.
- Diseñar la torre de enfriamiento siguiendo los requerimientos de operación para el proceso de desmoldeo de madera plástica en Madecoplas S.A.S.
- Determinar el impacto en el consumo energético a través de la construcción y puesta en marcha de la torre de enfriamiento para mejorar el proceso de producción en Madecoplas S.A.S.

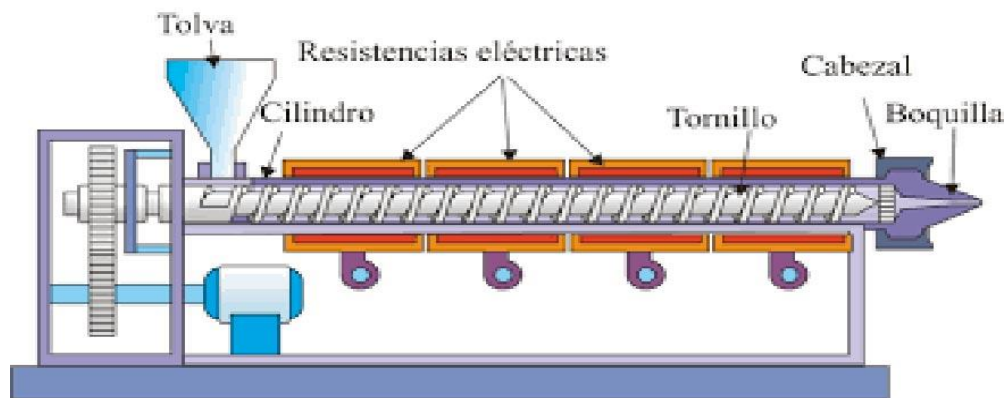
3. Marco teórico

3.1 Extrusión de plástico

El proceso de extrusión de plástico inicia con la alimentación de la tolva como se puede observar en la figura 1, donde se depositan fragmentos de material previamente triturado que resultan más fáciles de procesar. Desde allí, mediante la acción de la gravedad, el plástico descende por la garganta de alimentación hacia el barril de la máquina, donde comienza su transformación.

Dentro del barril, el material se somete a un sistema de calentamiento dividido en varias zonas de temperatura, cuya intensidad aumenta progresivamente a medida que se aleja de la tolva. Paralelamente, un tornillo giratorio impulsa el material hacia adelante, generando no solo movimiento, sino también calor adicional por fricción y presión. Esto permite que las resistencias del barril no requieran temperaturas tan elevadas, optimizando el consumo energético. Posteriormente, el material se dirige al troquel o matriz, cuyo diseño define la geometría final del perfil extruido.

Figura 1.
Extrusora para granulación de plásticos



Fuente: Interempresas (s.f.). *Extrusora para granulación de plástico: qué es y cómo funciona.*

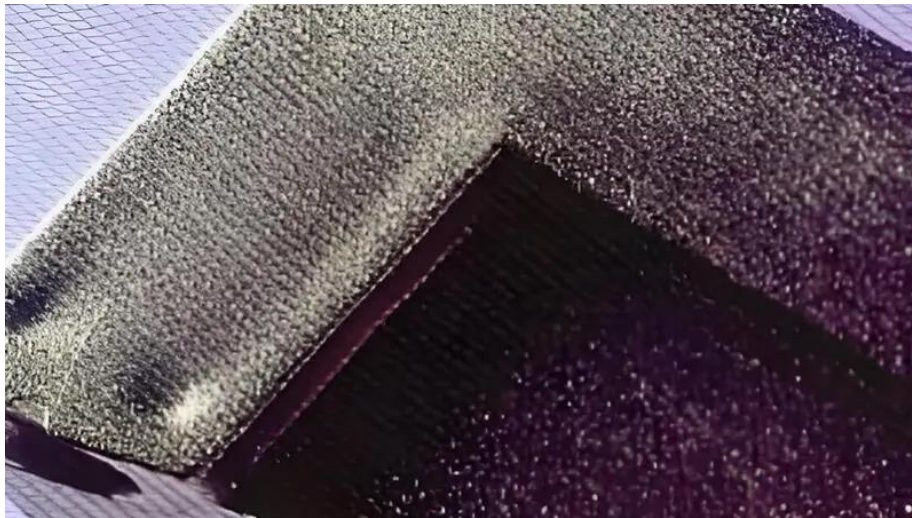
<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/260036-Extrusora-para-grancear-plastico-Que-es-y-como-funciona.html>

En este punto, el material plástico fundido adopta la forma de la abertura de la matriz, lo que completa el proceso de conformado. Finalmente, el perfil recién obtenido se somete a un enfriamiento controlado, que puede realizarse mediante duchas de agua o rodillos refrigerados, con el fin de garantizar la estabilidad dimensional y la permanencia de la forma. (RapidDirect, s.f.).

Los defectos más frecuentes en los procesos de extrusión de plásticos abarcan fenómenos como hinchamiento de la matriz, texturas rugosas en la superficie, variaciones de color como se puede observar en la figura 2, contaminación, inconsistencias en dimensiones, formación de burbujas o vacíos, contracciones, fracturas en la masa fundida y marcas del molde. Estas imperfecciones pueden ser identificadas mediante inspección visual, mediciones dimensionales o técnicas más especializadas como radiografía por rayos X o ultrasonido (UPlastech, s.f.).

Figura 2.

Extrusiones de plástico con contracción



Fuente: UPlastech (s.f.). *Defectos comunes en las extrusiones de plástico.*

<https://uplastech.com/es/defectos-comunes-en-las-extrusiones-de-plastico/>

3.2 Madera Plástica

Según *Industria Ecológica Nacional* (2024), La madera plástica, también llamada compuesta o sintética, es un material fabricado a partir de plásticos reciclados que busca reproducir la apariencia de la madera natural. Su elaboración consiste en la mezcla de plásticos provenientes de residuos con aditivos y, en algunos casos, fibras naturales que aportan mayor resistencia y estabilidad. El resultado es un material robusto, duradero y con bajos requerimientos de mantenimiento en comparación con la madera convencional.

3.2.1 *Ventajas de la madera plástica*

Una de sus principales fortalezas es la durabilidad, ya que no se pudre, no se agrieta y resulta inmune al ataque de insectos como las termitas. Asimismo, no necesita pintura ni sellado frecuente, lo que disminuye el esfuerzo y los costos de mantenimiento a lo largo de su vida útil.

Otra ventaja es su resistencia frente a las condiciones climáticas extremas. La madera plástica soporta bien la humedad y la radiación solar sin deteriorarse con la rapidez que lo haría la madera natural.

Desde el punto de vista ambiental, su **sostenibilidad** es notable, pues aprovecha plásticos reciclados que de otro modo serían desechos contaminantes. De esta forma, cada metro producido contribuye a disminuir el volumen de residuos plásticos.

La **versatilidad** es otro atributo relevante, ya que este material puede moldearse en diferentes formas, dimensiones y colores. Se utiliza tanto en construcciones menores como cubiertas, cercas y muebles de exterior, como en proyectos de mayor escala, por ejemplo, puentes peatonales, parques o señalización urbana.

3.2.2 Usos y aplicaciones

Gracias a sus propiedades, la madera plástica ha ganado aceptación en la construcción de terrazas y patios, donde el bajo mantenimiento resulta clave. También se emplea ampliamente en mobiliario de jardín expuesto de forma permanente a la intemperie. En espacios públicos se utiliza para la fabricación de bancas, juegos infantiles y elementos de urbanismo, ofreciendo alternativas seguras y de larga vida útil.

3.3 Torre de enfriamiento

Una torre de enfriamiento es una estructura diseñada para facilitar el intercambio de calor y masa (por evaporación) entre el agua y el aire. Generalmente, incluye una sección de distribución que suministra el flujo de agua que necesita enfriarse, lo dispersa y fragmenta, y una sección de evaporación donde ocurre la mayor parte de la transferencia de calor. Además, en algunos casos, cuenta con un tanque que recoge el agua tras el proceso. En la mayoría de las torres, la sección de evaporación incluye elementos que proporcionan mayor superficie de contacto para optimizar la interacción entre el agua y el aire, conocidos como relleno evaporador. En muchos casos, el aire es impulsado mediante un ventilador, el cual es una parte fundamental del equipo. Existen variaciones específicas según cada tipo de torre. (Castro Telio & Varela Aguilar, 1996)

Clasificación de las torres de enfriamiento

3.3.1 Torres de tiro mecánico

Las **torres de tiro inducido** son aquellas en las que el aire es expulsado a través de un ventilador ubicado en la parte superior de la torre como se puede observar en la figura 1. Esto permite que el aire ingrese a lo largo de una o más paredes, reduciendo la altura necesaria para la entrada de aire. Además, el aire es descargado a alta velocidad, lo que evita la recirculación de aire parcialmente

saturado dentro de la torre, mejorando así la eficiencia del proceso de enfriamiento. Sin embargo, esta alta velocidad también provoca una mayor pérdida de agua debido al arrastre de gotas y genera una caída de presión, lo que incrementa los requerimientos de energía. (KERN, 1999)

Las **torres de tiro forzado** son aquellas en las que el aire es introducido mediante un ventilador que lo impulsa a través de una abertura circular en la base de la torre como se observa en la figura 2. Este aire debe cambiar de dirección bruscamente (90 grados) para continuar su recorrido, lo que causa una distribución del aire menos eficiente y exige que la torre tenga mayor altura. El aire se descarga a baja velocidad a través de una gran abertura en la parte superior de la torre. Debido a esta baja velocidad, el aire puede recircular, es decir, el aire parcialmente saturado vuelve a entrar al sistema, lo que reduce la capacidad de enfriamiento de la torre. (KERN, 1999)

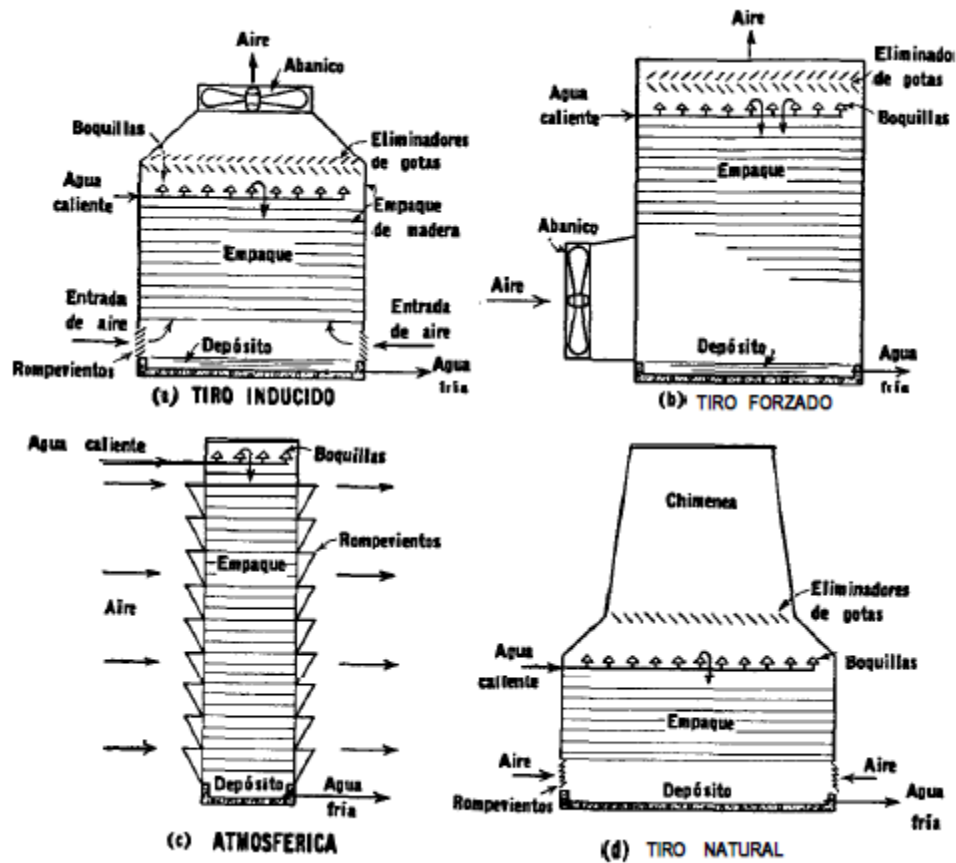
3.3.2 Torres de circulación natural

Una **torre de circulación natural atmosférica** aprovecha las corrientes de aire natural para enfriar el agua. El aire entra por los rompevientos de la torre, en una sola dirección que varía según las condiciones climáticas. Estas torres suelen ser más económicas en lugares con vientos constantes de 5 a 6 millas por hora y donde los costos de energía son altos, ya que no requieren ventiladores mecánicos. Sin embargo, debido a su diseño, suelen ser más largas y estrechas, con mayores pérdidas de agua por arrastre. Además, no son eficientes para enfriar el agua a temperaturas cercanas al bulbo húmedo, lo que limita su capacidad de enfriamiento en condiciones de calma. (KERN, 1999)

Las **torres de tiro natural** funcionan de manera similar a una chimenea. El aire se calienta dentro de la torre al entrar en contacto con el agua caliente, lo que reduce su densidad. Esta diferencia de densidad entre el aire dentro de la torre y el aire exterior genera un flujo natural de aire frío desde la parte inferior, mientras que el aire caliente se expulsa por la parte superior. Estas torres deben

ser altas y tener una sección transversal amplia para permitir el flujo de aire, que es más lento en comparación con las torres de tiro mecánico. Aunque eliminan el costo de energía asociado al uso de ventiladores, suelen ser menos eficientes en días calurosos, cuando la diferencia de temperatura entre el aire y el agua es pequeña. (KERN, 1999)

Figura 3.
Tipos de torres de enfriamiento



Nota: En la figura se muestran los tipos más comunes de torres de enfriamiento que se encuentran en el mercado. Tomado de *Procesos De Transferencia De Calor* (p. 662), por Kern, d. q. (1999).

4. Metodología

Esta investigación tiene como objetivo principal desarrollar una solución técnica para mejorar el proceso de desmoldeo en Madecoplas S.A.S. mediante el diseño e implementación de una torre de enfriamiento. Teniendo como fundamento la recolección y análisis de datos numéricos como temperaturas, caudales y tiempos de enfriamiento. El desarrollo metodológico se estructuró en tres fases: diagnóstico del proceso actual, diseño técnico de la solución y evaluación de su implementación.

4.1 Estudio técnico del sistema de desmoldeo

En esta primera etapa se desarrolló un estudio técnico del proceso de desmoldeo en la planta de Madecoplas S.A.S., con el propósito de identificar las condiciones operativas actuales y definir los requerimientos térmicos que deberá cumplir la torre de enfriamiento a diseñar. Se realizaron visitas técnicas a la planta ubicada en Socorro (Santander), durante las cuales se observaron y registraron las variables críticas del proceso de extrusión mediante instrumentos de medición especializados. En la Tabla 1 se presentan los equipos utilizados, las variables medidas y sus respectivas unidades.

Tabla 1.

Instrumentos utilizados en la toma de datos del proceso de extrusión

Instrumento	Variable medida	Unidad de medida
Termómetro infrarrojo	Temperatura de los moldes	°C
Termopar tipo K	Temperatura del agua (entrada/salida)	°C
Cronómetro	Tiempo de enfriamiento	min
Higrómetro interior/exterior OEM TA298	Humedad relativa del ambiente	% HR
	Temperatura ambiente	°C
Anemómetro	Velocidad del flujo de aire	m/s
Flexómetro	Dimensiones de las piezas	cm

Nota. Esta tabla resume los instrumentos utilizados en la caracterización del proceso de desmoldeo, indicando las variables medidas y sus unidades correspondientes. No se incluyen resultados de medición.

Adicionalmente, se identificaron las limitaciones espaciales en el área de producción, las cuales condicionaron las dimensiones de la torre de enfriamiento.

En cuanto al sistema de enfriamiento actual, la empresa dispone de un chiller; sin embargo, este presenta limitaciones operativas significativas. En determinadas condiciones operativas, el equipo no logra reducir la temperatura del agua a los niveles requeridos, lo que genera defectos en las piezas extruidas, tales como deformaciones superficiales y alteraciones en sus propiedades mecánicas. Asimismo, su operación continua implica un alto consumo energético, lo que se traduce en un incremento considerable de los costos operativos de la planta.

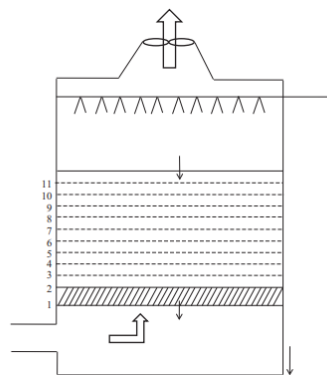
Finalmente, se recopiló información acerca de los materiales procesados, las dimensiones de las piezas producidas y la composición de los materiales utilizados. Estos datos constituyen insumos fundamentales para el diseño de la torre de enfriamiento, al permitir comprender con mayor detalle los requerimientos asociados al proceso de extrusión.

La información recopilada sobre las variables críticas del proceso, junto con los datos de materiales y dimensiones de las piezas, crearon la base técnica necesaria para la siguiente etapa de la metodología, en la cual se establecerán los requerimientos de diseño y dimensionamiento preliminar de la torre de enfriamiento propuesta.

4.2 Diseño de la torre de enfriamiento

En esta fase se llevó a cabo el diseño de la torre de enfriamiento, utilizando los principios de transferencia de calor y masa entre agua y aire. El proceso partió de la información obtenida en la etapa diagnóstica, con el objetivo de definir los parámetros de operación y las dimensiones de la torre que aseguren el desempeño térmico necesario.

Figura 4.
Análisis de una torre de enfriamiento de contraflujo



Fuente: Dhar (2017). *Thermal System Design and Simulation*. Academic Press

De acuerdo con Dhar (2017), el diseño de una torre de enfriamiento se puede abordar mediante el análisis de volúmenes elementales como se observa en la figura 4, en los cuales se establece un balance energético y psicrométrico que permite calcular el perfil de temperatura y entalpía del aire y del agua a lo largo de la torre. El siguiente procedimiento describe cómo calcular la NTU de una torre de enfriamiento en función de sus índices de rendimiento:

Lo primero es dividir la torre de enfriamiento en múltiples volúmenes elementales, asegurando que en cada uno de ellos la temperatura del agua varíe en la misma magnitud.

$$\Delta T_w = \frac{T_{wout} - T_{win}}{N} \quad (1)$$

$$T_{w\ i+1} = T_{wi} + \Delta T_w \quad (2)$$

La cantidad total de calor transferido en cada volumen de control está dada por

$$\Delta q = \dot{m}_w C_{pw} \Delta T_w \quad (3)$$

$$\Delta q = \dot{m}_a \Delta h_a \quad (4)$$

Las entalpías del aire en diferentes secciones de la torre de enfriamiento pueden calcularse de la siguiente manera, teniendo en cuenta las entalpías en las fronteras de cada volumen:

$$h_{ai+1} = h_{ai} + \Delta h_a \quad (5)$$

La entalpía del aire saturado a la temperatura del agua en distintas secciones de las fronteras del volumen, estas se pueden determinar mediante tablas de propiedades del aire saturado.

$$h_{wi} = h_{aire\ saturado\ @\ T_{wi}} \quad (6)$$

Considerando el primer volumen de control por el que pasa el aire, se halla la diferencia promedio de las entalpías

$$(\bar{h}_w - \bar{h}_a)_{i, i+1} = \frac{h_{wi} + h_{wi+1}}{2} - \frac{h_{ai} + h_{ai+1}}{2} \quad (7)$$

Luego, se determina el número de unidades de transferencia (NTU) para cada volumen elemental. Si se conoce el coeficiente promedio de transferencia de calor, es posible calcular el área de contacto entre el agua y el aire en la sección evaluada

$$NTU_{i,i+1} = \frac{Cp_w \Delta T_{wi}}{(\bar{h}_w - \bar{h}_a)_{i, i+1}} \quad (8)$$

$$NTU_{i,i+1} = \frac{\bar{h}_c \Delta A_{i,i+1}}{\dot{m}_w C_{pa}} \quad (9)$$

Una vez obtenidos los valores elementales, se calcula el NTU total de la torre sumando los aportes de cada sección. Si se dispone del área de contacto de todas las secciones, también puede determinarse el área total de intercambio.

$$NTU = \sum_{i=1}^N NTU_{i,i+1} \quad (10)$$

Para definir el estado termodinámico del aire a la salida, se estima su temperatura de bulbo seco. Este valor se obtiene de forma secuencial en cada frontera del volumen elemental, considerando la transferencia de calor sensible mediante la ley de enfriamiento de Newton y el cambio de entalpía del aire húmedo usando su calor específico promedio.

$$A = \sum_{i=1}^N \Delta A_{i,i+1} \quad (11)$$

$$\dot{m}_a C_{pa} (Ta_{i+1} - Ta_i) = \bar{h}_c \Delta A_{i,i+1} \left(\frac{T_{wi} + T_{wi+1}}{2} - \frac{T_{ai} + T_{ai+1}}{2} \right) \quad (12)$$

$$\dot{m}_a C_{pa} (Ta_{i+1} - Ta_i) = \dot{m}_w NTU_{i,i+1} \left(\frac{T_{wi} + T_{wi+1}}{2} - \frac{T_{ai} + T_{ai+1}}{2} \right) \quad (13)$$

Además de los cálculos termodinámicos, en esta fase se realizó un análisis de alternativas de diseño, en el cual se evaluaron diferentes configuraciones de torre considerando criterios como eficiencia de enfriamiento, facilidad de operación, costos de implementación y restricciones

espaciales de la planta. Esta comparación permitió seleccionar la opción más adecuada para las condiciones de Madecoplas S.A.S.

De manera complementaria, se efectuó un análisis comparativo de distintos medios de relleno, evaluando su desempeño en términos de resistencia a la incrustación, durabilidad y costo. Este estudio aseguró la elección de un relleno que no solo cumpliera con los objetivos térmicos del proceso, sino que también resultara viable desde el punto de vista operativo y económico.

Con el área de contacto estimada y el relleno seleccionado, se definieron las dimensiones geométricas de la torre, incluyendo la altura de la sección de contacto, la base de soporte y la zona de distribución de agua. Adicionalmente, se estimó la potencia del ventilador requerida para garantizar el flujo. Finalmente, se consolidó el diseño conceptual mediante la elaboración de planos de detalle.

4.3 Evaluación y construcción de la torre de enfriamiento

En esta etapa se llevó a cabo la evaluación y construcción de la torre de enfriamiento, con el propósito de materializar el diseño conceptual definido en la fase anterior y verificar su desempeño en condiciones reales de operación.

Inicialmente, se realizó un proceso de identificación y evaluación de proveedores para los equipos y materiales requeridos en la construcción de la torre. Esta evaluación incluyó el análisis de aspectos técnicos, económicos y logísticos, tales como la calidad de los materiales, la disponibilidad en el mercado, los costos de adquisición y transporte, así como los tiempos de entrega. De esta manera, se seleccionaron los proveedores más adecuados que garantizaran la viabilidad y confiabilidad del proyecto.

Posteriormente, se procedió con la construcción, instalación y puesta en marcha de la torre de enfriamiento en el área de producción destinada al proceso de desmoldeo de madera plástica en Madecoplas S.A.S. Este proceso contempló el montaje de la estructura, la instalación del sistema de tuberías y accesorios y las pruebas iniciales de funcionamiento.

Una vez instalada la torre, se desarrolló un programa de capacitación para el personal de la planta, con el fin de garantizar el conocimiento adecuado sobre la operación, el mantenimiento preventivo y las medidas de seguridad relacionadas con el nuevo sistema. Esta formación buscó asegurar la correcta manipulación de los equipos, la prolongación de su vida útil y la reducción de riesgos en la operación.

Finalmente, se realizó un monitoreo del rendimiento de la torre de enfriamiento durante el proceso de producción, en el cual se registraron variables críticas como los tiempos de enfriamiento, las temperaturas de entrada y salida del agua. Este seguimiento permitió evaluar el efecto directo del nuevo sistema sobre la calidad del producto final y sobre la reducción de los costos asociados al proceso de desmoldeo.

5. Resultados

5.1 Estudio técnico del sistema de desmoldeo

5.1.1 Datos del proceso de desmolde y parámetros de diseño

La Tabla 2 presenta las variables críticas registradas durante el proceso de extrusión y desmoldeo en *Madecoplas S.A.S.*. Las mediciones de temperatura y humedad ambiental se realizaron cada 30 minutos, mientras que los parámetros del molde fueron monitoreados de forma continua. Estos datos permiten identificar tanto las condiciones de operación del sistema como los factores ambientales que afectan la transferencia de calor en el proceso.

Tabla 2.

VARIABLES CRÍTICAS REGISTRADAS EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN EN *MADECOPLAS S.A.S.*

Variable medida	Valor registrado	Unidad
Temperatura de salida del molde	93	°C
Tiempo de enfriamiento	13	Min por pieza
Temperatura ambiente	26 ± 2 °C	°C
Humedad relativa ambiente	61.44	% HR
Caudal de agua	30	L/min
Temperatura de entrada del agua	30	°C
Temperatura de salida del agua	40	°C
Velocidad del flujo de aire	0.3	m/s

Nota. La tabla resume los resultados obtenidos durante la caracterización del proceso de extrusión, considerando las variables críticas de operación y las condiciones ambientales de la planta.

Se evidenció que el molde sale a temperaturas elevadas, lo cual prolonga el tiempo requerido para su enfriamiento y manipulación, afectando negativamente la productividad de la planta al incrementar los tiempos de ciclo.

Las condiciones ambientales de la planta reflejan un entorno cálido y con humedad relativa considerable como se observa en la figura 5, lo que limita la capacidad del sistema actual para disipar calor de manera eficiente. Adicionalmente, el agua de enfriamiento incrementa su temperatura durante el proceso, lo que confirma la insuficiencia del sistema actual para mantener un caudal a temperaturas adecuadas que aseguren una transferencia térmica óptima.

Figura 5.

Muestra de medida de humedad relativa



En cuanto al flujo de aire, se evidencio que la velocidad no es suficiente para generar una corriente natural que permita el funcionamiento de una torre de tiro natural. Este hallazgo condiciona el diseño de la nueva torre, que deberá ser de tiro inducido, con ventiladores que aseguren el

movimiento adecuado del aire y, en consecuencia, una mayor eficiencia en el intercambio de calor. Estos resultados evidencian la necesidad de implementar un sistema de enfriamiento más robusto, que garantice la reducción de los tiempos de ciclo y la estabilidad térmica del proceso de producción.

5.1.2 Caracterización de materiales y piezas

Se recopiló información sobre los materiales procesados y las dimensiones de las piezas producidas (figura 6), así como la composición de los materiales utilizados (figura 7). Estos datos constituyen insumos fundamentales para el diseño de la torre de enfriamiento para entender la parte del proceso que se realiza en la empresa.

Figura 6.

Dimensiones de las piezas producidas



Los precios de la perfilería que se dan a continuación están antes de IVA.

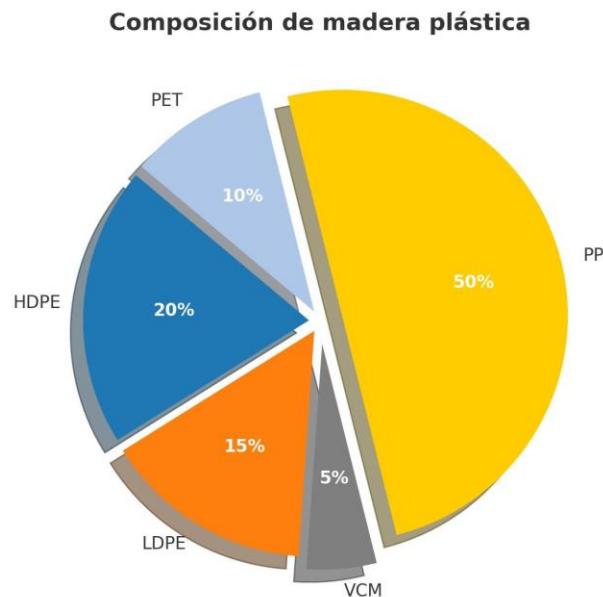
POSTE DE CORRAL	PUNTA	PRECIO	PESO Kg
10x10 cm de 2,50 mts	Diamante	\$ 78.000	24.3
12x12 cm de 2,30 mts	Diamante	\$ 78.000	26
12x12 cm de 3 mts	Recta	\$ 115.000	39.8

VARETAS	PUNTA	PRECIO	PESO Kg
4x9 cm de 3 mts	Recta	\$ 33.000	10.2
5,5x11 cm de 3 mts	Recta	\$ 46.000	16.4

TABLONES	PUNTA	PRECIO	PESO Kg
5x20 cm de 3 mts	Recta	\$ 90.000	28
3,5x25 cm de 1,50 mts	Recta	\$ 48.000	12.3

TABLAS	PUNTA	PRECIO	PESO Kg
2,5x12 cm de 1,50 mts	Recta	\$ 19.000	4.6
2,5x6 cm de 2 mts	Recta	\$ 16.000	3.2

Figura 7.
Composición de los materiales



En cuanto a la Figura 7, el material está compuesto principalmente por polietileno de alta densidad (HDPE), seguido por polipropileno (PP) y polietileno tereftalato (PET), en proporciones variables según la disponibilidad de materia prima reciclada. Esta combinación confiere al producto final una elevada resistencia mecánica, estabilidad dimensional y durabilidad frente a la humedad y la radiación ultravioleta.

La caracterización de estos materiales permite determinar la capacidad calorífica promedio del compuesto plástico y su conductividad térmica efectiva, variables fundamentales para calcular la carga térmica a disipar y el diseño del sistema de intercambio de calor dentro de la torre de enfriamiento.

Por otro lado, dentro de los productos que se fabrican están los postes, varetas, tablones y tablas de diferentes dimensiones, como se observa en la Figura 6. Las medidas varían según la aplicación

final, estas variaciones dimensionales determinan diferentes tiempos de enfriamiento y volúmenes de agua requeridos para garantizar una solidificación uniforme del material.

5.1.3 Evaluación del consumo energético

Con el propósito de determinar el impacto económico del sistema de enfriamiento actual, se realizó una evaluación del consumo eléctrico del chiller utilizado en el proceso de desmoldeo de madera plástica. Para este análisis se emplearon los tarifarios vigentes de la Electrificadora de Santander (ESSA), entidad responsable del suministro de energía en la región.

Los valores de facturación por kilovatio-hora (kWh) fueron tomados como base para estimar el costo operativo diario y mensual del sistema, considerando una jornada laboral de ocho horas diarias durante veinte días al mes, conforme a la jornada de producción habitual en Madecoplas S.A.S.

La tabla 3 muestra los resultados del cálculo energético y económico del chiller, evidenciando el alto consumo asociado a su operación continua.

Tabla 3.

Costo operativo del chiller

Costo operativo chiller	
Potencia [kW]	35.17
Consumo diario [kWh]	281.35
Tarifa [COP/kWh]	925.02
Costo diario	\$ 260,252.75
Consumo mensual	\$ 5,205,054.98

Nota. Cálculos realizados para una operación de 8 horas diarias durante 20 días al mes, con base en la tarifa vigente de la Electrificadora de Santander (ESSA, 2024).

5.1.4 Análisis de espacio e infraestructura

Además, se identificaron restricciones físicas en el área de producción de Madecoplas S.A.S., las cuales condicionaron directamente las dimensiones y configuración estructural de la torre de

enfriamiento. El espacio disponible para su instalación corresponde a una superficie de 2.5 m × 2.5 m con una altura máxima de 14 m, parámetros que se consideraron en la fase de diseño conceptual.

5.2 Diseño de la torre de enfriamiento

5.2.1 Definición de criterios de diseño

Para el desarrollo de la torre de enfriamiento se establecieron los criterios de diseño a partir de los resultados obtenidos en la metodología descrita en la fase 4.2. En dicha sección se aplicaron los principios de transferencia de calor y masa entre el aire y el agua, empleando las ecuaciones de balance energético y psicrométrico propuestas por Dhar (2017) y otros autores especializados en el análisis térmico de torres de contraflujo.

A partir de la aplicación de estas fórmulas se determinaron los parámetros fundamentales del diseño, tales como la carga térmica a disipar (ΔQ), el número de unidades de transferencia (NTU), el coeficiente de transferencia de masa (K_y), la relación de flujo aire-agua (L/G) y entre otros valores técnicos esenciales para el dimensionamiento del sistema.

El procedimiento de cálculo se llevó a cabo en Excel y EES, lo que permitió realizar el proceso de forma iterativa y automatizada, garantizando la precisión y coherencia de las variables térmicas y geométricas obtenidas.

El proceso completo de cálculo, incluyendo las ecuaciones, las unidades y los pasos intermedios, se encuentra documentado en el Anexo A, donde se presenta de manera detallada el desarrollo matemático empleado para obtener los resultados.

Finalmente, en la Tabla 4 se presentan los parámetros de diseño finales de la torre de enfriamiento, los cuales sirvieron como base para definir las dimensiones, el tipo de relleno, las condiciones de operación del sistema propuesto y la selección de los equipos necesarios.

Tabla 4.

Parámetros de diseño de la torre de enfriamiento

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
N	40	-	Número de etapas en la torre.
Δq	742.89884	W	Carga térmica a disipar o calor que debe extraer la torre.
LG	0.7429	-	Relación entre flujo de aire y flujo de agua (L/G ratio).
NTU_{cal}	0.3828	-	Número de unidades de transferencia (NTU) calculado.
Ky	0.4022	Kg/m ² ·s	Coefficiente de transferencia de masa.
A_c	1375.529	m ² /m ³	Área superficial de contacto del aire por unidad de volumen.
Ac_T	1450	m ² /m ³	Área de transferencia total de la torre.
V_{rell}	2.16	m ³	Volumen del relleno dentro de la torre.

5.2.2 Selección del diseño óptimo de la torre

Con el fin de seleccionar la configuración más adecuada para la torre de enfriamiento propuesta, se evaluaron cuatro alternativas de diseño (Figuras 8, 9, 10 y 11), cada una con características geométricas, operativas y estructurales distintas. El análisis comparativo se centró en criterios técnicos fundamentales como eficiencia térmica, consumo energético, facilidad de mantenimiento, adaptabilidad al espacio disponible y costo de implementación, buscando un equilibrio entre desempeño y viabilidad operativa.

Figura 8.
Diseño 1

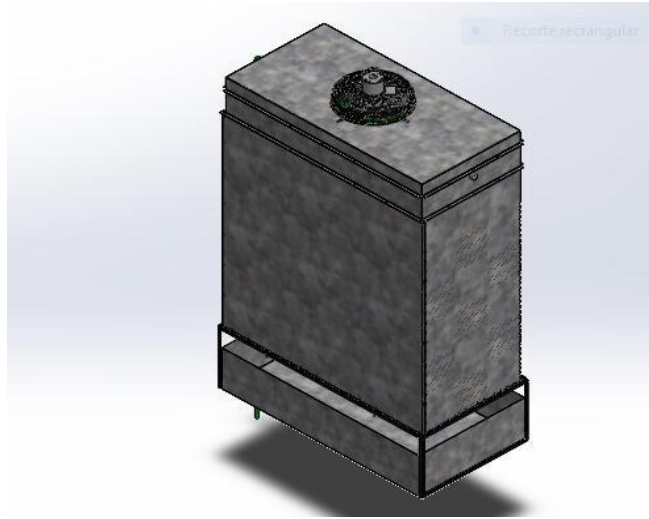


Figura 9.
Diseño 2

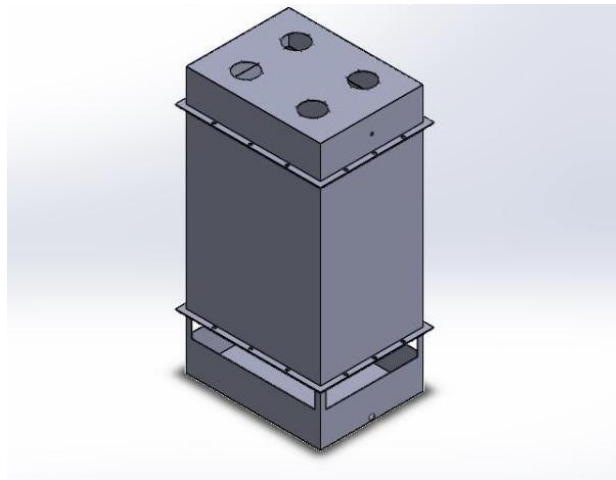


Figura 10.
Diseño 3

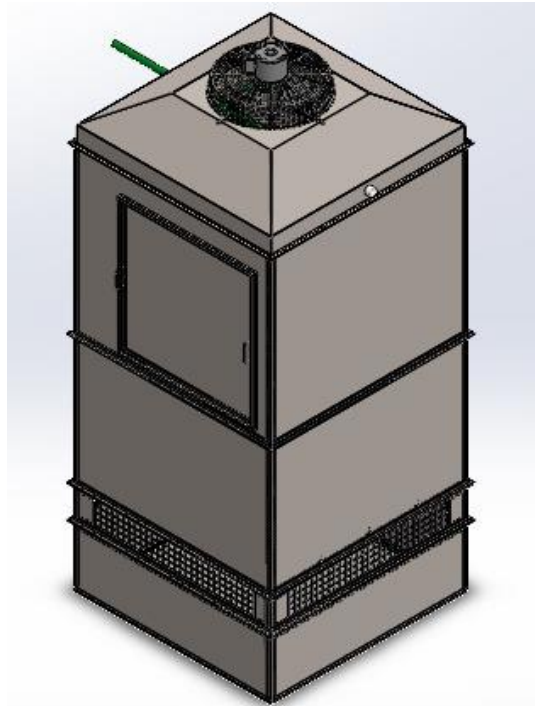


Figura 11.
Diseño 4

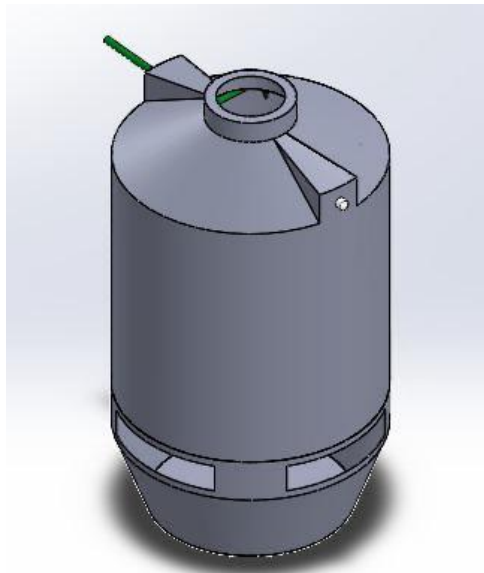


Tabla 5.

Comparativo de los diseños propuestos para la torre de enfriamiento

Criterio de evaluación	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4
Configuración geométrica	Estructura rectangular simple de baja altura.	Estructura rectangular con perforaciones para cuatro ventiladores.	Estructura cuadrada compacta, reforzada, con puerta lateral de mantenimiento.	Estructura cilíndrica vertical con salida superior.
Tipo de ventilación	Tiro inducido con un ventilador axial superior.	Tiro inducido mediante cuatro ventiladores axiales.	Tiro inducido con un ventilador axial central de mayor caudal.	Tiro inducido con un ventilador axial
Eficiencia térmica	limitada por la baja área de intercambio aire-agua.	mayor caudal de aire por los cuatro ventiladores.	flujo de aire uniforme y buen equilibrio entre caudal y pérdida de carga.	depende de condiciones ambientales externas.
Consumo energético	Medio, un solo ventilador.	Alto, por el funcionamiento simultáneo de cuatro ventiladores.	Medio, un solo ventilador.	Medio, un solo ventilador.
Costo de fabricación	Bajo.	Alto, debido a la cantidad de ventiladores y estructura reforzada.	Medio, materiales estándar y configuración optimizada.	Medio, pero requiere moldes especializados.
Facilidad de mantenimiento	Alta: fácil acceso, pocos componentes.	Baja: difícil sincronización y mantenimiento de ventiladores múltiples.	Alta: acceso lateral directo y menor cantidad de componentes.	Media: acceso limitado a la parte interna.
Adaptabilidad espacial	Limitada: no se ajusta totalmente a las restricciones de planta.	Requiere mayor superficie horizontal.	Óptima: se ajusta al espacio disponible (2.5 m × 2.5 m × 10 m).	No se adapta al espacio disponible.
Estabilidad estructural	Media.	Alta, pero con peso adicional en la parte superior.	Alta: estructura equilibrada y reforzada.	Media-baja en condiciones de viento.
Evaluación global	Prototipo básico para	Eficiente pero costoso y complejo.	Diseño óptimo seleccionado: equilibrio entre	No viable para las condiciones de planta.

pruebas
iniciales.

eficiencia, costo y
espacio.

El diseño 3 fue el seleccionado como la opción más viable debido a su alto rendimiento térmico, bajo consumo energético relativo, facilidad de mantenimiento y compatibilidad espacial con el área disponible en la planta de Madecoplas S.A.S.

5.2.3 Selección del material de relleno

Durante la etapa de diseño de la torre de enfriamiento se realizó la selección del material de relleno, componente esencial para garantizar la eficiencia térmica del sistema, ya que es el encargado de maximizar el área de contacto entre el aire y el agua y, por tanto, de optimizar la transferencia de calor y masa dentro de la torre.

En primer lugar, se llevó a cabo una investigación de mercado para identificar las alternativas disponibles comercialmente, incluyendo rellenos industriales nuevos y material reutilizado. Los rellenos originales, comúnmente fabricados en PVC o polipropileno moldeado, tienen un excelente desempeño térmico; sin embargo, su costo es considerablemente elevado, lo que incrementaba de manera significativa el valor final del proyecto.

También se evaluó la posibilidad de adquirir relleno de segunda mano como se puede observar en la figura 12, pero, aunque esta opción representaba una ligera reducción en el costo inicial, seguía siendo económicamente alta y con riesgos asociados al desgaste y la contaminación del material, lo cual podía afectar su durabilidad y desempeño.

Ante estos hallazgos, y con el objetivo de reducir costos y mantener la coherencia con la filosofía ambiental de Madecoplas S.A.S., se propuso la fabricación de un relleno alternativo empleando botellas plásticas recicladas, provenientes del mismo material que la empresa utiliza para producir madera plástica. Las botellas fueron cortadas en la parte superior e inferior para obtener cuerpos

cilíndricos huecos que, al ser dispuestos de forma ordenada en el interior de la torre como se muestra en la Figura 13, generaron un patrón de flujo cruzado de aire y agua, mejorando la turbulencia y el intercambio térmico entre ambas corrientes.

Figura 12.

Rellenos de torres de enfriamiento usados



Figura 13.

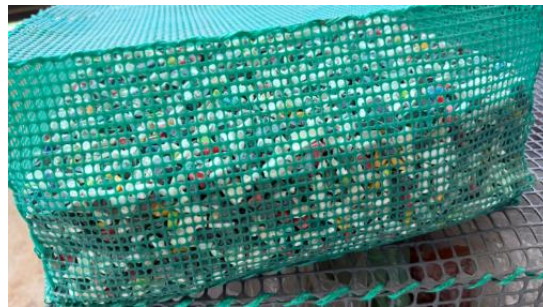
Muestra de una botella cortada para construir el relleno



De manera complementaria, se experimentó con fragmentos de tanques de Polietileno de Alta Densidad cortados finamente como se observa en la figura 14, buscando aumentar aún más el área superficial de contacto. No obstante, esta opción fue descartada, ya que el material tendía a compactarse, reduciendo el paso de aire y afectando el flujo de agua dentro de la torre, lo que disminuía la eficiencia del proceso de enfriamiento. Además, se convertía en una opción muy pesada para instalar en la torre de enfriamiento.

Figura 14.

Relleno de fragmentos de Polietileno de Alta Densidad



Finalmente, el relleno elaborado con botellas plásticas (Observar figura 15) recicladas fue seleccionado como la opción más adecuada, al ofrecer un equilibrio óptimo entre costo, desempeño térmico y sostenibilidad ambiental. Además de su efectividad técnica, esta alternativa contribuye directamente a los objetivos ecológicos y de economía circular de Madecoplas S.A.S.

Figura 15.

Diseño final del relleno para la torre de enfriamiento



5.2.4 Sistema hidráulico de distribución de agua

5.2.4.1 Selección de la bomba

Para garantizar un flujo constante de agua en el circuito hidráulico de la torre de enfriamiento, se seleccionó una bomba sumergible multietapas capaz de proporcionar el caudal y la presión requeridos por el sistema. El proceso de selección se basó en los parámetros hidráulicos calculados durante la etapa de diseño, considerando el caudal necesario, la altura y las pérdidas por fricción en tuberías y accesorios.

Los cálculos detallados de la selección de la bomba fueron desarrollados en una hoja de cálculo en Excel, todo el procedimiento matemático y los resultados obtenidos se encuentran documentados en el Anexo B.

Tras comparar diversas opciones comerciales, se seleccionó la bomba sumergible multietapas AQUA PAK KankiPlus 64A-1127, por cumplir con los requerimientos técnicos del sistema y ofrecer un alto desempeño hidráulico, confiabilidad operativa y eficiencia energética. Esta bomba está diseñada para trabajo continuo, cuenta con doble sello mecánico que garantiza estanqueidad, y una camisa en acero inoxidable 304 que proporciona resistencia a la corrosión, característica ideal para aplicaciones de recirculación de agua en sistemas industriales de enfriamiento. En la Figura 16 se muestra una imagen de la bomba seleccionada.

En conclusión, la bomba sumergible AQUA PAK KankiPlus 64A-1127 representa la alternativa más adecuada técnica y económicamente para el sistema de recirculación de la torre de enfriamiento, al combinar eficiencia hidráulica, durabilidad, bajo consumo energético y facilidad de integración dentro de la infraestructura existente en la planta de Madecoplas S.A.S.

Figura 16.

Bomba sumergible multietapas AQUA PAK KankiPlus 64A-1127



Fuente: Altamira Water (2024). Ficha técnica KankiPlus 64A-1127.

5.2.4.2 Sistema de aspersión

El sistema de aspersión es el encargado de distribuir el agua recirculada uniformemente sobre el área de relleno dentro de la torre de enfriamiento. Está compuesto por un árbol de rociado y boquillas para garantizar una cobertura homogénea. Su correcta instalación y alineación es esencial para asegurar el flujo de agua, lo cual influye directamente en la capacidad de enfriamiento del equipo.

La flauta de distribución recibe el caudal proveniente de la bomba y lo reduce a tubería de 1/2", desde donde se alimentan los elementos de aspersión. Está compuesta por: Nueve boquillas pulverizadoras de agua, que atomizan el flujo y aumentan el área de contacto con los rellenos como se observa en la figura 17.

- Nueve tees, que derivan el flujo hacia cada boquilla.
- Cuatro codos, que permiten redirigir la tubería en ángulos de 90°.

- Dos cruces, que facilitan la conexión de cuatro ramales en la red de distribución.
- Dos flanches, utilizados para la conexión segura entre la tubería principal y la flauta.

Figura 17.

Flauta de distribución de agua



5.2.5 Diagrama eléctrico de potencia y control (propuesta técnica)

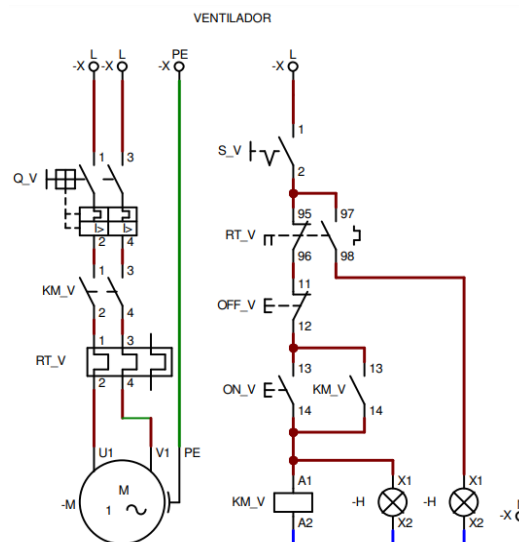
Como trabajo adicional al desarrollo del trabajo de grado, se elaboró la propuesta de diseño eléctrico de potencia y control para la torre de enfriamiento. Aunque esta etapa no fue ejecutada físicamente durante el periodo del proyecto, se desarrolló con el propósito de ser implementada una vez se culminen las adecuaciones eléctricas e infraestructurales en las instalaciones de Madecoplas S.A.S.

A continuación, se presenta el diagrama eléctrico de potencia y control correspondiente a la torre de enfriamiento. Este sistema alimenta y protege el motor del ventilador y de la bomba sumergible, permitiendo su arranque y detención segura.

5.2.5.1 Diagrama eléctrico ventilador

La figura 18 representa el circuito eléctrico del ventilador de la torre de enfriamiento. Este sistema permite el arranque, protección y control del motor encargado de inducir el flujo de aire a través del sistema. Su correcto funcionamiento es esencial para garantizar una transferencia de calor eficiente y segura.

Figura 18.
Diagrama eléctrico ventilador



A continuación, en la tabla 6 se describen los principales componentes que conforman el sistema de potencia y control del ventilador. Cada uno cumple una función específica para garantizar el arranque seguro, el funcionamiento continuo y la protección del motor frente a fallas.

Tabla 6.

Componentes eléctricos arranque de ventilador

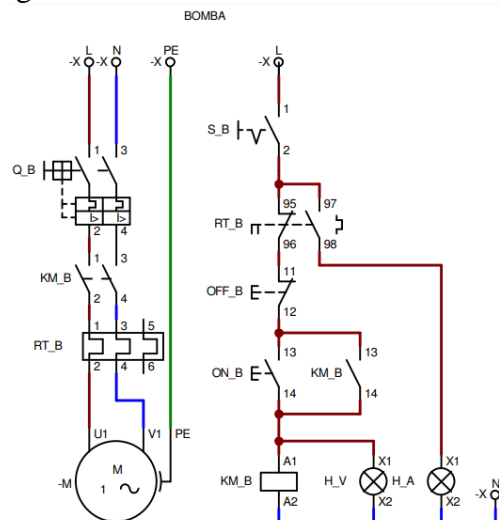
Componente	Símbolo	Especificación técnica
Interruptor termomagnético	Q_V	2 polos, 2 A, curva C
Contactador	KM_V	AC, 2 A, 2 polos
Relé térmico	RT_V	1,5 A, 1NA+1NC
Interruptor selector	S_V	2 posiciones, NA
Botón de arranque	ON_V	Pulsador metálico verde, NA
Botón de paro	OFF_V	Pulsador metálico rojo, NC
Luz piloto verde	H_V	Indicador led verde
Luz piloto ámbar	H_A	Indicador led ámbar
Motor monofásico	M	220 V, 1.2 A

5.2.5.2 Diagrama eléctrico bomba sumergible

La figura 19 muestra el circuito eléctrico correspondiente a la bomba sumergible encargada de recircular el agua dentro de la torre de enfriamiento. Este sistema permite un control confiable del arranque y parada de la bomba, además de brindar la protección necesaria frente a sobrecargas y fallas.

Figura 19.

Diagrama eléctrico bomba sumergible



En la tabla 7 se describen los principales elementos que conforman el sistema de potencia y control de la bomba sumergible.

Tabla 7.

Componentes eléctricos arranque de bomba sumergible

Componente	Símbolo	Especificación técnica
Interruptor termomagnético	Q_B	2P, 10 A, curva C
Contactador	KM_B	AC, 10 A, 2 polos
Relé térmico	RT_B	9.125 A, 1NA+1NC
Interruptor selector	S_B	2 posiciones, NA
Botón de arranque	ON_B	Pulsador metálico verde, NA
Botón de paro	OFF_B	Pulsador metálico rojo, NC
Luz piloto verde	H_V	Indicador led verde
Luz piloto ámbar	H_A	Indicador led ámbar
Motor monofásico	M	110 V, 7.3 A

5.2.6 *Elaboración de planos de detalle*

Una vez definidos los parámetros de diseño y seleccionados los componentes principales de la torre de enfriamiento, se procedió a la elaboración de los planos de diseño y detalle, asegurando que cada elemento cumpliera con los requerimientos técnicos, estructurales y operativos establecidos en las etapas previas del proyecto.

Los planos incluyen la representación completa de la estructura principal de la torre para su correcto funcionamiento. Cada dibujo fue desarrollado conforme a las normas técnicas de diseño mecánico y de seguridad industrial, garantizando la viabilidad constructiva y la facilidad de mantenimiento del equipo.

Estos planos fueron elaborados en formato digital utilizando herramientas de diseño asistido por computador (SOLIDWORK), permitiendo definir con precisión las dimensiones, tolerancias y materiales de fabricación.

El conjunto completo de planos técnicos generados se encuentra disponible en el Anexo C, donde se presenta la documentación gráfica que respalda el diseño final de la torre de enfriamiento propuesta para Madecoplas S.A.S.

5.3 Evaluación y construcción de la torre de enfriamiento

5.3.1 Construcción e instalación del sistema

La construcción de la torre de enfriamiento se llevó a cabo con base en los planos elaborados durante la fase de diseño, cumpliendo con los parámetros estructurales y térmicos establecidos en el proyecto. La construcción se realizó en las nuevas instalaciones de Madecoplas S.A.S.

La estructura principal o bastidor fue fabricada en ángulo de acero inoxidable AISI 304 de 1 pulgada con un espesor de 1/8 de pulgada, conformando una base robusta y estable para soportar el conjunto. Las uniones entre perfiles estructurales se realizaron mediante soldadura.

Figura 20.
Laminas cortadas



Figura 21.

Construcción de la campana



El recubrimiento exterior se construyó con láminas de acero inoxidable calibre 16, material seleccionado por su alta resistencia a la corrosión, facilidad de limpieza y durabilidad en ambientes húmedos (observar figura 20). Se integró además una compuerta lateral de mantenimiento, fabricada con el mismo tipo de ángulo estructural AISI 304, la cual permite el acceso interno para labores de limpieza y revisión del sistema.

Se realizó la instalación completa del sistema hidráulico de la torre de enfriamiento, garantizando la correcta circulación y recirculación del agua dentro del sistema. Esta etapa incluyó la conexión de tuberías de entrada y salida, la instalación de la bomba sumergible como se observa en la figura 23, válvulas de control, uniones, accesorios y el sistema de distribución en la parte superior de la torre.

Con el fin de garantizar la seguridad del personal operativo, se aplicó un recubrimiento térmico protector en toda la superficie exterior de la torre como se observa en la figura 22. Este revestimiento reduce la transferencia de calor hacia el exterior, evitando riesgos de quemaduras

por contacto durante la operación, especialmente en las zonas cercanas al flujo de agua caliente. Adicionalmente, este recubrimiento contribuye a mejorar la eficiencia térmica global de la torre de enfriamiento, ya que actúa como una barrera aislante que minimiza las pérdidas de calor por radiación y convección hacia el ambiente.

Figura 22.

Construcción de la torre final



Con el fin de evitar la acumulación de humedad en el área de almacenamiento, se instaló una cubierta protectora sobre la torre de enfriamiento como se observa en la figura 22. Esta estructura actúa como barrera física para dirigir el flujo de aire húmedo hacia el exterior, impidiendo que el vapor o la condensación ingresen al cuarto de almacenamiento. De esta manera, se protege el entorno inmediato de posibles afectaciones por humedad, se mantiene un ambiente seco y se

preservan las condiciones adecuadas para el funcionamiento y conservación de los equipos y materiales cercanos.

Figura 23.

Instalación de la bomba seleccionada



5.3.2 Monitoreo del rendimiento del sistema

Con el fin de evaluar el comportamiento real de la torre de enfriamiento, se realizó un monitoreo de desempeño térmico en condiciones reales de operación en la planta de Madecoplas S.A.S.. La tabla 8 presenta de forma comparativa los parámetros de diseño y las variables medidas experimentalmente durante la operación del sistema.

Tabla 8.

Comparación entre parámetros de diseño y valores medidos

Variable medida	Valor registrado	Unidad
Tiempo de enfriamiento	8	Min por pieza
Caudal de agua	72	L/min
Temperatura de entrada a la torre	39	°C
Temperatura de salida del agua	32	°C
Velocidad del flujo de aire del ventilador	6.8	m/s

Nota. Datos calculados y medidos durante las pruebas de funcionamiento de la torre de enfriamiento en Madecoplas S.A.S

Al comparar los resultados obtenidos con el nuevo sistema de enfriamiento frente a las condiciones iniciales del proceso, se evidencian mejoras significativas en la eficiencia térmica y en la productividad del proceso de desmoldeo. El tiempo de enfriamiento por pieza disminuyó de 13 a 8 minutos, lo que representa una reducción del 33 % en el tiempo total del ciclo. Esta mejora indica que la torre de enfriamiento diseñada logra una extracción de calor más efectiva, permitiendo una solidificación más rápida de las piezas sin comprometer su calidad superficial ni estructural.

El caudal de agua aumentó de 30 L/min a 72 L/min, lo que evidencia una mayor capacidad del sistema para mantener un flujo constante de agua fría durante el proceso. Este incremento permite una transferencia de calor más rápida y uniforme, evitando zonas con sobrecalentamiento en los moldes.

En cuanto a la temperatura del agua, se observó que el fluido ingresa a la torre a 39 °C y sale a 32 °C, alcanzando un descenso térmico de 7 °C. Aunque la temperatura de salida es ligeramente

superior a la del sistema inicial, el aumento del caudal compensa este efecto, manteniendo la capacidad total de enfriamiento dentro de los parámetros de diseño establecidos.

Por su parte, la velocidad del flujo de aire medida en el ventilador se mantiene en 6.8 m/s, valor suficiente para garantizar el funcionamiento eficiente del sistema de tiro inducido. Esto confirma que el diseño seleccionado es adecuado para las condiciones ambientales de la planta, donde la velocidad natural del aire no es suficiente para operar una torre de tiro natural.

En conjunto, estos resultados demuestran que la torre de enfriamiento implementada cumple con los objetivos de diseño propuestos, optimizando la disipación de calor, reduciendo los tiempos de ciclo y contribuyendo al aumento de la eficiencia operativa en el proceso de extrusión y desmoldeo en Madecoplas S.A.S.

5.3.3 Evaluación económica del sistema de enfriamiento nuevo

Con el fin de evaluar la viabilidad económica del nuevo sistema de enfriamiento, se realizó un análisis del sistema de torre de enfriamiento propuesto. Se determinó el consumo energético de la torre a partir de la potencia de sus componentes principales como se observa en la tabla 9:

Tabla 9.

Costo operativo de torre de enfriamiento

Costo operativo torre de enfriamiento		
Equipos	Potencia [kW]	Consumo diario [kWh]
Bomba sumergible	0.75	6.00
Ventilador	0.26	2.08
Total		8.08
Tarifa [COP/kWh]		925.02
Costo diario		\$ 7,474.16
Costo mensual		\$ 149,483.23

El chiller presentaba un consumo mensual aproximado de \$ 5,205,054.98, producto de una potencia instalada de 35.17 kW y un consumo diario de 281.35 kWh. En contraste, la torre de enfriamiento, compuesta por una bomba sumergible y un ventilador, registra un consumo mensual de tan solo \$ 149,483.23, equivalente a un consumo diario de 8.08 kWh.

La diferencia entre ambos sistemas evidencia un ahorro energético mensual de aproximadamente \$ 5,055,571.75 COP. Este resultado demuestra que la torre de enfriamiento no solo cumple con los requerimientos térmicos del proceso, sino que también constituye una solución altamente eficiente desde el punto de vista económico y energético.

6. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió diseñar, construir y evaluar una torre de enfriamiento funcional y sostenible, adaptada a las necesidades del proceso de fabricación de madera plástica en Madecoplas S.A.S., dando respuesta al problema identificado en la etapa de planteamiento.

En primer lugar, se logró reducir significativamente el consumo energético asociado al sistema de enfriamiento, sustituyendo el uso de equipos de alto gasto eléctrico, como los chillers, por un sistema de circulación natural asistida, lo que representa una alternativa técnica eficiente y económicamente viable para la empresa.

Desde el punto de vista térmico, el diseño propuesto cumplió con los parámetros de transferencia de calor y masa definidos en la etapa de cálculo, garantizando un enfriamiento uniforme del agua y una mejora en el tiempo del proceso de desmoldeo. La validación experimental demostró que la torre cumple con los requerimientos de caudal, temperatura y rendimiento establecidos en el diseño conceptual.

En términos de sostenibilidad, se destaca el uso de materiales reciclados, especialmente el relleno elaborado con botellas plásticas reutilizadas, que además de reducir costos de fabricación, promueve la economía circular y la gestión ambiental responsable, fortaleciendo el compromiso ecológico de Madecoplas S.A.S.

El proyecto también aportó al ámbito técnico y académico al integrar principios de diseño térmico, hidráulico y estructural en una aplicación práctica, sirviendo como modelo replicable en otros procesos industriales que requieran sistemas de enfriamiento eficientes y de bajo costo. Asimismo, el trabajo demostró la importancia de vincular la ingeniería aplicada con la innovación sostenible, generando soluciones reales que aportan tanto a la productividad como al cuidado del medio ambiente.

Finalmente, la ejecución de este proyecto contribuye al contexto local y regional, al ofrecer una alternativa tecnológica desarrollada con recursos accesibles, capaz de fortalecer la competitividad de la industria plástica y de fomentar prácticas de manufactura más limpias. Este trabajo representa un avance significativo hacia el desarrollo de sistemas térmicos eficientes, sostenibles y adaptados al entorno productivo colombiano.

Referencias Bibliográficas

- Castro Telio, C. A., & Varela Aguilar, O. (1996). Manual de selección y manejo de torres de enfriamiento. C.U.A.O. Biblioteca.
- Dhar, P. L. (2017). *Thermal System Design and Simulation*. Academic Press.
- Industria Ecológica Nacional. (2024, junio 5). *Descubriendo la madera plástica: un aliado sostenible para el medio ambiente*. Industria Ecológica Nacional. <https://www.industriaecologicanacional.com/blogs/noticias/descubriendo-la-madera-plastica-un-aliado-sostenible-para-el-medio-ambiente>
- Interempresas. (s.f.). *Extrusora para granulación de plástico: qué es y cómo funciona* [Imagen]. Interempresas. Recuperado el 5 de octubre de 2025, de <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/260036-Extrusora-para-grancear-plastico-Que-es-y-como-funciona.html>
- Kern, D. Q. (1999). Procesos de transferencia de calor (1st ed.). Cecsca.
- RapidDirect. (s.f.). *¿Cómo funciona la extrusión de plástico?* RapidDirect. Recuperado el 5 de octubre de 2025, de <https://www.rapiddirect.com/es/blog/plastic-extrusion-process/>
- UPlastech. (s.f.). *Defectos comunes en las extrusiones de plástico* [Imagen]. UPlastech. Recuperado el 5 de octubre de 2025, de <https://uplastech.com/es/defectos-comunes-en-las-extrusiones-de-plastico/>