



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE SECADORES CONVECTIVOS ZONALES PARA PROCESAMIENTO DE PALETAS Y PRODUCTOS DE ÁLAMO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
MATÍAS IGNACIO JIMÉNEZ RIVAS

PROFESOR GUÍA:
LEONEL ALEJANDRO NÚÑEZ LAZO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ROBERTO CORVALÁN PAIVA
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

SANTIAGO DE CHILE

2015

DISEÑO DE SECADORES CONVECTIVOS ZONALES PARA PROCESAMIENTO DE PALETAS Y PRODUCTOS DE ÁLAMO

El proyecto está enfocado a estudiar y rediseñar algunos sectores críticos de un secador convectivo zonal, que Innovatec Ltda. diseñó y desarrolló para la empresa TEMSA (Terciados y elaboración de maderas S.A.), que la compañía emplea para secar paletas de álamo de 300x30x3 mm³. El equipo, de una configuración tipo túnel en 3 niveles, cuenta con 3 cámaras de secado independientes operando a 90, 45 y 90 °C, respectivamente, con un tiempo de residencia total de 67 min distribuido en 12, 30 y 25 min por cámara. Cada cámara está equipada con 2 ventiladores axiales de 5.670 m³/h cada uno y 2 radiadores de 120 kW cada uno.

El objetivo general del proyecto es evaluar y desarrollar modificaciones del secador, para lograr una mejora en el sistema de aireación y una optimización en la pérdida de presión en el lecho de secado. Los objetivos específicos son: i) Efectuar una investigación conceptual de los mecanismos de distorsión de las paletas y considerarlos en el diseño mejorado del equipo, ii) Efectuar estudios experimentales de pérdida de presión en lechos/camas de paletas (análisis ΔP -Q), iii) Efectuar un estudio de Mecánica de Fluidos Computacionales (CFD) de las condiciones de aireación del lecho de secado, y iv) Proponer configuraciones de alta eficiencia y desempeño para los ventiladores e intercambiadores convectivos ad hoc para el secador.

Para modelar conceptualmente y, por ende, entender los principales fenómenos de gobierno de la distorsión se revisó la bibliografía de los fenómenos de migración de agua, colapso celular, se visualizó una macrorelación entre propiedades mecánicas y dilatación/contracción y, finalmente, se propuso un modelo de pandeo elastoplástico termo-mecánico de los productos. Para el análisis ΔP -Q de lechos de paletas se diseñó un equipo experimental consistente en un lecho estático vertical o cama de paletas, instrumentado con un manómetro diferencial de columna de 300 mm, un tubo de Pitot AMCA con capacidad para medición de velocidad de aire en el intervalo de 0 a 30 m/s; y se condujeron experimentos de flujo por el lecho midiendo ΔP vs Q para lechos de 5 a 200 mm de altura. Para el análisis fluidodinámico se construyeron modelos 3D de cámaras de secado similares a las del secador de diseño original (sin obstáculos) y con deflectores para orientar el flujo de aire hacia la cama de secado. Para esos modelos se resolvió mediante una técnica CFD, empleando el software Solidworks en el módulo Flow simulator, el campo de velocidad interno y la distribución de presión; para varias condiciones de borde de interés. Para el estudio de configuraciones del equipo se construyó un modelo de cálculo de balance de calor y masa considerando el flujo de material por el secador, la transferencia de calor aire-lecho y la migración de humedad.

Los principales resultados del proyecto indican que: i) La distorsión es un problema inherente al tipo de producto, se ve muy influenciada por los fenómenos de colapso celular y anisotropía; que generan altas tensiones residuales. Para cada especie de madera existe una ventana operacional que permite minimizar la distorsión, pero que es dependiente de la tecnología de secado, ii) Los lechos de paletas de 50 – 200 mm desarrollan una ΔP -Q tan alta como 400 Pa a 15 m/s, con una ley tipo Ergun $\Delta P = kQ^{0.9} [Pa]$ siendo $K = 2.005e [Pa \cdot (m^3/s)^{-0.9}]$ la resistencia específica del lecho y e su espesor, iii) Las cámaras de secado del equipo en estudio pueden mejorar ostensiblemente su desempeño al reconfigurarse con deflectores de aire y cuña de fondo. La alimentación del aire debe ser, como mínimo, a 15 m/s para alcanzar una buena distribución de aire y promover un secado uniforme.

El estudio muestra que las cámaras de secado deben configurarse con un sistema de ventiladores tándem, de impulsión – succión, o con un sistema de ventiladores en serie (2 unidades); con una capacidad de 18.900 m³/h y radiadores de 165 kW para desarrollar un proceso de alta eficiencia, minimizando las pérdidas de producto.

Por lo anteriormente expuesto se concluye que el secador convectivo zonal, para este producto, está en el límite de sus posibilidades, porque no puede manejar con holgura el problema de distorsión del producto y el sistema de aireación de lechos desarrolla pérdidas de presión muy altas. Por ello se estima que se requiere un cambio tecnológico, transitando hacia secado en lecho fluidizado.

Agradecimientos

A mi mamá Cecilia y a mi papá José por los valores, el apoyo incondicional durante estos años y por estar siempre conmigo.

A mis hermanos Cristóbal y Francisco y a mi hermana Carolina, por darme su cariño.

A Diana por acompañarme y entenderme en los momentos difíciles.

A mis amigos que me acompañaron y me dieron la alegría estos años en Santiago.

A mi profesor guía Leonel, por su apoyo y correcciones a lo largo del semestre, sin él la memoria no hubiera salido adelante.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales del proyecto	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Alcances.....	2
2. Antecedentes	3
2.1. Estructura de la madera y su producción	3
2.1.1. Estructura del tronco [1].....	3
2.1.2. Clasificación de la madera.....	4
2.1.3. Composición de la madera	4
2.1.4. Agua en la madera [6]	5
2.1.5. Industria maderera y la producción de paletas	6
2.1.5.1. Industria maderera	6
2.1.5.2. Producción de paletas de pintura [10].....	7
2.2. Proceso de secado de la madera [11].....	8
2.2.1. Mecanismos de movimiento del agua durante el secado [12]	8
Parámetros que condicionan el secado de chapa de madera [13].....	9
Factores de la madera que condicionan el secado [13] , [3]	10
2.2.2. Secadores de productos de madera.....	11
2.2.3. Secadores de micro-productos de madera.....	13
2.2.4. Flujo por un medio poroso	15
2.3. Secador zonal convectivo para paletas de pintura.....	18
2.3.1. Descripción del secador que se estudia en este trabajo.....	18
2.3.2. Condiciones de operación [20]	19
Condiciones de secado	20
2.3.3. Producto a secar.....	20
2.4. Elementos de tecnología de ventiladores (T.V.).....	21
2.4.1. Ventiladores.....	21
2.4.1.1. Ventiladores axiales	21
2.4.1.2. Ventiladores centrífugos	22
2.4.2. Selección de ventiladores [23].....	22
2.4.3. Presión estática	23

2.4.4.	Presión dinámica	23
2.4.5.	Presión total.....	23
3.	Metodología	24
3.1.	Investigación conceptual de los mecanismos de distorsión de las paletas de pintura.....	24
3.2.	Estudio experimental de pérdida de presión en lechos de paletas.	25
3.3.	Estudio CFD de la cámara de aireación del lecho de secado.	28
3.4.	Configuración de alta eficiencia y desempeño para los ventiladores e intercambiador convectivo ad hoc para el secador.	29
3.4.1.	Capacidad térmica del ciclo de secado	29
3.4.2.	Pérdidas térmicas en el secador.....	32
3.4.2.1.	Modelo de cálculo pérdidas térmicas	32
3.4.2.2.	Metodología de cálculo de pérdidas en el secador	33
3.4.3.	Pérdidas de presión del flujo de aire interior.....	36
3.4.3.1.	Descripción del Flujo de Aire en el Secador.....	36
3.4.3.2.	Metodología de cálculo pérdidas de presión de flujo de aire interior de cada zona.....	37
3.4.3.3.	Parámetros Generales del Flujo.....	37
3.4.3.4.	Pérdida de presión en ductos.....	38
3.4.3.5.	Pérdida de presión en fitting.....	39
4.	Resultados	40
4.1.	Investigación conceptual de mecanismos de distorsión de las paletas.....	40
4.2.	Estudios experimentales de pérdida de presión en lechos de paletas.	45
4.2.1.	Caracterización del ventilador del set up experimental.....	45
4.2.2.	Estudios experimentales de pérdida de presión en lechos de paletas ..	46
4.3.	Estudio de Mecánica de Fluidos Computacionales (CFD) de las condiciones de aireación del lecho de secado.....	50
4.3.1.	Generación del modelo CAD	50
4.3.2.	Análisis CFD de la cámara de secado original	51
4.3.3.	Análisis CFD de cámaras de secado con patrón de flujo optimizado	53
4.3.3.1.	Modificación de la velocidad de entrada al lecho de secado	53
4.3.3.2.	Análisis de la cámara de secado con la incorporación de deflectores.....	57
4.3.3.3.	Conclusiones del análisis CFD de la camada de secado.....	60

4.4. Configuración de alta eficiencia y desempeño para los ventiladores e intercambiador convectivo ad hoc para el secador.....	61
4.4.1. Balance térmico de los ciclos de secado.....	61
4.4.1.1. Balance térmico Zona 1.....	61
4.4.1.2. Balance térmico Zona 2.....	63
4.4.1.3. Balance térmico Zona 3.....	65
4.4.1.4. Principales conclusiones del balance térmico por zona.....	66
4.4.2. Pérdidas térmicas en el secador.....	67
4.4.2.1. Pérdidas térmicas por las paredes laterales.....	67
4.4.2.2. Pérdidas térmicas por el techo y piso.....	67
4.4.2.3. Pérdidas térmicas totales del secador prototipo.....	68
4.4.3. Análisis de pérdida de presión en el circuito de ventilación de zonas de secado.....	69
4.4.3.1. Pérdidas de Presión en Ductería de la Zona 1.....	69
4.4.3.2. Pérdidas de Presión en Ductería de la Zona 2.....	71
4.4.3.3. Pérdidas de Presión en Ductería de la Zona 3.....	74
4.4.4. Selección de equipos para atender los requerimientos operacionales del secador.....	76
Radiadores.....	76
Ventiladores.....	77
5. Discusión.....	79
5.1. Mecanismos de distorsión de las paletas.....	79
5.2. Pérdidas de presión en lechos de paletas.....	80
5.3. Estudios CFD de la cámara de secado.....	82
5.4. Equipos para atender los requerimientos operacionales del secador.....	83
6. Conclusiones.....	86
7. Bibliografía.....	87
Anexos.....	91
Anexos A: Fotografías del desarrollo experimental.....	91
Anexo B: Resultados de experiencias de Caída Presión vs Caudal, para diferentes alturas de cama de paletas.....	93

Índice de Figuras

Figura 2.1 Secciones del tronco. Fuente: [2]	4
Figura 2.2 Paletas de pintura. Fuente: [9]	7
Figura 2.3 Flujograma de los procesos de producción de palitos de helado en TEMSA. Fuente: [9]	8
Figura 2.4 Defectos típicos de secado. Fuente: [3]	11
Figura 2.5 Secado de madera por aire. Fuente: [14]	12
Figura 2.6 Secador solar de madera. Fuente: [16]	13
Figura 2.7 Secador de madera continuo. Fuente: [17]	14
Figura 2.8 Secadora de Lecho Fluidizado. Fuente: [18]	15
Figura 2.9 Esquema del secador convectivo.	19
Figura 2.10 Esquema entrada de aire secador convectivo.	19
Figura 2.11 Paleta para pintura, de 12". Fuente: [20]	21
Figura 2.12 ventilador Axial. Fuente: [24]	22
Figura 2.13 Ventilador Centrífugo. Fuente: [25]	22
Figura 3.1 Set up experimental para ensayos $\Delta P - Q$ de lechos	25
Figura 3.2 Diagrama del ciclo de secado.	30
Figura 3.3 Esquema de las pérdidas térmicas en el secador.	32
Figura 3.4 Esquema de pared secador	33
Figura 3.5 Descripción del flujo de aire y las pérdidas de presión.	37
Figura 4.1 Comparación de las propiedades mecánicas de álamo (a) y Roble- huelle (b) como función de la densidad anhidra.	42
Figura 4.2 Relación N_{CT} de la densidad de la madera de álamo y huelle.	44
Figura 4.3 Curva característica ventilador (Δ Presión vs Caudal [m^3/s] ²)	46
Figura 4.4 Curvas experimentales $\Delta P - Q$ para lechos de paletas de 5 a 20 cm de espesor	47
Figura 4.5 Resistencia del lecho vs Altura de lecho.	48
Figura 4.6 Predicciones del modelo $\Delta P - Q$ de lechos de paletas con espesores de 5-30 cm	49
Figura 4.7 Modelo de Caja de aireación (Zona de secado)	50
Figura 4.8 Sección típica de la cámara de aireación empleada en el análisis CFD ..	51
Figura 4.9 Corte transversal de la cámara de aireación	52
Figura 4.10 Velocidad salida desde la plancha de aireación	52
Figura 4.11 Corte transversal cámara de aireación, 10 [m/s]	53
Figura 4.12 Plancha de aireación, 10 [m/s].	54
Figura 4.13 Corte transversal cámara de aireación, 15 [m/s].	54
Figura 4.14 Plancha de aireación, 15 [m/s].	55
Figura 4.15 Corte transversal cámara de aireación, 18 [m/s].	55
Figura 4.16 Plancha de aireación, 18 [m/s].	56
Figura 4.17 Corte transversal cámara de aireación, 20 [m/s].	56
Figura 4.18 Plancha de aireación, 20 [m/s].	57
Figura 4.19 Modelo con deflectores incorporados	57

Figura 4.20 Corte transversal de la cámara de aireación, 15 [m/s].	58
Figura 4.21 Velocidad salida plancha de aireación, 15 [m/s].	58
Figura 4.22 Corte transversal cámara de aireación, 18 [m/s].	59
Figura 4.23 Plancha de aireación, 18 [m/s].	59
Figura 4.24 Corte transversal cámara de aireación, 20 [m/s].	60
Figura 4.25 Plancha de aireación, 20 [m/s].	60
Figura 4.26 Diagrama del ciclo de secado.	62
Figura 4.27 Ciclo de secado de la zona 1.	63
Figura 4.28: Ciclo de secado de la zona 2.	64
Figura 4.29: Ciclo de secado de la zona 3.	66
Figura 4.30 Modelo paralelepípedo del secado y sus pérdidas térmicas	67
Figura 4.31 Esquema 3D del secador prototipo.	69
Figura 4.32 Ductería en la zona 1 del secador.	70
Figura 4.33 Ductería en la zona 2 del secador.	72
Figura 4.34 Ductería en la zona 3 del secador.	74
Figura 4.35 Intercambiador de calor vapor – aire seleccionado para la aplicación ...	77
Figura 4.36 Curva característica ventilador Q (Caudal) vs Ps (Presión estática)	78
Figura 4.37 Ventilador Axial seleccionado. Marca Systemair.....	78

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Composición de la madera.....	5
Tabla 2.2 Condiciones zonales de secado.....	18
Tabla 2.3 Condiciones zonales de secado.....	20
Tabla 2.4 Disminución de peso por evaporación en zonas de secado.....	20
Tabla 2.5 Dimensiones y propiedades de paleta para pintura de álamo.....	21
Tabla 3.1 Propiedades de la aislación del secador.	33
Tabla 3.2: Parámetros del ducto típico del secador.	37
Tabla 3.3: Coeficientes de fricción típicos para diferentes fittings.	39
Tabla 4.1 Productos de álamo y hualle afectados por problemas de secado.	41
Tabla 4.2 Densidad de álamo y huelle en estado verde y seco	41
Tabla 4.3 Relación de aspecto de los productos estándar de TEMSA.....	44
Tabla 4.4 Ajuste de los datos ΔP -Q a una ecuación Ergun potencial	47
Tabla 4.5 Potencia térmica de total zona 1.	61
Tabla 4.6 Ciclo de aire en la zona 1	62
Tabla 4.7 Potencia del ciclo de aire y eficiencia térmica, zona 1.....	63
Tabla 4.8: Potencia térmica total de la zona 2.....	64
Tabla 4.9: Ciclo de aire en la zona 2 de secado a 45°C.....	64
Tabla 4.10: Potencia del ciclo de aire y le eficiencia térmica en la zona 2.	65
Tabla 4.11: Potencia térmica total de la zona 3.....	65
Tabla 4.12: Ciclo de aire en la zona 3 de secado a 90°C.....	66
Tabla 4.13: Potencia del ciclo de aire y le eficiencia térmica en la zona 3.	66
Tabla 4.14 Resultados de pérdidas térmicas por las paredes.....	67
Tabla 4.15 Modelo de pérdidas térmicas por el techo y piso del secador.	68
Tabla 4.16 Pérdida de presión del aire por flujo a través del ducto en la zona 1.	70
Tabla 4.17 Pérdidas de presión en el fitting de los ductos de la zona 1.....	71
Tabla 4.18 Pérdidas de presión zona 1	71
Tabla 4.19 Pérdida de presión del aire por flujo a través del ducto en la zona 2.	72
Tabla 4.20 Pérdidas de presión en el fitting de la zona 2 de secado.	73
Tabla 4.21 Pérdidas de presión zona 2.....	73
Tabla 4.22 Pérdida de presión del aire por flujo a través del ducto en la zona 3.	74
Tabla 4.23 Pérdidas de presión en el fitting de los ductos de la zona 3.....	75
Tabla 4.24 Pérdidas de presión zona 3.....	75
Tabla 4.25 Resumen requerimientos de potencia térmica por zona	76
Tabla 4.26 Resumen de pérdida de presión por zona.....	77
Tabla 5.1 Comparación consumo energético radiadores y ventiladores	85

1. Introducción

1.1. Antecedentes generales del proyecto

En el año 2013 Innovatec diseñó un prototipo de secador convectivo zonal de 3 etapas para la empresa TEMSA (Terciados y elaboración de maderas S.A.), empresa dedicada a la fabricación y elaboración de productos de madera, ubicada en Copihue séptima región de Chile. El equipo es utilizado para el secado de paletas de pintura de madera de álamo, producto es exportado a diferentes partes del mundo.

El secador tiene las siguientes dimensiones: 12 m de largo, 3 m de alto, 2,5 m de ancho. Cuenta con 6 ventiladores axiales con capacidad de 5.670 m³/h c/u y 6 radiadores de 120,5 kW_t c/u. El secador está compuesto por 3 cámaras de secado independientes entre ellas, cada una de ellas tiene especificado una temperatura y humedad de aire de secado, una tasa de aireación y un tiempo de residencia. La capacidad de procesamiento de paletas es de 257 [kg/h]. En la Figura 2.9 se puede ver el esquema del secador convectivo.

A medida que ha estado en funcionamiento ha presentado problemas que se describen a continuación: i) Flujo preferencial de aire en las cámaras de secado, ii) baja productividad en comparación con la diseño, debido a pérdidas de materia prima mayores a las presupuestadas, y iii) altas pérdidas de presión en zonas de secado, lo cual ocasiona que los ventiladores se encuentren en el límite de su capacidad para levantar presión.

La memoria pretende abordar las principales problemáticas del prototipo con el afán de evaluar formas/métodos de solución y/o pronunciarse sobre las tecnologías de secado que podrían mejorar el secado de paletas.

1.2. Objetivos

El objetivo general del proyecto es evaluar y desarrollar modificaciones del secador, para lograr una mejora en el sistema de aireación y una optimización en la pérdida de presión en el lecho de secado.

Los objetivos específicos son:

- i. Efectuar una investigación conceptual de los mecanismos de distorsión de las paletas y considerarlos en el diseño mejorado del equipo,
- ii. Efectuar estudios experimentales de pérdida de presión en lechos/camas de paletas,
- iii. Efectuar estudios de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) de las condiciones de aireación del lecho de secado, y

- iv. Proponer configuraciones de alta eficiencia y desempeño para los ventiladores e intercambiador convectivo ad hoc para el secador.

1.3. Alcances

Los alcances de esta memoria son:

- Una investigación bibliográfica de las principales maderas utilizadas en TEMSA (Álamo y Roble-hualle), comparación de las propiedades mecánicas y la tendencia a la deformación.
- Estudios CFD de una sección de la cámara de aireación, considerando el lecho de madera y la plancha de aireación. Se consideran velocidades aire entre 5 a 20 [m/s], además de la incorporación de deflectores en la cámara de aireación.
- Estudios de pérdida de presión considerando tres alturas de lecho de paletas, 5, 10, 15 y 20 cm, variando el caudal de entrada de aire. Se busca encontrar una relación que permita describir la pérdida de presión en función del caudal de aire que pasa por los lechos.
- El cálculo térmico, la selección de radiadores y el cálculo de las pérdidas de presión en conductos y la selección de ventiladores; para una nueva configuración de equipos.

2. Antecedentes

A continuación se muestran los antecedentes que permiten tener conocimientos previos de la madera y de su constitución, la descripción del proceso de corte y proceso de la chapa de madera, una breve descripción de los secadores de madera; para luego mostrar la descripción del funcionamiento de un secador convectivo zonal que se quiere mejorar.

2.1. Estructura de la madera y su producción

2.1.1. Estructura del tronco [1]

La madera es un material poroso que es producido en la médula y ramas de árboles y arbustos. El tronco es la parte estructural del árbol y se compone de:

- Corteza: También es llamada peridermis, esta capa es formada por células muertas del mismo árbol, su función es proteger a los tejidos interiores de los agentes invasores y medioambientales.
- Cambium: Es la capa que le sigue a la corteza y es la base constituyente del crecimiento en espesor del árbol. Esta capa es formada por células de paredes delgadas que se transforman por divisiones sucesivas en nuevas células, dando origen a dos capas, una interior o capa xilema, y la capa exterior o capa de floema, que forma parte de la corteza.
- Albura: Madera que se encuentra en la porción más externa del tronco o ramas de un árbol, justo después de la corteza. Es considerada como la “madera viva” de un árbol, ya que su función primordial es la conducción de agua de las raíces al follaje.
- Duramen: Es la madera dura y consistente. Está formada por células fisiológicas inactivas y se encuentra en el centro del árbol.
- Médula: La parte central del tronco, está constituida por un tejido flojo y poroso. Es oscura y no circula savia por ella. Esta parte es la que tiene un diámetro muy pequeño y suele desecharse en los procesos de la elaboración.

En la Figura 2.1 se pueden ver las distintas secciones que componen el tronco.

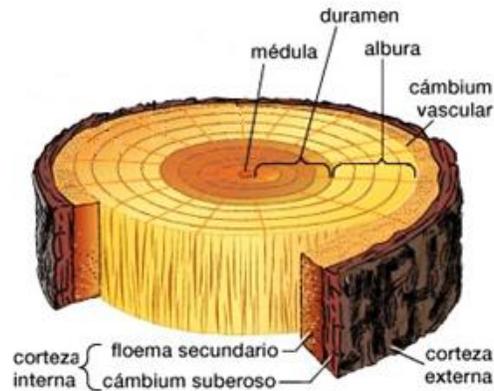


Figura 2.1 Secciones del tronco. Fuente: [2]

2.1.2. Clasificación de la madera

Si se ve desde un punto de vista anatómico, existen dos tipos de madera:

- Madera blanda: Es madera que se da en las coníferas. Este tipo de madera es fuente de alrededor del 80 % de la producción mundial de madera tomando en cuenta los centros tradicionales de producción como la región del Báltico, América del Norte y China. Dentro de sus características este tipo de árboles tienen un crecimiento rápido y escasa densidad, formando troncos rectos y largos que pueden ser cultivados [3].
- Madera dura: Son de crecimiento lento y tienen una gran densidad. Son especies avanzadas en términos de evolución biológica. Se utilizan principalmente para tareas de más exigencia que las maderas blandas, como son la construcción de barriles, instrumentos musicales y botes [4].

Una madera blanda no quiere decir que tiene una menor dureza que una madera dura. Se llama madera blanda por la composición y por tipo de árbol de donde es la madera.

2.1.3. Composición de la madera

La madera como cualquier ser vivo está compuesta íntegramente por células que le proporcionan las distintas propiedades fisicoquímicas. Posee 3 compuestos que tienen una naturaleza polimérica: celulosa, hemicelulosa y lignina. También se encuentran bajos contenidos de algunos compuestos inorgánicos como son ceras y polifenoles que aportan entre 5 - 10 % del peso de un árbol, esta variación se debe a la especie, el periodo del año donde es cortado el árbol y también de las condiciones de crecimiento [5].

En la Tabla 2.1 se puede ver la composición de maderas duras y maderas blandas.

Tabla 2.1 Composición de la madera.

Compuesto	Contenido (% peso)	
	Madera dura	Madera blanda
Hemicelulosa	28-35	25-29
Celulosa	42-48	40-42
Lignina	16-25	23-33

2.1.4. Agua en la madera [6]

Todas las partes de un árbol contienen agua, es fundamental en el proceso de fotosíntesis que conduce a la formación de nuevas células de los árboles y en el crecimiento posterior. El agua casi siempre llega a ser la mitad del peso total del árbol. El agua se presenta en tres formas:

- Agua libre: Se encuentra en las cavidades celulares y da la condición de madera verde. La cantidad de agua libre que puede contener una madera está limitada por su volumen de poros. Al comenzar el proceso de secado el agua libre se va perdiendo por evaporación. Esto se produce muy rápido debido a que está retenida por fuerzas capilares muy débiles.
- Agua de saturación: Agua que se encuentra en las paredes celulares. Durante el secado de la madera, cuando ésta ha perdido su agua libre por evaporación y continua secándose, la pérdida de humedad ocurre con mayor lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera circundante.
Para la mayoría de las especies, el equilibrio higroscópico se encuentra entre el 12 y 18 % de contenido de humedad, dependiendo del lugar donde se realiza el secado.
- Agua de constitución: Es el agua que forma parte de la materia celular de la madera y que no puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado. La separación se realiza con la destrucción parcial de la madera.

Para determinar el valor de contenido de humedad se toman los datos de agua libre y de saturación. En la práctica, la madera se considera totalmente “seca” cuando al someterla a un procedimiento de pérdida de la humedad (secado) la madera mantiene un peso constante (se le conoce como peso anhidro).

El contenido de humedad (CH) es definido como el peso de la cantidad de agua presente en una pieza de madera, en función del peso de una pieza en condición seca. Este valor se calcula con la ecuación 2.1.

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} \cdot 100 \% \quad 2.1$$

Donde:

- CH = Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro [%].
- P_h= Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial [g].
- P_s= Peso de la madera en estado anhidro, peso final o constante [g].

2.1.5. Industria maderera y la producción de paletas

2.1.5.1. Industria maderera

La actividad maderera es una de las principales actividades económicas del país, representando un 4,12 % del PIB (Producto Interno bruto) [7]. Esta industria se ocupa del procesamiento de la madera, desde la plantación hasta la producción y/o elaboración de diversos productos, pasando por la extracción, corte, almacenamiento, moldeo y tratamiento bioquímico. Dentro de los productos que se pueden obtener se cuentan: muebles, materiales de construcción, entre otros.

Dentro de la industria maderera, existe una encargada de fabricar micro-productos de madera, que son trozos de pequeñas dimensiones, como palitos de helados, bajalenguas, paletas de pinturas y palos de fósforos, entre otros.

La empresa TEMSA es en Chile una de las mayores productoras de microproductos de madera. Dentro de los productos fabricados por la empresa se tienen palitos de helados, molduras, paletas de pintura, entre otros [8]. En la Figura 2.2 se pueden ver las paletas de pintura.



Figura 2.2 Paletas de pintura. Fuente: [9]

2.1.5.2. Producción de paletas de pintura [10]

La producción de paletas se realiza a través de un proceso de transformación que tiene una alta especialización y está dado por la siguiente secuencia:

- Tala y corte de trozas: Corresponde a la corta de los árboles, se le extraen parte de las ramas y la corteza; para que el árbol comience a secarse. Generalmente esto se realiza en invierno u otoño.
- Transporte a planta: La madera es transportada con la utilización de camiones a la planta para su proceso.
- Formateado de trozas: Proceso en el cual se cortan los troncos a una cierta medida para comenzar el proceso dentro de la planta
- Descortezado y macerado de trozas formateadas: Se le extrae la corteza que podría tener las trozas de madera, luego la madera es macerada, que es un proceso en el cual la madera es puesta en agua a 95 °C por 15 minutos.
- Debobinado de trozas maceradas: Proceso en el cual la madera del tronco es desbobinada formando largas tiras de madera o chapa de madera, este se realiza con un torno especialmente acondicionado para ello.
- Picado de paletas: Se toma la chapa de madera y se realiza el picado de la madera mediante el proceso de troquelado.
- Secado y pulido de paletas: Proceso en el cual se disminuye la humedad de la madera y luego se pule para eliminar restos que quedan en el picado, logrando un producto de calidad.
- Preselección y Selección automática de paletas: Proceso donde una máquina automática se encarga de la selección de las paletas y desecha las que no cumplan los estándares de calidad tiene la empresa.
- Reclasificado manual de paletas: Reproceso de selección de paletas, en ésta se excluyen paletas que no cumplen con los estándares de la empresa y que la máquina automática no desechó.
- Bodegaje/despacho del producto terminado: Se guarda el producto para su despacho hacia el país o su exportación.

En la Figura 2.3 se aprecia el flujograma de la producción de palitos de helados, que es muy similar al proceso de fabricación de las paletas.



Figura 2.3 Flujograma de los procesos de producción de palitos de helado en TEMSA. Fuente: [9]

2.2. Proceso de secado de la madera [11]

Esencialmente en el secado de madera se realiza una disminución de contenido de humedad para su posterior uso. Se distinguen 3 industrias principales

- Producción de madera procesada (Woodworking): Se utiliza principalmente como material de construcción, como material de soporte estructural en edificios o en los objetos utilizados en carpintería. El secado tiene que tener un equilibrio particular, ya que en el caso que se produzca muy rápido o muy lento, o con temperaturas muy altas, esto podría provocar daños en la madera.
- Madera para astillas (Woodburning): Para realizar la quema de madera en recintos residenciales o empresas es necesario disminuir la cantidad de humedad presente en la madera, lo anterior se debe a que al tener un alto contenido de humedad la combustión se hace ineficiente al emplear energía para evaporar el agua presente en la madera.
- Producción de microproductos de madera: Son utilizados principalmente como utensilios desechables para muchas aplicaciones en la vida diaria. Son productos de madera de pequeñas dimensiones como los palos de helados y los bajalenguas empleados por los médicos.

2.2.1. Mecanismos de movimiento del agua durante el secado [12]

El agua de la madera se mueve de las zonas de mayor a menor contenido de humedad, por lo tanto el secado se inicia desde el exterior y se mueve hacia el

centro. Posteriormente la madera alcanza el equilibrio con el aire circundante en el contenido de humedad.

La humedad se va mover por varios tipos de conductos como son las cavidades celulares, radios medulares, entre otros, con base en la naturaleza de la fuerza motriz (diferencias de presiones de vapor, fuerzas capilares o gradiente de humedad). La velocidad de movimiento del agua puede darse en 3 direcciones, donde la mayor velocidad va a ser en el sentido longitudinal, luego radial y la más baja es la tangencial. A continuación se describen los principales conductos donde se mueve la humedad de la madera.

- Fuerzas capilares: Ocasionalmente ocasionan el movimiento del agua libre de una célula a otra a través de las cavidades celulares, perforaciones y radios medulares. La acción capilar se va desplazando al centro de la madera para desaparecer de manera progresiva cuando las células al interior tienden a alcanzar el Punto de saturación de las fibras, es cuando la madera tiene sus paredes celulares están completamente saturadas pero sus cavidades están vacías.
- Diferencias de presión: Cuando cesa la atracción capilar, la mayoría de los lúmenes solo contienen aire y vapor de agua. La diferencia de presión entre dos puntos, es la responsable de que la humedad de la madera, en estado de vapor, migre de las zonas interiores hacia las zonas exteriores, que tienen una baja presión de vapor.
- Diferencias de contenido de humedad: La humedad de la madera empieza a salir de los espacios intercelulares de las paredes celulares, en las zonas cercanas a la superficie exterior de la pieza se crea un gradiente de humedad, entre la superficie y la zona interior de la pieza, por lo tanto el agua es desplazada de las células interiores, que están húmedas, hacia las de la superficie que se encuentran secas.

Parámetros que condicionan el secado de chapa de madera [13]

Para poder entender el proceso de secado de la madera es importante mencionar los parámetros que condicionan el proceso de secado, según se describe a continuación:

- Temperatura: Al ser el movimiento del agua dentro de la madera un fenómeno regido por la difusión, implica que la temperatura es un factor importante en la velocidad con que se genera dicho fenómeno. El aumento de temperatura permite transmitir energía cinética a las moléculas de agua residentes en la madera en una proporción tal que facilita su evaporación, la cual se ve directamente influenciada por la energía térmica que se le entrega al sistema así como de la capacidad del aire, que circunda la troza, de poder absorber la humedad liberada.
- Humedad Relativa del aire de secado: La humedad relativa determina la capacidad de secado del aire. El aire seco posee una gran capacidad de

secado, conteniendo así una gran cantidad de vapor de agua. La capacidad de secado es afectada por la temperatura, ya que con el calentamiento del aire aumenta la capacidad de secado debido a que la elevación de la temperatura causa un descenso en la humedad relativa, es decir, el aire necesita mayor cantidad de vapor para saturarse.

- **Velocidad del aire:** La circulación del aire es vital para poder transmitir la temperatura dentro de las fibras de la madera y así realizar el proceso de evaporación, no obstante también cumple un rol fundamental en la remoción de la humedad que es expulsada hacia la superficie. Cuanto menor sea el espesor de la capa límite, mayor es la tasa de remoción de humedad a través de la superficie de la madera. La forma del flujo de aire afecta enormemente el secado, ya que una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una laminar, pues la turbulencia afecta de mejor forma la capa límite entre la madera y el aire.

Existen factores internos que influyen en el proceso de secado, son propios de la madera y no se pueden modificar. A continuación se muestra un breve resumen de estos factores internos.

Factores de la madera que condicionan el secado [13] , [3]

Existen diferentes factores que dependen de la madera y que condicionan el secado, estos son mencionados a continuación:

- **Dirección considerada:** La velocidad de circulación del agua es mayor en la dirección longitudinal que en la transversal, incrementándose esta diferencia al aumentar la permeabilidad de la madera.
- **Densidad:** Con el aumento de densidad de la madera, se aumenta la cantidad y grosor de membranas celulares que el agua debe atravesar.
- **Contenido de Humedad:** Conforme avanza la interface de secado, a través de las fibras de la madera, se producen etapas de distinta tasa de remoción de humedad, esto se debe a que los gradientes van cambiando con el tiempo y cada vez se hace más lento y trabajoso retirar una menor cantidad de agua remanente. Encontrar un programa de secado que considere estas etapas y mantenga un equilibrio es una tarea que necesita ser tomada en consideración.
- **Espesor:** El espesor es fundamental ya que es distinto el comportamiento de secado en trozos de madera delgada con respecto a madera gruesa, por lo que el problema se aborda de manera diferente.
- **Tensiones producto del secado:** Cuando se produce la extracción del agua dentro de la madera, desde el interior de las fibras hacia el exterior, se van originando tensiones que provocan distintos defectos de secado. Estos se pueden ver en la Figura 2.4. Las capas más exteriores tienden a secarse más rápidamente que las interiores, si las capas exteriores están por debajo el

punto de saturación de la fibra, mientras el interior está saturado, se producen tensiones interiores que pueden producir defectos como los de la Figura 2.4. Estos defectos han sido constantemente estudiados para poder ser erradicados y de esta forma mejorar la productividad del de la industria. Uno de los efectos del secado de la madera es la contracción de las fibras, pero si ésta se produce en forma desigual o muy rápidamente, da origen a grietas, torsiones, alabeos tangenciales y longitudinales, etc.

Los fenómenos físicos que afectan el desarrollo de las tensiones de secado dependen de una compleja interrelación entre el comportamiento térmico de la madera y de los mecanismos de migración de la humedad. En efecto, la distribución de temperatura de la pieza en proceso de secado depende de las propiedades termo físicas de la especie considerada, de la tasa de calentamiento y de las condiciones geométricas del trozo.

Un buen proceso de secado evitando los defectos que podrían producirse, consiste en tener un buen equilibrio entre la tasa de evaporación de humedad superficial y la velocidad de movimiento, hacia fuera, de la humedad desde el interior de la madera.

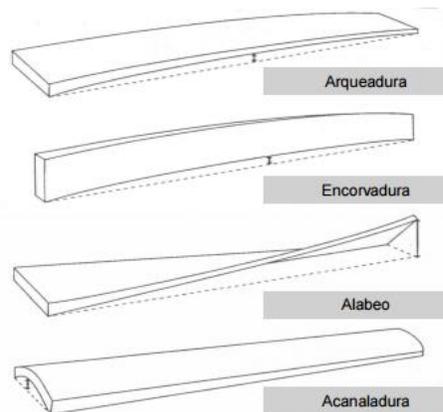


Figura 2.4 Defectos típicos de secado. Fuente: [3]

2.2.2. Secadores de productos de madera

A continuación se da una breve descripción de los secadores convencionales más utilizados en el mercado, para maderas de pequeñas a medianas dimensiones.

Secado por aire (Air Drying) [14]

El secado por aire se realiza mediante la exposición de la madera para que el aire produzca una disminución de la humedad. Este tipo de secado se realiza principalmente en una pila de madera aserrada, en un lugar limpio, seco, fresco y ojala con sombra. La tasa de secado va a depender fundamentalmente de las condiciones climáticas y del movimiento del aire. La pérdida de humedad puede ser

controlada con el recubrimiento de los tabloncillos, con materiales impermeables a la humedad.

Este método es uno de los menos costosos, pero dependiendo del clima la madera puede demorar desde un par de meses hasta años para poder secarse; además de los costos asociados de almacenamiento ya que ésta no es vendida.

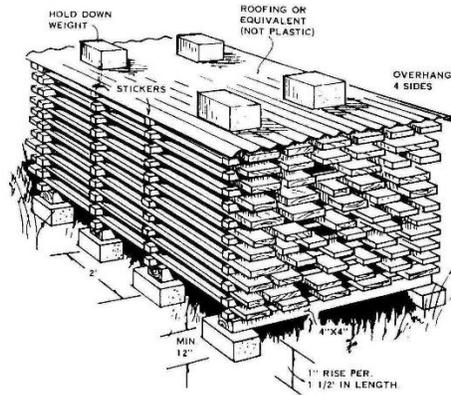


Figura 2.5 Secado de madera por aire. Fuente: [14]

Secado por horno (Kiln Drying) [15]

Este tipo de secador agrega calor al proceso mediante aire caliente. Un tipo de secador utiliza aire el cual es calentado por un intercambiador de calor a vapor. En este proceso se tiene que tener control de temperatura, de la humedad relativa y la circulación del aire para dar las condiciones de las distintas etapas que permiten lograr un buen secado de madera. Para este propósito la madera se apila en cámaras, equipadas de para la manipulación y el control de la temperatura, de la humedad relativa del aire de secado y su velocidad de circulación a través de la pila de madera.

Secador al vacío [16]

En este tipo de secador la madera se somete al vacío lo que provoca el aprovechamiento de dos principios físicos naturales: La reducción de presión permite que el agua presente en la madera evapore a bajas temperaturas y por otro lado, que el vapor de agua se mueva de las zonas calientes hacia las más frías. El primero de éstos permite una rápida evaporación del agua a partir del centro de la masa leñosa, haciendo que las necesidades energéticas sean bajas y, el segundo permite controlar y regular la cantidad de humedad que es retirada de la madera. Estas dos ventajas permiten retirar la humedad de una manera uniforme, reduciendo el estrés de la madera.

La desventaja de este sistema es que las inversiones son altas, lo cual lo hace propicio para grandes volúmenes y/o productos de alto valor.

Secado solar [16]

Este proceso es una combinación del secado en horno y del secado en aire. El funcionamiento es sencillo, el aire es calentado por colectores puestos en el techo del horno para luego moverlo con ventiladores través de la madera, lo que permite absorber la humedad de la superficie de la madera. En el caso que el aire alcance la saturación de humedad se abren unas escotillas de ventilación, haciendo un intercambio de aire con el exterior. En la Figura 2.6 se puede ver un secador solar.



Figura 2.6 Secador solar de madera. Fuente: [16]

2.2.3. Secadores de micro-productos de madera

A continuación se describen los secadores para micro-productos de madera, entre otros el secador continuo, de lecho fluidizado, de chapa debobinada y el horno multietapas.

Secado continuo [17]

Este tipo de secado se realiza por secadores con forma de túnel, en una banda transportada se va moviendo la madera dentro del túnel. Esta misma tecnología es utilizada en los secadores rotatorios donde la madera entra a cilindros de acero a los cuales se hace ingresar aire caliente y a medida que van girando van quitando la humedad del producto.

Los sólidos se colocan sobre el transportador que se mueve continuamente por el túnel, donde también circulan gases calientes (generalmente aire). El flujo de aire puede ser a contracorriente, corriente directa o una combinación de ambas. En la Figura 2.7 se puede ver un secador de madera continuo.



Figura 2.7 Secador de madera continuo. Fuente: [17]

Secado en lecho fluidizado [18], [19]

En este tipo de secadores los productos flotan en el lecho por la acción de una corriente de gas de fluidización caliente, la que hace que los productos van perdiendo humedad y por lo tanto van secándose. Al ser un lecho fluidizado los productos tienen un alto contacto con el aire caliente por lo tanto el secado es altamente eficiente.

Este tipo de secado se utiliza generalmente en polvos, gránulos aglomerados y pastillas con un tamaño de partícula de promedio entre 50 a 500 μm . Es muy probable que los polvos muy finos y ligeros o las partículas altamente elongadas requieran vibración para lograr con éxito el secado en lechos fluidizados.

El secado en lecho fluidizado ofrece ventajas importantes sobre los demás métodos de secado. En efecto, este sistema permite una gran facilidad en el transporte de los materiales, altas velocidades de intercambio de calor con una gran eficiencia térmica y evita el sobrecalentamiento de las partículas.

Las propiedades de los productos se determinan basándose en la información derivada de su velocidad de secado; por ejemplo la forma en que el contenido de partículas volátiles cambia con el tiempo en un lote en lecho fluidizado, que opera en condiciones controladas.

Otras propiedades importantes son la velocidad del gas de fluidización, el punto de fluidización (es decir, el contenido de partículas volátiles bajo el cual se logra la fluidización sin agitación mecánica o vibración), el contenido de partículas volátiles en equilibrio y el coeficiente de transferencia de calor para las superficies de calentamiento inmersas. Estos y otros datos se alimentan a un modelo o software que controla el proceso en lechos fluidizados, permitiendo de esta forma dimensionar los sistemas de secado industriales. En la Figura 2.8 se puede ver un secador de lecho fluidizado.



Figura 2.8 Secadora de Lecho Fluidizado. Fuente: [18]

Secado de chapa debobinada [20]

La madera debobinada se emplea para la fabricación de palos o utensilios de pequeño formato, o micro productos, y en la producción de tableros contrachapados. La chapa debobinada posee un comportamiento de secado distinto al de una troza gruesa de madera, por lo que la tecnología de secado es bastante especial. Con el objeto de poder obtener productos de buena calidad, este sistema de secado se debe controlar adecuadamente para minimizar los defectos y la pérdida de valor.

El método más utilizado en el secado de chapa debobinada es el que emplea un secador continuo. Típicamente consiste en una malla transportadora que mueve la chapa a través del túnel de secado donde por acción convectiva del aire de secado se realiza el proceso de evaporación del agua contenida. Generalmente, estas instalaciones de secado son complejas y de alto costo de inversión.

Secado zonal convectivo u horno multietapas [19]

Secador zonal convectivo es un tipo de secador continuo que tiene la particularidad que va secando en una serie de etapas o unidades multi-zona, esto es ideal para productos que poseen un alto contenido de humedad y que son de formato pequeño. Por dentro del secador pasan bandas transportadoras que permiten orientar el producto, esto permite beneficiar el producto en el ciclo de secado.

2.2.4. Flujo por un medio poroso

Dentro de esta memoria se necesita un fundamento teórico sobre la pérdida de presión en los lechos de paletas de madera, es por esto que a continuación se describen las ecuaciones que gobiernan las pérdidas por fricción en un lecho fijo.

En un lecho con partículas con flujo ascendente, la circulación de un gas o un líquido a baja velocidad no produce movimiento de las partículas. El fluido circula por los huecos del lecho perdiendo presión. La pérdida de presión viene dada por la ecuación de Ergun [21].

Flujo a través de lechos porosos [21]

El comportamiento que se tiene en un lecho fijo está caracterizado por las siguientes magnitudes:

- Porosidad del lecho o fracción de huecos, ε : Es la relación que existe entre el volumen de los huecos del lecho y el volumen total (huecos + sólido). Está dada por la ecuación 2.4.
- Tamaño de la partícula D_p : Si la partícula es esférica se emplea su diámetro. Para partículas no esféricas, el tamaño viene expresado por la ecuación 2.2.
- Esfericidad de la partícula, ϕ : Es la medida para caracterizar partículas no esféricas e irregulares. Está dada por la ecuación 2.3.

$$D_p = \phi d_{esf} \quad 2.2$$

$$\phi = \frac{\text{área de una esfera de diámetro } d_{esf}}{\text{área de la superficie de la partícula}} \quad 2.3$$

$$\varepsilon = 100 - \left(\frac{\text{densidad aparente}}{\text{densidad real}} \right) \cdot 100 \quad 2.4$$

Donde d_{esf} es el diámetro de una esfera con el mismo volumen que la partícula.

Pérdida de presión en lechos porosos [21]

La resistencia al flujo de un fluido a través de los huecos de un lecho de sólidos es la resultante del rozamiento total de todas las partículas del lecho. El rozamiento total por unidad de área es igual a la suma de dos tipos de fuerzas: fuerzas de rozamiento viscoso, y ii) fuerzas de inercia. Para explicar estos fenómenos se hacen varias suposiciones:

- Las partículas están dispuestas al azar, sin orientaciones preferentes,
- Todas las partículas tienen el mismo tamaño y forma.
- Los efectos de pared son despreciables.

Para calcular la pérdida friccional en flujo en lechos porosos se emplea la ecuación de Ergun, que se puede ver en la ecuación 2.5. La primera parte de esta ecuación corresponde a las pérdidas viscosas y la segunda corresponde a las pérdidas turbulentas.

$$\Delta P = \frac{150\mu L (1 - \varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} v_s + \frac{1,75 L \rho (1 - \varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} v_s^2 \quad [Pa] \quad 2.5$$

Donde:

- L= Longitud de la cama [m]
- D_p = Diámetro equivalente [m]
- ρ =densidad del fluido [kg/m^3]
- μ = viscosidad dinámica del fluido [Pa s]
- v_s = velocidad superficial del fluido [m/s]
- ε =porosidad de la cama o fracción de vacío %

El valor del número de Reynolds para flujos porosos está dado por la ecuación 2.6.

$$Re = \frac{D_p v_s \rho}{\mu} \quad 2.6$$

A partir del número de Reynolds podría simplificarse la ecuación de Ergun y se presentan los siguientes casos:

- $Re < 20$, el término de pérdida viscosa domina y puede utilizarse solo con un error despreciable.
- $Re > 1.000$, sólo se necesita utilizar la pérdida turbulenta, ya que el valor de la pérdida viscosa es muy pequeño

A partir de la ecuación de Ergun se pueden sacar unas conclusiones importantes

- Un aumento de la porosidad hace que disminuyan las pérdidas.
- El aumento del diámetro de la partícula hace que disminuyan las pérdidas
- Un aumento del caudal o un aumento de la viscosidad del fluido hace que las perdidas aumenten.
- La pérdida de presión es proporcional al espesor del lecho.

2.3. Secador zonal convectivo para paletas de pintura

En esta sección se describe el secador prototipo para paletas de pintura, el producto a secar y sus principales características.

2.3.1. Descripción del secador que se estudia en este trabajo

El flujo de aire caliente proveniente de los ventiladores incide sobre las camas de paletas por las bandejas de conducción que están instaladas por debajo de la malla de transporte. En la Figura 2.9 se puede ver un esquema del secador convectivo y en la Figura 2.10 se puede ver un corte para ver la entrada de flujo de aire. En la Tabla 2.2 se puede ver el tiempo de residencia de las paletas dentro del secador, el tiempo total es de 70 min. El tiempo de residencia es distinto en cada zona para disminuir las deformaciones que se producen en el secado de las paletas.

Tabla 2.2 Condiciones zonales de secado.

Zona	Temperatura aire secado [°C]	Tiempo de residencia [min]
Zona 1	90	10
Zona 2	45	35
Zona 3	90	25

El aire es suministrado por ventiladores axiales, dos unidades por cada zona, instalados en la parte superior del secador. Cada circuito de ventilación comprende 2 ventiladores de succión-impulsión, un sistema de dampers de admisión y expulsión de aire, y un intercambiador de calor aire-vapor. Las principales dimensiones del secador son [19]:

- Largo total, incluyendo tolva de carga: 12 m.
- Ancho, incluyendo ductos de aireación: 2,5 m.
- Altura, incluyendo sistemas de aireación 3,5 m.

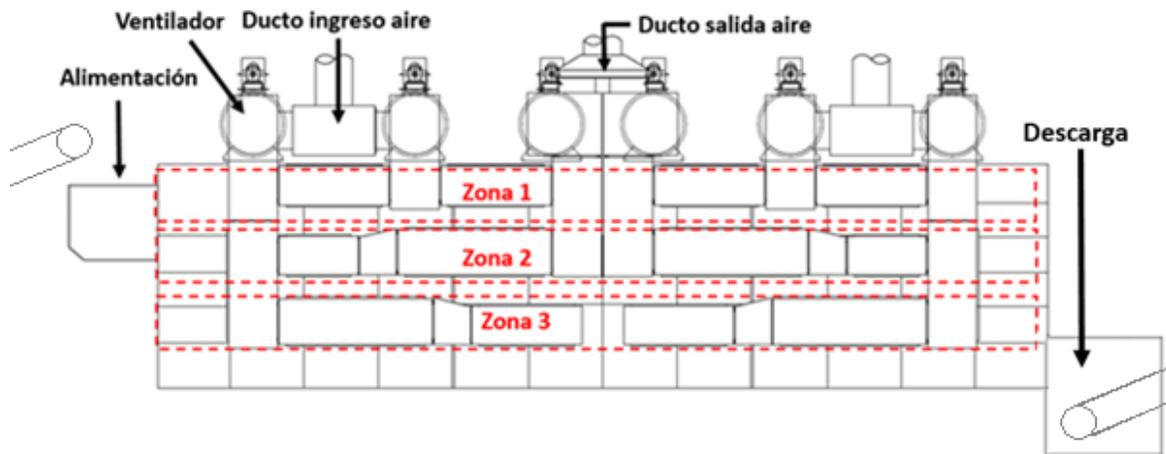


Figura 2.9 Esquema del secador convectivo.

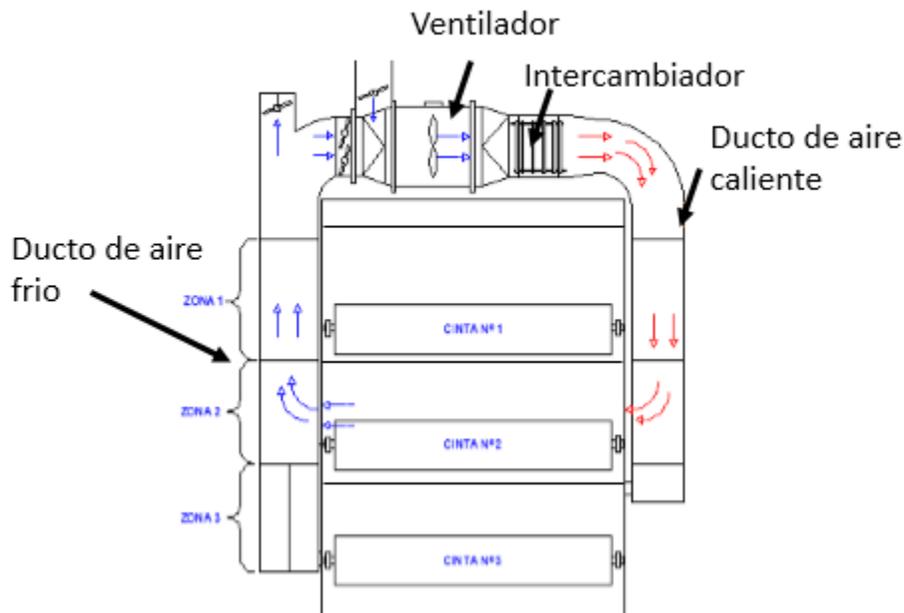


Figura 2.10 Esquema entrada de aire secador convectivo.

2.3.2. Condiciones de operación [20]

Las condiciones de operación son los parámetros con los cuales se diseñó el secador, estos fueron proporcionados por la empresa Innovatec Ltda. El tiempo de residencia de cada una de las zonas y las condiciones de secado fue determinado por ensayos previamente realizados en una estufa de secado convectivo.

Condiciones de secado

Las condiciones de secado para cada una de las zonas, incluyendo la temperatura, tiempo de residencia y la velocidad de aire incidente se muestran a continuación en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Condiciones zonales de secado

Zona	Temperatura de aire secado [°C]	Tiempo de residencia [min]	Velocidad aire incidente [m/s]
Zona 1	90	10	5
Zona 2	45	35	5
Zona 3	90	25	5

Otro de los parámetros relevantes dentro del secador es la disminución de peso por la evaporación que se produce en las distintas zonas de secado, esto se puede ver en la Tabla 2.4. Estos fueron datos de diseño, producto de los ensayos realizados por Innovatec Ltda.

En la Tabla 2.4 se puede ver como en la primera zona se desarrolla una baja pérdida porcentual de humedad y como en la tercera zona se desarrolla una mayor pérdida. También se observa que la mayor tasa de evaporación se produce en las zonas 1 y 2, ya que en estas zonas se evacua el agua libre presente en las paletas.

Tabla 2.4 Disminución de peso por evaporación en zonas de secado

Zona	Δ Peso [kg/h]	Pérdida Porcentual	Tasa Evaporación [kg/s]
Zona 1	103	20	0,0286
Zona 2	103	40	0,0286
Zona 3	25	45	0,0072

2.3.3. Producto a secar

Para el caso específico de este secador, se utiliza para el secado de las Paletas de 12" (ver Figura 2.11). Las paletas son elaboradas a partir de álamo, las cuales poseen las dimensiones y propiedades mostradas en la Tabla 2.5.

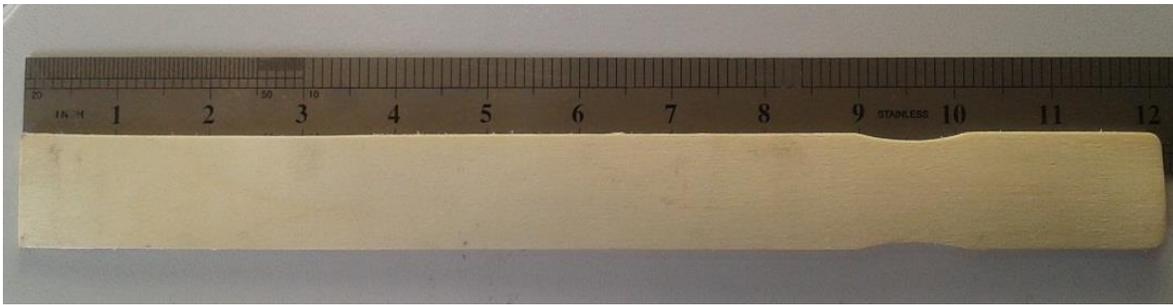


Figura 2.11 Paleta para pintura, de 12". Fuente: [20]

Tabla 2.5 Dimensiones y propiedades de paleta para pintura de álamo.

Paleta pintura 12"	Valor	Unidad
Largo	0,306	m
Ancho	0,029	m
Espesor	0,003	m
Peso seco	0,011	kg
Densidad aparente	124	kg/m ³

2.4. Elementos de tecnología de ventiladores (T.V.)

En esta sección se muestran los principales conceptos y elementos de T.V. que se emplean en este trabajo.

2.4.1. Ventiladores

Para mover el aire en un sistema de ventilación o de extracción localizada, es necesario aportar energía para vencer las pérdidas de presión del sistema. Esta energía se puede aportar en forma de convección natural o flotación. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas se necesita una máquina, como un ventilador, para el mantener el movimiento del aire [22].

Los ventiladores se pueden clasificar en dos grandes grupos: Axiales y centrífugos. Como regla general los ventiladores axiales se utilizan cuando se necesitan caudales de aire importantes con poca pérdida de presión y los centrífugos para caudales de aire bajos y pérdida de presión elevadas.

2.4.1.1. Ventiladores axiales

Son aquellos cuyo flujo de aire tiene la misma dirección del eje. También son llamados helicoidales, porque el flujo a la salida tiene una trayectoria con esa forma. En líneas generales son aptos para mover grandes caudales a bajas presiones. Con velocidades periféricas medianamente altas, son muy ruidosos [23].



Figura 2.12 ventilador Axial. Fuente: [24]

2.4.1.2. Ventiladores centrífugos

Este tipo de ventiladores utilizan el principio de la fuerza centrífuga, ya que arrastran el aire en círculos y usan la fuerza centrífuga para generar movimiento de aire. Además, estos ventiladores cambian la dirección del flujo a un plano perpendicular al eje de entrada del fluido. Se puede decir que en general los ventiladores centrífugos son más eficientes y logran presiones mayores que los axiales [23].



Figura 2.13 Ventilador Centrífugo. Fuente: [25]

2.4.2. Selección de ventiladores [23]

La selección de un ventilador implica no sólo elegir un equipo que cumpla con los requisitos de presión y caudal exigidos, sino con todo los demás aspectos de la instalación; incluyendo las propiedades de la corriente de aire, la temperatura de operación, la disposición de la transmisión y las limitaciones de montaje. Las principales características para la selección de un ventilador se dan a continuación:

- Caudal (Q): Está dado por las necesidades que tiene un sistema, se expresa en $[m^3/h]$ en las condiciones de presión y temperatura a la entrada al ventilador.
- Presión (P): Está dada por las condiciones del sistema en términos de presión estática del ventilador (P_{EV}) o presión total del ventilador (P_{TV}) en ambos casos tiene que estar expresada para aire.

2.4.3. Presión estática

Se define como la presión que tiende a achicar o colapsar el conducto por donde circula el fluido, es expresada en Pascal [Pa] o milímetros de columna de agua [mmcda]. Puede ser positiva o negativa con respecto a la presión atmosférica y se mide perpendicularmente al flujo de aire.

2.4.4. Presión dinámica

La presión dinámica se define como la presión requerida para acelerar el aire desde velocidad cero hasta una cierta velocidad, y es proporcional a la energía cinética de la corriente de aire.

Esta presión depende de la velocidad y de la densidad del fluido. En la ecuación 2.7 se puede ver como se calcula.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad 2.7$$

Donde:

- ρ = Densidad del fluido [kg/m³].
- v = Velocidad del fluido en [m/s].

2.4.5. Presión total

Es la suma de la presión dinámica y de la estática que ejerce un fluido en estado gaseoso o líquido, está dado por la ecuación 2.8.

$$P_T = P_E + P_D \quad 2.8$$

Donde:

- P_D = Presión dinámica [Pa]
- P_E = Presión estática [Pa]
- P_T = Presión total [Pa]

3. Metodología

A continuación se describe la metodología que se emplea en el trabajo para desarrollar los objetivos específicos propuestos.

3.1. Investigación conceptual de los mecanismos de distorsión de las paletas de pintura.

TEMSA es uno de los especialistas de la manufactura de microproductos de chapa debobinada de álamo y roble hualle. Para la producción de los microproductos se necesita una etapa de secado, en esta es donde se producen los defectos de secado y es una problemática que tiene la empresa; es importante tratar de resolverla.

Para poder estudiar la problemática se busca una relación que permite explicar los defectos que se producen en la madera y que tipo de madera va a ser la que produce una mayor cantidad de defectos en el proceso de secado.

Para encontrar la relación se realiza una recopilación del estado del arte de las principales maderas procesadas en TEMSA, que son el roble- hualle y álamo. Luego se realiza un análisis de las propiedades mecánicas vs la contracción de la madera al secarse, para encontrar una relación entre ellos.

El resultado esperado de este análisis consiste en encontrar un modelo que permita evaluar los defectos que se producen en los productos de TEMSA. El modelo permite evaluar que productos van a tener una mayor tendencia a producir defectos de secado. También se busca encontrar las principales variables que rigen el colapso por tensiones de secado.

3.2. Estudio experimental de pérdida de presión en lechos de paletas.

Dentro de los problemas que tiene el secador prototipo está la alta pérdida de presión en las zonas de secado producido por las camas de paletas. Un análisis de los ventiladores utilizados en el secador indica que están al borde de su capacidad. Lo ideal sería instrumentar el secador prototipo y realizar las mediciones de pérdida de presión de las camas de paletas, pero existen dificultades de espacio y no se pueden aislar algunos factores (ductos, lechos, otros).

En este trabajo se propone caracterizar los lechos con un modelo experimental símil, donde se monta un lecho, se instrumenta y se realiza el experimento para encontrar la diferencia de presión que provoca la cama de paletas de pintura.

Para la realización de lo anterior se diseña un set up experimental y una metodología de experimentación, lo que permite realizar las diferentes pruebas que se necesitan para obtener la pérdida de presión dentro de la cámara de pruebas.

El equipo experimental se puede ver en la Figura 3.1. Este equipo permite variar la altura de las paletas, el caudal de aire que entra a la cámara de pruebas y tomar las mediciones de la variación de presión dentro de la cámara de pruebas.

Los parámetros que se controlan en este ensayo son los siguientes:

- Temperatura y humedad ambiental.
- Caudal aire de salida al Set up experimental.
- Diferencia de presión que existe entre la entrada y la salida de la cámara de pruebas.

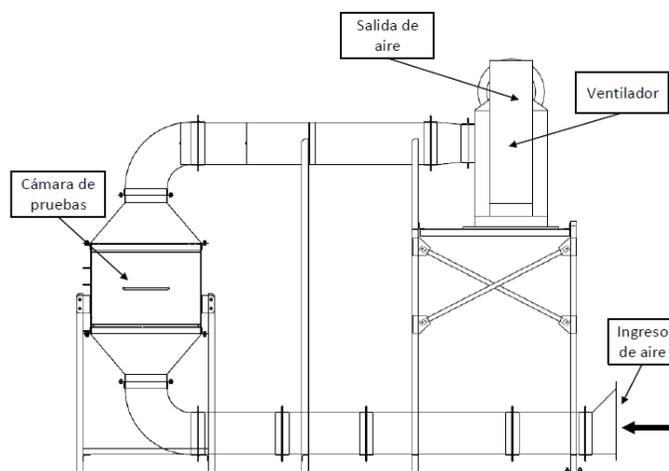


Figura 3.1 Set up experimental para ensayos $\Delta P - Q$ de lechos

El equipo donde se realizan los ensayos consiste en un túnel de aire vertical, sin recirculación, el que está compuesto por 3 zonas principales, ver Figura 3.1.

- Ingreso de aire: Zona de admisión de aire.
- Cámara de prueba: Espacio donde se ponen las muestras de producto a ensayar, cuenta con un depósito y malla en su fondo, lo que permite simular las condiciones de secado de los equipos existentes.
- Salida de aire: El flujo de aire es inducido por un ventilador centrífugo instalado en el extremo final del circuito de aire.

Equipos utilizados

- Tubo pitot: Instrumento que sirve para tomar la presión dinámica y estática (ver sección: 2.4.3, 2.4.4 y 2.4.5), de un gas con una velocidad dada. Precisión: 1 %, para una alineación de $\pm 10^\circ$ al flujo a medir.
- Manómetro U: Instrumentos utilizados para medir la presión de fluidos (líquidos y gases). Lo común es que ellos determinen el valor de la presión relativa, aunque pueden construirse también para medir presiones absolutas. Es un tubo en forma de U, con una precisión de ± 1 mm de columna de líquido y un rango de 300-0-300 mmca.
- Termómetro de mercurio: Instrumento para medir la temperatura del ambiente. Precisión: $\pm 0,1^\circ\text{C}$, rango de temperatura de funcionamiento -20 a 100°C .
- Higrómetro: Instrumento para tomar la humedad relativa del ambiente. Rango de humedad de 0 a 100 %, Precisión: $\pm 0.1\%$, temperatura de funcionamiento -20°C a 60°C .

Procedimiento general de ensayo

Los ensayos se realizan para diferentes alturas de cama entre 50 a 200 mm de altura.

En líneas generales, el procedimiento utilizado en la realización de los ensayos se describe a continuación:

- Se monta un lecho con una altura determinada de paletas de pinturas.
- Se energiza el ventilador
- Se espera la estabilización de flujo y presión para la medición de caudal y la diferencia de presión.
- Se fija la velocidad de aire de entrada al Set up experimental.
- Se mide la diferencia de presión de la cámara de pruebas.
- Se realiza nuevamente el ensayo y se varía la velocidad del ventilador.
- Se termina cuando se han realizado todas las pruebas de los diferentes lechos y a diferentes caudales.

Los resultados esperados de este estudio experimental son encontrar una ecuación que permita caracterizar la pérdida de presión de las camas de paletas en función de su altura y el caudal de aire.

3.3. Estudio CFD de la cámara de aireación del lecho de secado.

Existe un problema importante en el secador prototipo, que es el flujo preferencial dentro de la cámara de secado. Por ello se propone un estudio CFD de la cámara de secado.

El estudio CFD de la cámara de secado pretende proponer una nueva configuración de ventilación para disminuir el flujo preferencial que tiene el secador prototipo.

Para este estudio se plantea realizar un análisis de la cámara de secado original, para después realizar un análisis CFD de la cámara de secado con un patrón de flujo optimizado, lo anterior comprende un aumento de la velocidad de entrada (10 a 20 m/s), y/o la incorporación de deflectores de flujo para favorecer el direccionamiento del flujo hacia la placa de distribución.

Los software que se utilizan son AutoCad 2014 y SolidWorks 2014, el primero se utiliza para visualizar los planos de construcción del secador y determinar las cotas dimensionales necesarias para la realización del CFD, en el segundo se realiza el modelo CAD y el análisis CFD de la cámara de secado.

Los pasos a seguir para desarrollar este estudio son los siguientes

- Efectuar de modelo CAD de la cámara de secado
- Efectuar un CFD de distribución de velocidad del aire dentro de la cámara de secador original con una velocidad de entrada de 5 [m/s].
- Efectuar un CFD a la cámara de secado a distintas velocidades (10 a 20 m/s) de entrada y estudiar el comportamiento del aire dentro de dentro de la cámara de secado y en la plancha de aireación.
- Efectuar un CFD a la cámara de secado con la incorporación de deflectores de flujo y a distintas velocidades para estudiar la homogenización del flujo de aire que llega a los lechos de paletas.

Uno de los resultados esperados en este estudio es ver si un aumento de la velocidad del aire provoca una mejor distribución de flujo en los lechos de paletas y también examinar si la incorporación de deflectores proporciona una homogenización del flujo que llega a los lechos.

3.4. Configuración de alta eficiencia y desempeño para los ventiladores e intercambiador convectivo ad hoc para el secador.

Lo que se busca es encontrar una nueva configuración de ventiladores e intercambiador convectivo para el secador prototipo. Para lo anterior se realiza un balance térmico de cada zona del secador, se determinan las pérdidas térmicas del secador y las pérdidas de presión del flujo de aire. Por último con los resultados de los análisis anteriores se realiza una selección de ventiladores y de radiadores, para realizar esto último se necesita determinar la potencia térmica y las pérdidas de presión provocadas por los ductería del secador.

Para determinar la potencia térmica requerida por el secador se realiza una caracterización del ciclo de secado de cada una de las zonas del secador y se estiman las pérdidas térmicas a través de la estructura del secador, con todo lo anterior se determina la potencia térmica en cada una de las zonas de secado, por lo tanto la capacidad del radiador.

En cada una de las zonas se determinan las pérdidas de presión de acuerdo a las características de la ductería de ventilación y con la pérdida de presión resultante de los lechos de paletas se puede determinar la presión mínima que tiene que levantar el ventilador.

A continuación se describen las diferentes metodologías para determinar la capacidad térmica del ciclo de secado de cada una de las zonas, las pérdidas térmicas en las paredes del secador y por último las pérdidas de presión producto de la ductería del secador prototipo.

3.4.1. Capacidad térmica del ciclo de secado

A continuación se muestra la metodología de cálculo para determinar el porcentaje de renovación de aire y también la capacidad térmica que necesita el secador. Para esto se realiza un balance energético del ciclo de secado considerando los siguientes elementos:

- Entrada de aire ambiente (Punto A)
- Mezcla de aire ambiente y recirculado (Punto B)
- Aire de secado (Punto C)
- Aire post secado (Punto D)
- Aire eliminado (Punto E)
- Aire recirculado (Punto F)

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama del ciclo de secado.

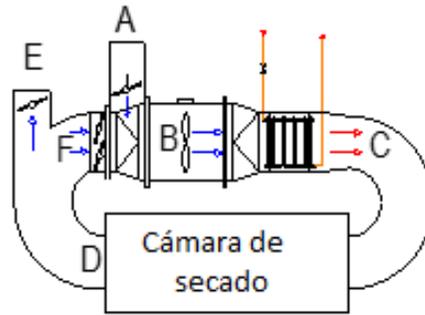


Figura 3.2 Diagrama del ciclo de secado.

Metodología de cálculo ciclo de secado

Para determinar la potencia de secado requerida se necesita determinar la potencia de evaporación, de calentamiento del agua y de materia, dados en la ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3.

$$q_v = m_v \cdot L_v \quad 3.1$$

$$q_{ca} = m_a \cdot Cp_a \cdot (T_s - T_e) \quad 3.2$$

$$q_{cm} = m_m \cdot Cp_m \cdot (T_s - T_e) \quad 3.3$$

$$q_t = q_v + q_{ca} + q_{cm} \quad 3.4$$

Donde:

- m_v : Tasa de evaporación de agua libre.
- L_v : Calor latente del agua.
- m_a : Flujo de agua libre desde las paletas.
- Cp_a : Calor específico del agua.
- T_s : Temperatura de salida del agua presente en paletas.
- T_e : Temperatura de entrada del agua libre en paletas.
- m_m : Flujo másico de paletas por el secador.
- Cp_m : Calor específico de la paleta.
- q_v : Potencia requerida para la evaporación del agua libre.
- q_{ca} : Potencia requerida para calentar el agua libre en las paletas.
- q_{cm} : Potencia requerida para calentar las paletas.
- q_t : Potencia total del proceso de secado.

A continuación se realiza el balance térmico del ciclo de aire, la metodología consiste en fijar un porcentaje de renovación de aire y obtener la humedad relativa de salida del aire de secado. Como no se conoce de primera de las condiciones del aire de salida, no es posible conocer las condiciones del aire de secado. Para esto, se obtiene el aire de salida suponiendo que no existe aire recirculado, esta condición del aire de salida se utiliza para la primera iteración del ciclo de aire y se sigue con las iteraciones utilizando la última condición del aire de salida hasta obtener un error menor al 1 % en el resultado de la humedad absoluta. La metodología referida a la Figura 3.2 se explica a continuación:

- a) Para el punto A, se obtienen las características del aire con psicrometría de acuerdo a los datos de temperatura, humedad relativa y altura geográfica.
- b) El punto B' (Punto B para la primera iteración) en este caso es igual al punto A, ya que no hay renovación de aire.
- c) Se obtienen los datos del punto C', empleando psicrometría, con los datos de entrada de temperatura de secado, altura geográfica y la humedad absoluta, la cual es igual que en el punto B'.
- d) Se calcula la entalpía del aire después del secado $h_{D'}$ con la ecuación 3.5 donde:
 - i. $h_{C'}$ entalpía del aire en el punto C'
 - ii. q_t calor total de secado.
- e) Se obtienen los parámetros del aire de salida del punto D' utilizando psicrometría y los datos de altura geográfica, entalpía y humedad absoluta.

$$h_{D'} = h_{C'} - q_t \quad 3.5$$

Las siguientes iteraciones se calculan con el aire de salida en el punto D' de la iteración anterior, para las siguientes iteraciones se realizan los siguientes pasos:

- a) Se calcula el volumen específico de la mezcla de aire de la iteración i v_{Bi} con la ecuación 3.6.
- b) Se calculan la entalpía h_{Bi} y la humedad absoluta HA_{Bi} de la mezcla de aire en la iteración i con las ecuaciones 3.7 y 3.8 respectivamente.
- c) Se obtienen las características del aire en el punto B, empleando psicrometría y los datos de entalpía, humedad absoluta y altura geográfica.
- d) Se siguen los pasos 3, 4 y 5 de la primera iteración para obtener los datos del aire en los puntos C y D.

A continuación se muestran las ecuaciones 3.6 a 3.8 donde:

- v_{xi} : Volumen específico del aire en el punto X y la iteración i

- A_r : Porcentaje de renovación
- HA_{Xi} : Humedad absoluta del aire en el punto X y la iteración i
- h_{Xi} : Entalpía del aire en el punto X y la iteración i

$$v_{Bi} = v_{Di-1} \cdot (100\% - A_r) + v_A \cdot A_r \quad 3.6$$

$$h_{Bi} = \left(\frac{h_{Di-1}}{v_{Di-1}} \cdot (100\% - A_r) + \frac{h_A}{v_A} \cdot A_r \right) \cdot v_{Bi} \quad 3.7$$

$$HA_{Bi} = \left(\frac{HA_{Di-1}}{v_{Di-1}} \cdot (100\% - A_r) + \frac{HA_A}{v_A} \cdot A_r \right) \cdot v_{Bi} \quad 3.8$$

Con la ecuación 3.9 se calcula el error entre las iteraciones i e i-1 sobre la humedad absoluta, las iteraciones terminan cuando este error es menor al 1 %.

$$e = \frac{HA_{Di} - HA_{Di-1}}{HA_{Di-1}} \% \quad 3.9$$

3.4.2. Pérdidas térmicas en el secador

Para simplificar el problema de transferencia de calor se considera que el secador completo funciona a 90°C y que tiene pérdidas térmicas por sus 4 paredes, el techo y el piso. En la Figura 3.3 se muestra un esquema de las pérdidas térmicas en el secador.

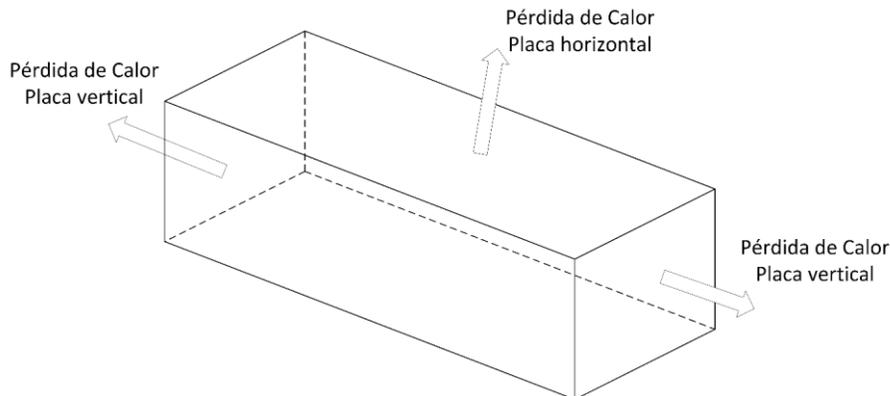


Figura 3.3 Esquema de las pérdidas térmicas en el secador.

3.4.2.1. Modelo de cálculo pérdidas térmicas

En el secador existe una transferencia térmica desde el interior al aire ambiente del lugar. Esta se produce por convección forzada del aire interior de la cámara de secado a la pared interior, a la placa de aislación y luego a la pared exterior, por

último hay convección natural de la pared exterior con el aire ambiente. Este esquema puede verse en la Figura 3.4, cuya nomenclatura es:

- h_s : Coeficiente convectivo del aire dentro del secador
- T_s : Temperatura de secador
- T_{pi} : Temperatura de la pared interior
- k_i : Conductividad térmica del material i
- e_i : Espesor del material i
- h_a : Coeficiente convectivo del aire ambiente
- T_a : Temperatura del aire ambiente

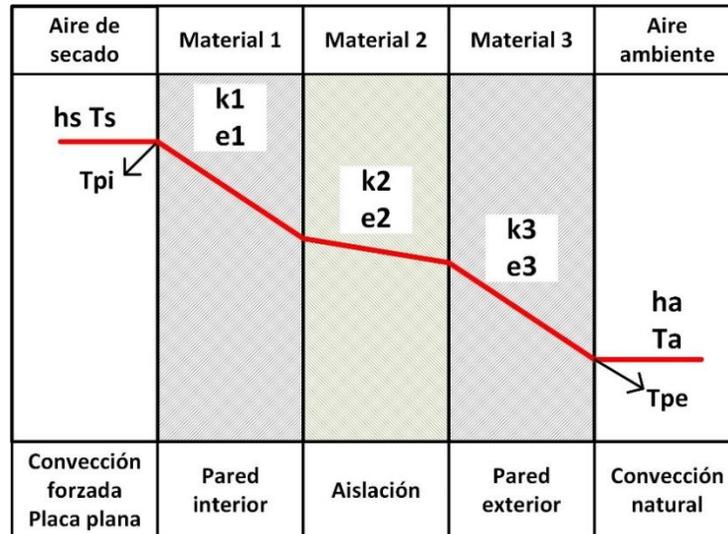


Figura 3.4 Esquema de pared secador

En la Tabla 3.1 se pueden ver las propiedades de la aislación del secador, como el espesor y la conductividad térmica.

Tabla 3.1 Propiedades de la aislación del secador.

Material	Tipo	Espesor [mm]	Conductividad térmica [W/mK]
1	Acero	2	52
2	Lana mineral	80	0,035
3	Acero	2	52

3.4.2.2. Metodología de cálculo de pérdidas en el secador

Existen dos valores que no se conocen y que son muy importantes para conocer la pérdida de calor, que se produce en el secador, que son los coeficientes de transmisión de calor del aire externo e interno, y la temperatura de las paredes internas y externas. Los coeficientes se a determinan con el procedimiento siguiente.

Las temperaturas se iteran hasta obtener 1% de error. Lo primero que se determina es el tipo de flujo de aire que existe en el secador, para esto se calcula el valor de la densidad (ρ_s) y viscosidad dinámica (μ_s) del flujo de aire con las ecuaciones 3.10 y 3.11. Las ecuaciones son correlaciones no lineales para aire seco [26]. T_{ps} es la temperatura promedio entre la temperatura de secado y la pared interna del secador.

$$\rho_s = \frac{351,99}{T_{ps}} + \frac{344,84}{T_{ps}^2} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad 3.10$$

$$\mu_s = 1,4592 \cdot \frac{T_{ps}^{\frac{3}{2}}}{109,1 + T_{ps}} [10^{-6} Pa \cdot s] \quad 3.11$$

Otra variable que se calcula es el número de Reynolds del flujo de aire dentro del secador con la ecuación 3.12. En este caso se utiliza el modelo de placa plana orientada paralelamente al flujo. Si el valor de $Re < 500.000$ el flujo es laminar, si es mayor el valor el flujo es turbulento [27], la nomenclatura es la siguiente:

- V_s : Velocidad del aire dentro del secador.
- ρ_s : Densidad del aire dentro del secador.
- L_e : Largo de la placa plana.
- μ_s : Viscosidad dinámica.

$$Re_s = \frac{V_s \cdot \rho_s \cdot L_e}{\mu_s} \quad 3.12$$

La difusividad térmica (α_s) del aire de secado se calcula con la correlación no lineal de la ecuación 3.13 [26] y el número de Prandtl (Pr_s) está dado por la ecuación 3.14.

$$\alpha_s = -4,3274 + 4,1190 \cdot 10^{-2} T_{ps} + 1,5556 \cdot 10^{-6} T_{ps}^2 \quad 3.13$$

$$Pr_s = \frac{\mu_s}{\rho_s \cdot \alpha_s} \quad 3.14$$

Con estos valores se obtiene el Nusselt (Nu_s) con la ecuación 3.15 o 3.16, dependiendo si el flujo es laminar o turbulento respectivamente.

$$Nu_s = 0,332 \cdot Pr_s r^{\frac{1}{3}} \cdot Re_s^{\frac{1}{2}} \quad 3.15$$

$$Nu_s = 0,0296 \cdot Pr_s r^{\frac{4}{5}} \cdot Re_s^{\frac{1}{3}} \quad 3.16$$

Se calculan los siguientes parámetros para aire seco, el calor específico (Cp_a) con la ecuación 3.17 [26] y la conductividad térmica (k_s) de éste con la ecuación 3.18.

$$Cp_a = 1.030,5 - 0,19975 \cdot T_{ps} + 3,9734 \cdot 10^{-4} \cdot T_{ps}^2 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] \quad 3.17$$

$$k_s = \rho_s \cdot \alpha_s \cdot Cp_s \quad 3.18$$

Para completar la caracterización del aire dentro del secador se calcula el coeficiente convectivo con la ecuación 3.19.

$$h_s = Nu_s \cdot \frac{k_s}{L_e} \quad 3.19$$

Para completar el modelo de transferencia de calor se calculan las características del aire ambiente alrededor del secador, para esto se emplean las ecuaciones 3.10, 3.11, 3.13, 3.17 para obtener la densidad, la viscosidad dinámica, la difusividad térmica y el calor específico respectivamente. En este caso se calcula la temperatura promedio entre la temperatura ambiente y la temperatura de la pared exterior del secador (T_{pa}).

Con la ecuación 3.14 se calcula el número de Prandtl y con las ecuaciones 3.20 y 3.21 se calculan los números de Grashof (Gr_a) y Rayleigh (Ra_a).

$$Gr_a = \frac{g \cdot L_e^3}{T_{pa}} \cdot \frac{\rho_a^2}{\mu_a^2} \cdot (T_{pe} - T_a) \quad 3.20$$

$$Ra_a = Gr_a \cdot Pr_a \quad 3.21$$

Con estos valores se puede calcular el número de Nusselt (Nu_a) para el aire ambiente en las paredes del secador con la ecuación 3.22.

$$Nu_a = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_a^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr_a} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad 3.22$$

Para el techo del secador se calcula en Nusselt, con el modelo de placa plana cara arriba, con la ecuación 3.23 para $Ra_a < 10^7$ y con la ecuación 3.24 para $Ra_a > 10^7$.

$$Nu_a = 0,54 \cdot Ra_a^{\frac{1}{4}} \quad 3.23$$

$$Nu_a = 0,15 \cdot Ra_a^{\frac{1}{3}} \quad 3.24$$

Con la ecuación 3.25 se calcula el coeficiente convectivo del aire ambiente y con este se tienen todos los datos para calcular el coeficiente global de transferencia de calor U_L entre el interior y el exterior del secador.

$$\frac{1}{U_L} = \frac{1}{h_s} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{h_a} \quad 3.25$$

La temperatura de pared es un datos seleccionado para obtener los parámetros de transferencia de calor, para obtener un resultado preciso se calculan las temperaturas de pared y se itera sobre estos dato hasta que el error sea menor al 1%. Con las ecuaciones 3.26 - 3.29 se calcula el flujo de calor a través de la pared, la temperatura de pared interior, la temperatura de pared exterior y el error del modelo.

$$q_L = U_L \cdot (T_s - T_a) \quad 3.26$$

$$T'_{pi} = T_s - \frac{q_L}{h_s} \quad 3.27$$

$$T'_{pe} = T'_{pi} - q_L \cdot \left(\frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} \right) \quad 3.28$$

$$e = \frac{|T - T'|}{T} \% \quad 3.29$$

3.4.3. Pérdidas de presión del flujo de aire interior

3.4.3.1. Descripción del Flujo de Aire en el Secador

El flujo aire en el secador es potenciado, en el techo del secador por ventiladores, inmediatamente a un lado de éstos se encuentran los radiadores y luego se ubican ductos de aire para conducir el flujo hacía el secador. En la Figura 3.5 se muestra un diagrama del flujo de aire y las pérdidas de presión a considerar.

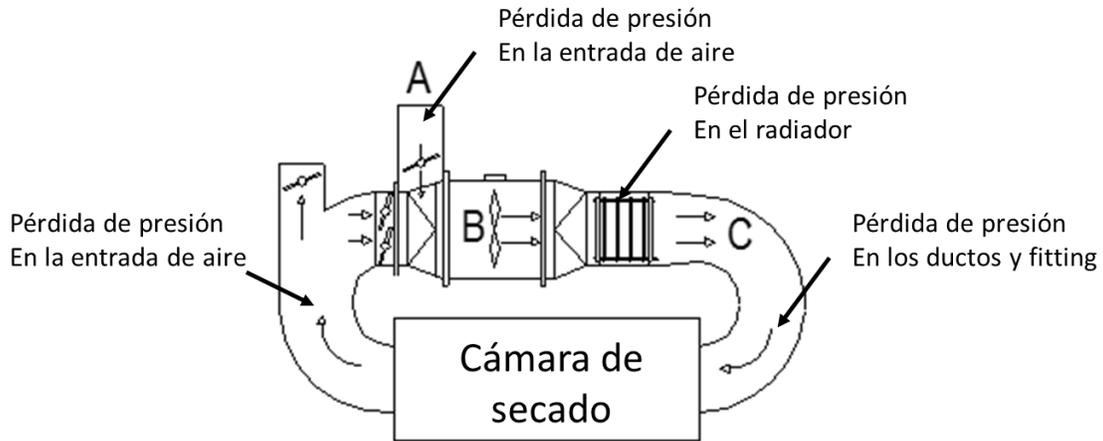


Figura 3.5 Descripción del flujo de aire y las pérdidas de presión.

3.4.3.2. Metodología de cálculo pérdidas de presión de flujo de aire interior de cada zona

La metodología de cálculo permite determinar la pérdida de presión total del flujo de aire en cada zona del secador, calculando en cada caso las pérdidas descritas anteriormente. La pérdida a la entrada de aire se considera dentro de las pérdidas de fitting como singularidad, en el caso del radiador se considera una pérdida de carga típica de 160 [Pa] y, para los ductos y fitting se emplea la metodología estándar [27]. A continuación se describe en detalle la metodología de cálculo empleada.

3.4.3.3. Parámetros Generales del Flujo

Para obtener los parámetros generales del flujo que permiten calcular posteriormente las pérdidas de presión en ductos y singularidades, se emplean las características típicas de los ductos del secador; que se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros del ducto típico del secador.

Ancho ducto [m]	Alto ducto [m]	Caudal volumétrico mínimo [m³/h]
0,45	0,68	5.670

De acuerdo a la geometría del ducto típico en el secador, se calcula el diámetro hidráulico para sección rectangular con en la ecuación 3.30, donde: i) w es el ancho del ducto, y ii) h es la altura del ducto.

$$d_h = \frac{2 \cdot w \cdot h}{w + h} \quad 3.30$$

A continuación se obtiene la velocidad del flujo del aire que pasa por los conductos, donde: Q_f es el flujo de aire que pasa por el conducto.

$$v_f = \frac{Q_f}{w \cdot h} \quad 3.31$$

3.4.3.4. Pérdida de presión en ductos

Estas pérdidas consideran el ducto empleado y el largo del trayecto del flujo, sin importar las singularidades que existan en el camino. Para estimar las pérdidas primero se calcula la presión dinámica del aire, en este caso en el punto C de entrada al secador, con la ecuación 3.32 donde ρ_f es la densidad del aire en el punto C del ciclo de secado (según Figura 3.5).

$$Pd_f = \rho_f \cdot \frac{v_f^2}{2} \quad 3.32$$

Con la ecuación 3.33 el número de Reynolds del flujo de aire, donde μ_f es la viscosidad dinámica del aire en el punto C del diagrama de la Figura 3.5.

$$Re_f = \rho_f \cdot d_h \cdot \frac{v_f}{\mu_f} \quad 3.33$$

Con el número de Reynolds se puede obtener el coeficiente de fricción, empleando la correlación de Churchill. A continuación se muestra el cálculo de los coeficientes A y B de la correlación de Churchill con las ecuaciones 3.34 - 3.36 respectivamente. El k es la rugosidad del material del ducto, en este caso se emplea Acero Galvanizado para el cual se considera una rugosidad de 0,05 mm.

$$A = \left\{ -2,457 \cdot \ln \left[\left(\frac{7}{Re_f} \right)^{0,9} + \left(\frac{k}{3,7 \cdot d_h} \right) \right] \right\}^{16} \quad 3.34$$

$$B = \left(\frac{37,53}{Re_f} \right)^{16} \quad 3.35$$

$$f = 8 \cdot \left(\left(\frac{8}{Re_f} \right)^{12} + (A + B)^{-32} \right)^{\frac{1}{12}} \quad 3.36$$

Conociendo el coeficiente de fricción (h_f) se determina la pérdida de presión a lo largo del ducto con la ecuación 3.37, donde L es el largo del ducto.

$$h_f = f \cdot \frac{L}{d_h} \cdot P d_f \quad 3.37$$

3.4.3.5. Pérdida de presión en fitting

La ecuación 3.38 muestra el cálculo de la pérdida de presión en una singularidad x, lo complejo de este método es conocer el factor de fricción del Fitting F_x . Por otro lado del punto del ciclo donde se encuentre la singularidad la densidad del aire cambia.

$$h_x = F_x \cdot P d_f \quad 3.38$$

Para el factor de fricción en cada caso se emplean valores publicados en la literatura, se muestran los valores de F_x empleados para el cálculo de la pérdida de presión en fittings en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Coeficientes de fricción típicos para diferentes fittings.

Fitting	Coeficiente de fricción (F_x)	Fitting	Coeficiente de fricción (F_x)
Codo 90° corto	1,3	Flujo de entrada de un espacio	0,35
Codo 90° con paletas	0,7	Reducción cónica	0,05
Codo 90° redondeado con $D < 1$	0,5	Rejilla 70% del área	3
Codo 90° redondeado con $D > 1$	0,25	Rejilla 60% del área	4
Codo 45° corto	0,5	Rejilla 50% del área	6
Codo 45° redondeado con $D < 1$	0,2	Rejilla 40% del área	10
Codo 45° redondeado con $D > 1$	0,005	Rejilla 30% del área	20
T flujo separado	0,3	Rejilla 20% del área	50
Flujo de salida a un espacio	1		

Fuente: [27]

4. Resultados

En la siguiente sección se describen los resultados de este trabajo, según los objetivos específicos.

4.1. Investigación conceptual de mecanismos de distorsión de las paletas

Uno de los principales impulsores de los defectos de secado es el colapso celular, este no es un defecto ocasionado por las contracciones propias del secado; que está por debajo del punto de saturación de las fibras. Ocurre durante la evacuación del agua libre y es debido a la reducción o deformación de la cavidad celular. Las altas temperaturas a las que son sometidas las paletas y el rápido secado superficial, que es producido por el aire de secado, es lo que produce estos defectos.

Desde un punto de vista celular la poca impermeabilidad de las células y la falta de entrada de aire para reemplazar el agua que sale de las cavidades por fuerzas capilares, es el mecanismo responsable de la producción de tensiones capilares de varias atmósferas que exceden la resistencia de compresión y aplastan las paredes [28].

Los principales defectos que se producen son los alabeos tangenciales y longitudinales, esta condición es definida como una distorsión de la forma original que tiene la madera cuando se seca y está relacionada con la forma de desbobinado de la madera. Esto se debe a que la madera presenta anisotropía en todas las direcciones; por ejemplo presenta el doble de contracción en la dirección tangencial (tangente a los anillos) que en la dirección radial, esto mismo hace que se generen esfuerzos muy grandes, se produzcan torsiones y alabeos de la madera.

A continuación se muestra un análisis de los principales microproductos fabricados en la empresa. En la Tabla 4.1 se pueden apreciar los microproductos afectados por los problemas de secado y sus principales dimensiones.

La madera de hualle es utilizada solo en un tipo de palito, palo de corbata, el cual es utilizado por la marca Magnum. La producción de este tipo de palo llega a ser cerca del 8 % de la producción total en comparación con los palitos de álamo.

Tabla 4.1 Productos de álamo y hualle afectados por problemas de secado.

Productos Estándar	Espesor (e) [mm]	Ancho (B) [mm]	Largo (L) [mm]	Relación de Aspecto [L/e]	Relación de aspecto [B/e]
Palitos helados	2	10	114	53	5
Palitos corbatas	2	17	93	47	9
Cucharitas	2	18	77	45	11
Bajalenguas	2	20	148	87	12
Paleta pintura 12``	3	22	305	95	7
Paleta pintura 14``	3	29	356	111	9

En la práctica se sabe que la madera de hualle presenta menos defectos que la madera de álamo, lo cual probablemente se asocia con que la primera tiene muchas mejores propiedades mecánicas. Tomando en cuenta la estadística de la empresa se tiene que los productos de hualle tienen cerca de un 80 % de aceptación sin defectos en cambios los productos de álamo tienen un mayor rechazo, llegando a un 60 % los productos que no tienen defectos. Esta gran diferencia de los productos sin deformación durante el secado se puede atribuir a la diferencia que tiene en densidad la madera de álamo que es cerca de un 50 % menor que la de hualle, también a las propiedades mecánicas que posee la madera hualle; que son superiores a las de la madera de álamo.

Para el estudio de la fenomenología de los problemas de secado de microproductos se debe tener que analizar las distintas propiedades físico-mecánicas de las maderas, para lo anterior se toman en cuenta la densidad y la contracción de la madera de álamo y hualle.

De la Tabla 4.2 se puede ver como la densidad aparente en estado verde y en estado seco de la madera de hualle es de 1.042 y de 778 kg/m³ respectivamente, es mucho mayor que la madera de álamo que tiene una densidad aparente 758 kg/m³ en estado verde y 433 kg/m³ en estado seco.

De la Tabla 4.2 se puede desprender que la contracción de estado verde a estado seco es muy parecida entre las maderas; por ejemplo si se compara la contracción volumétrica del hualle es de 12,9 % y la del álamo es de 11,4 %.

Tabla 4.2 Densidad de álamo y hualle en estado verde y seco

Especie	Densidad [kg/m ³]				Contracción %		
	Estado verde		Estado seco		Tangencial	Radial	Volumétrica
	Aparente	Anhidra	Aparente	Anhidra			
Álamo	758	360	433	374	8,0	3,4	11,4
Hualle	1.042	613	778	654	8,3	4,6	12,9

En la Figura 4.1 se puede ver como existe una relación directa de la densidad con las propiedades mecánicas, también se observa como las propiedades mecánicas del hualle son mucho mayores que las del álamo. Si se compara el estado más denso de ambas especies el hualle tiene el doble de densidad que el álamo, un módulo elástico que es cercana a 150 % superior y un módulo elástico de 80 % mayor.

De la Figura 4.1 el álamo presenta una anomalía importante cuando la densidad llega a unos 320 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ disminuyendo sus propiedades mecánicas abruptamente, también se puede ver que a medida que aumenta la densidad las propiedades van disminuyendo.

El otro caso que se ve en la Figura 4.1 es el comportamiento del hualle, este tiene una anomalía cerca de 610 $[\text{kg}/\text{m}^3]$; pero a diferencia del anterior caso las propiedades mecánicas van creciendo con el aumento de densidad.

Para evaluar la tendencia al colapso por tensiones de secado se desarrolló un modelo muy básico que permite identificar las principales variables que controlan el fenómeno. Las ecuaciones que gobiernan provienen de las tensiones térmicas que se desarrollan en el palito y del criterio de inestabilidad elástica de elementos esbeltos, según se aprecia a continuación.

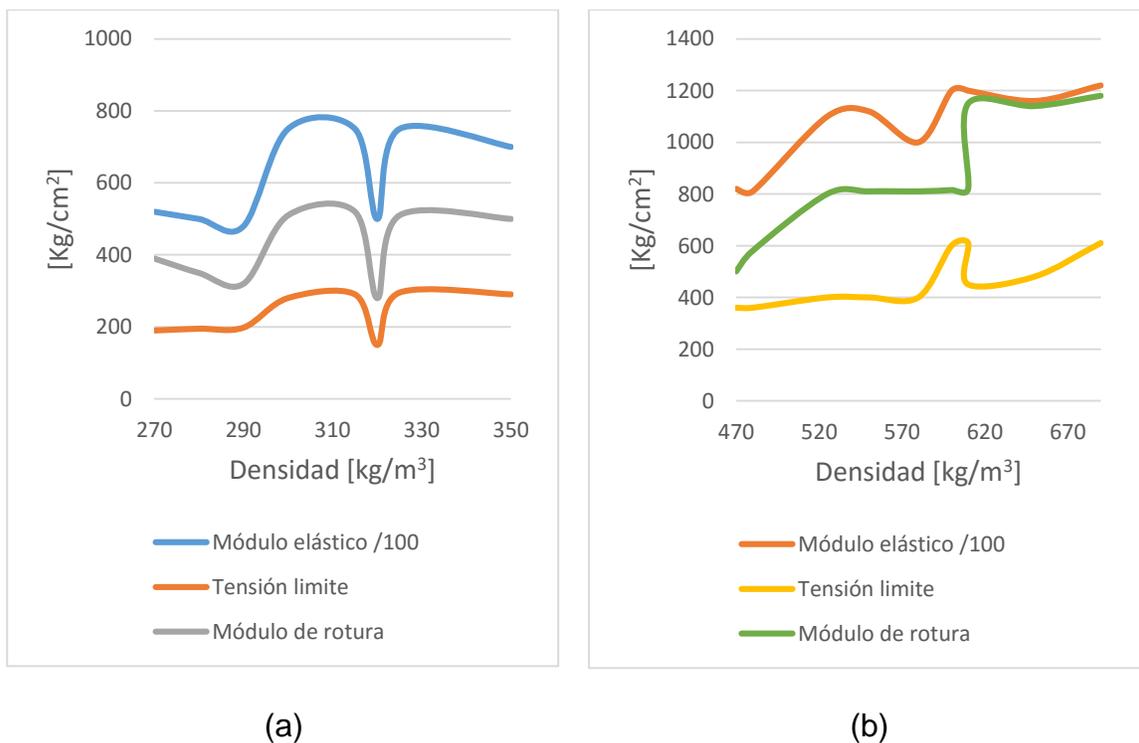


Figura 4.1 Comparación de las propiedades mecánicas de álamo (a) y Roble- huelle (b) como función de la densidad anhidra.

El esfuerzo (σ) inducido por una gradiente de temperatura (ΔT) viene dado por la ecuación 4.1, siendo E el módulo elástico del material y α el coeficiente de dilatación lineal.

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad 4.1$$

El esfuerzo crítico de colapso elástico viene dado por la expresión 4.2, siendo L/r la relación de aspecto del elemento en estudio.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(L/r)^2} \quad 4.2$$

Donde:

- E= Módulo Elástico [kg/cm²]
- I =Momento de inercia [cm⁴]
- L= largo del palo [cm]
- r=Radio de giro mínimo [mm]

La inestabilidad elástica se produce cuando σ es mayor o igual a σ_{cr} , de donde se deduce la ecuación del límite de colapso, ecuación 4.4. En ella se ha introducido la contracción volumétrica (β) para tener en cuenta las variables relevantes de secado.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \rightarrow \frac{L}{r} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{cr}}} \quad 4.3$$

$$\frac{L}{r} = \pi \sqrt{\frac{N_{CT}}{\beta}} \quad 4.4$$

$N_{CT} = \frac{\beta E}{\sigma_y}$ Es un número de colapso térmico y el σ_y es el límite de fluencia del material.

Según este modelo, el colapso de las paletas y otros microproductos de madera (álamo y hualle) está controlado por sus propiedades elásticas y por la relación de aspecto del elemento.

En base a este modelo de colapso se construyó la Figura 4.2 donde se aprecia la relación entre N_{CT} y la densidad adimensional para productos de álamo y hualle cuyas propiedades fueron informadas en la Figura 4.1. Considerando la génesis experimental de los datos, la correlación entre estas variables se considera muy buena e indica que efectivamente la densidad y las propiedades elásticas de la madera controlan el colapso termomecánico de los productos.

Por otro lado, en la Tabla 4.3 se muestra la relación de aspecto entre los productos de TEMSA, indicando que prácticamente todos los productos de interés presentan

una alta tendencia al colapso en dos direcciones (en sus ejes de mayor y de menor inercia). Los palitos para helados, las corbatas y los baja-lengua presentan una baja tendencia al colapso en su eje de mayor inercia, pero sin duda que se colapsan en su eje de menor inercia.

A la luz de este primer modelo de análisis de colapso de los productos, se aprecia que dada la configuración geométrica de ellos es factible que una gran proporción se colapse de manera inherente. No obstante ello, dado que el efecto de la variable temperatura no se ha analizado, es factible que ésta se convierta en la variable de control. Por otro lado, el modelo de análisis tiene la debilidad de basarse en propiedades informadas en la literatura; lo que abre una nueva posibilidad de control de colapso.

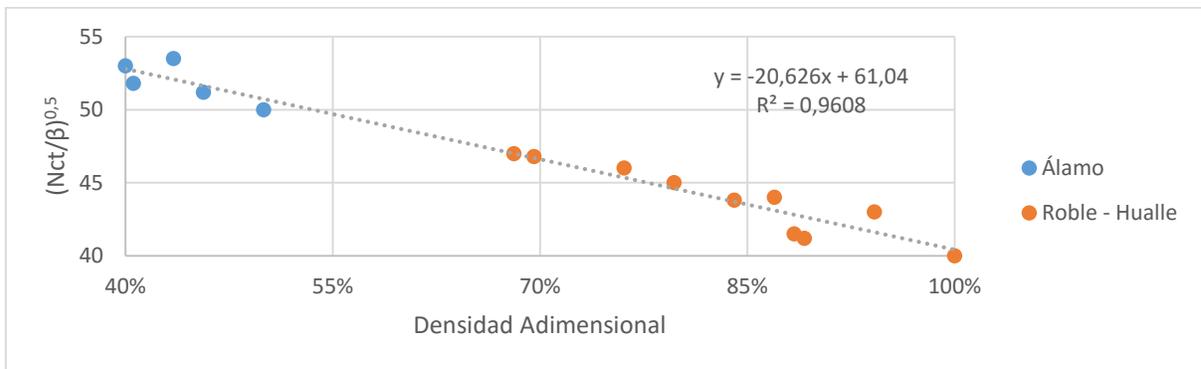


Figura 4.2 Relación N_{CT} de la densidad de la madera de álamo y hualle.

Tabla 4.3 Relación de aspecto de los productos estándar de TEMSA.

Productos Estándar	L/r_x	L/r_y
Palitos helados (normales)	38,7	183,7
Palitos helados 93 mm.	31,6	149,8
Palitos corbatas	19,0	161,1
Cucharitas	14,8	156,9
Bajalenguas	25,6	301,6
Chopsticks	52,6	157,8
Paleta pintura 12``	48,0	330,0
Paleta pintura 14``	43,1	348,9

r_x : Radio de giro mínimo en eje x.

r_y : Radio de giro mínimo en eje y.

4.2. Estudios experimentales de pérdida de presión en lechos de paletas.

En la siguiente sección se muestra la caracterización del ventilador y también los resultados de los estudios experimentales de pérdida de presión.

4.2.1. Caracterización del ventilador del set up experimental

Para saber las características del ventilador del set up experimental (ver Figura 3.1), se realizaron diferentes mediciones que permitieron conocer el caudal máximo y la presión máxima del equipo. Se efectuaron pruebas de flujo máximo y de presión máxima empleando con un tubo de Pitot y un manómetro diferencial U.

El procedimiento utilizado en la caracterización del ventilador se describe a continuación:

- Se desmonta el ventilador del set up experimental.
- Se monta en la salida del ventilador un ducto para el montaje del tubo de Pitot.
- Se energiza el ventilador.
- Se hacen 3 mediciones con el manómetro diferencial para determinar el caudal máximo
- Se apaga el ventilador y se tapa la entrada al ventilador
- Se realizan 3 mediciones con el manómetro diferencial para determinar la presión máxima.

El caudal está dado por la ecuación 4.5 y la velocidad está dado por la ecuación 4.6.

$$Q = V \cdot A \quad 4.5$$

$$V = \sqrt{2gh\left(\frac{\rho_l}{\rho_a}\right)} \quad 4.6$$

Donde:

- Q: Caudal [m^3/s]
- V: Velocidad [m/s].
- g: Aceleración de gravedad en Santiago 9,8187 [m/s^2]
- A: Área de la sección [m^2]
- h: Altura manométrica [m]
- ρ_l : Densidad del líquido manométrico 969 [kg/m^3]
- ρ_a : Densidad del aire

Según ISO 5801 [29] la densidad del aire se calcula con la ecuación 4.7.

$$\rho_a = \frac{p_a - 0,378p_v}{287 \theta_a} \quad 4.7$$

Donde:

- p_a : 101.325 [Pa].
- θ_a : 273,15+ Temperatura bulbo húmedo [°K].
- p_v : Presión de vapor ($p_v = p_{\text{sat}} - p_a \times 6,6 \times 10^{-4} \times (T_{\text{b seco}} - T_{\text{b húmedo}}) \times (1 + 0,0015 T_{\text{b húmedo}})$).
- P_{sat} : $\exp((17,438 T_{\text{b seco}} / (239,78 + T_{\text{b seco}})) + 6,4147)$.
- $T_{\text{b seco}}$: Temperatura de bulbo seco.
- $T_{\text{b húmedo}}$: Temperatura de bulbo húmedo.

En la Figura 4.3 se muestra la curva característica del ventilador. La velocidad del aire y la presión máxima del equipo son inversamente proporcionales, porque si una aumenta, la otra disminuye; por ejemplo un aumento de la velocidad del aire provoca una disminución de la presión total.

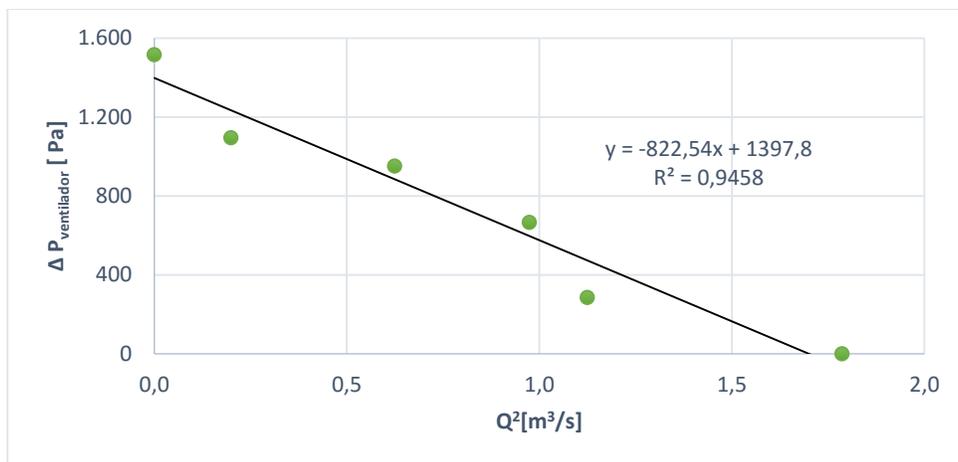


Figura 4.3 Curva característica ventilador (Δ Presión vs Caudal [m^3/s^2])

4.2.2. Estudios experimentales de pérdida de presión en lechos de paletas

Los estudios experimentales fueron realizados en el equipo mostrado en la Figura 3.1. En el Anexo A se pueden ver fotografías del desarrollo experimental.

En la Figura 4.4 se muestran los resultados para diferentes alturas de lechos de paletas, entre 5 a 20 [cm] de altura. Se puede ver como a mayores caudales la pérdida de presión en la lechos de paletas es alta, también se puede ver como el aumento de altura de las paletas de pintura en la cámara de pruebas provoca un incremento de la pérdida de presión.

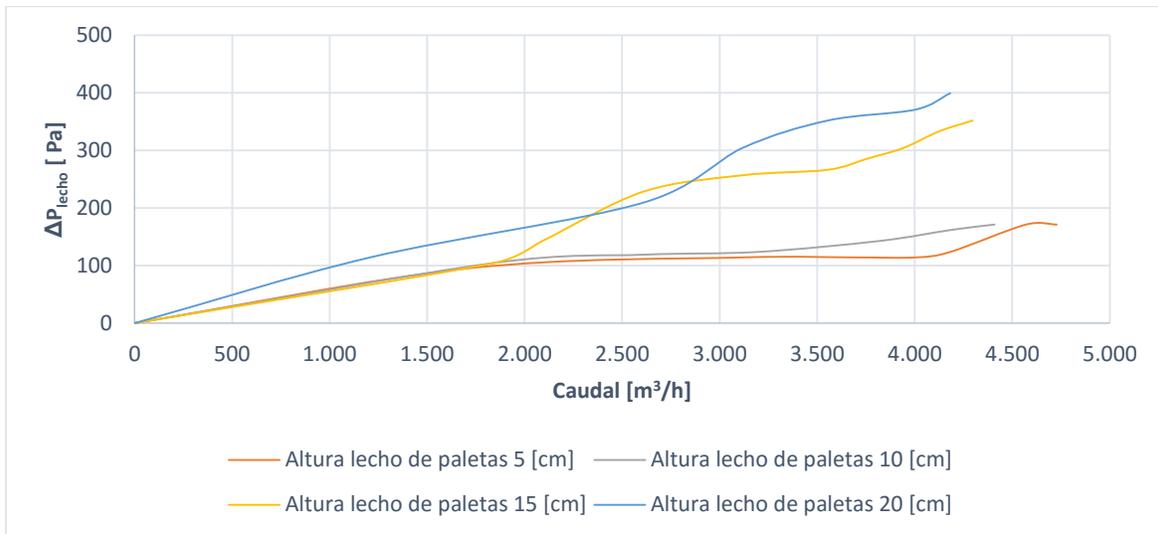


Figura 4.4 Curvas experimentales ΔP - Q para lechos de paletas de 5 a 20 cm de espesor

Para el análisis de los resultados anteriores se utiliza la ecuación 4.8 que es una simplificación de la ecuación de Ergun presentada en la sección 2.2.4.

$$\Delta P = K Q^n \quad 4.8$$

Para obtener los valores de k y n se emplea un método de regresión múltiple ajustando todos los resultados experimentales con $n=0,9$. Con este método también es posible obtener una correlación para k , como una función del espesor del lecho. Los resultados de este análisis se aprecian en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Ajuste de los datos ΔP - Q a una ecuación Ergun potencial

Altura de lecho de paletas [cm]	Ecuación de la regresión	R^2
5	$\Delta P = 148,94 Q^{0,9}$	0,87
10	$\Delta P = 173,37 Q^{0,9}$	0,95
15	$\Delta P = 337,67 Q^{0,9}$	0,95
20	$\Delta P = 405,86 Q^{0,9}$	0,98

La regresión del factor K , la resistencia del lecho, exhibe una dependencia lineal con el espesor del lecho como se muestra en la ecuación 4.9. La Figura 4.5 da cuenta de una alta dispersión de los datos, lo que se evidencia en una relativamente baja correlación ($R^2=0,96$). Se estima que este efecto está muy marcado por el comportamiento del lecho de bajo espesor y por el número de datos experimentales.

Aceptando las restricciones de los resultados obtenidos, se propone modelar la ΔP - Q de lechos de paletas con la ecuación 4.9. En la Figura 4.6 se aprecian la predicción del modelo para la ΔP - Q de lechos con espesores de 5-30 cm.

$$K = 2.005,1 e [\text{Pa} (\text{m}^3/\text{s})^{-0.9}] \quad 4.9$$

$$\Delta P = K \cdot Q^{0,9} \quad 4.10$$

Donde:

- ΔP : Pérdida de presión en lechos [Pa]
- K: Resistencia del lecho [Pa (m³/s)^{-0.9}]
- e: Altura de cama de paletas [m]
- Q: Caudal de aire [m³/s]

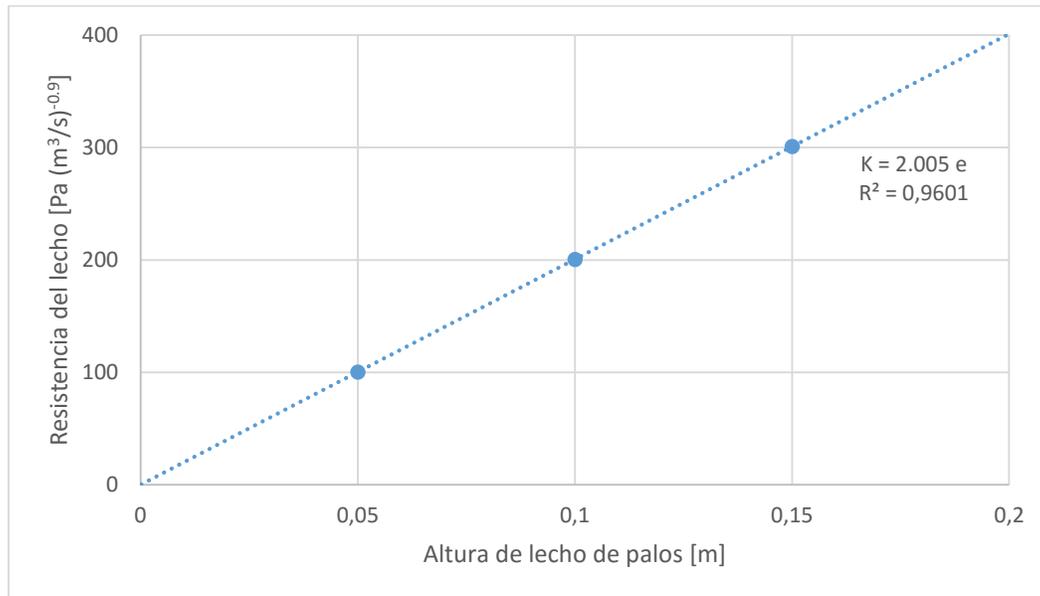


Figura 4.5 Resistencia del lecho vs Altura de lecho.

A partir de la ecuación 4.10 se fija una altura de paletas y un caudal, con estos dos datos se determina la pérdida de presión; esto puede verse en la Figura 4.6 donde están graficados los resultados para espesores de cama de paletas de 5 a 30 [cm].

La ecuación 4.10 se puede comparar con la ecuación de Ergun (ecuación 2.5). Las dos ecuaciones relacionan los caudales de aire y la altura de cama.

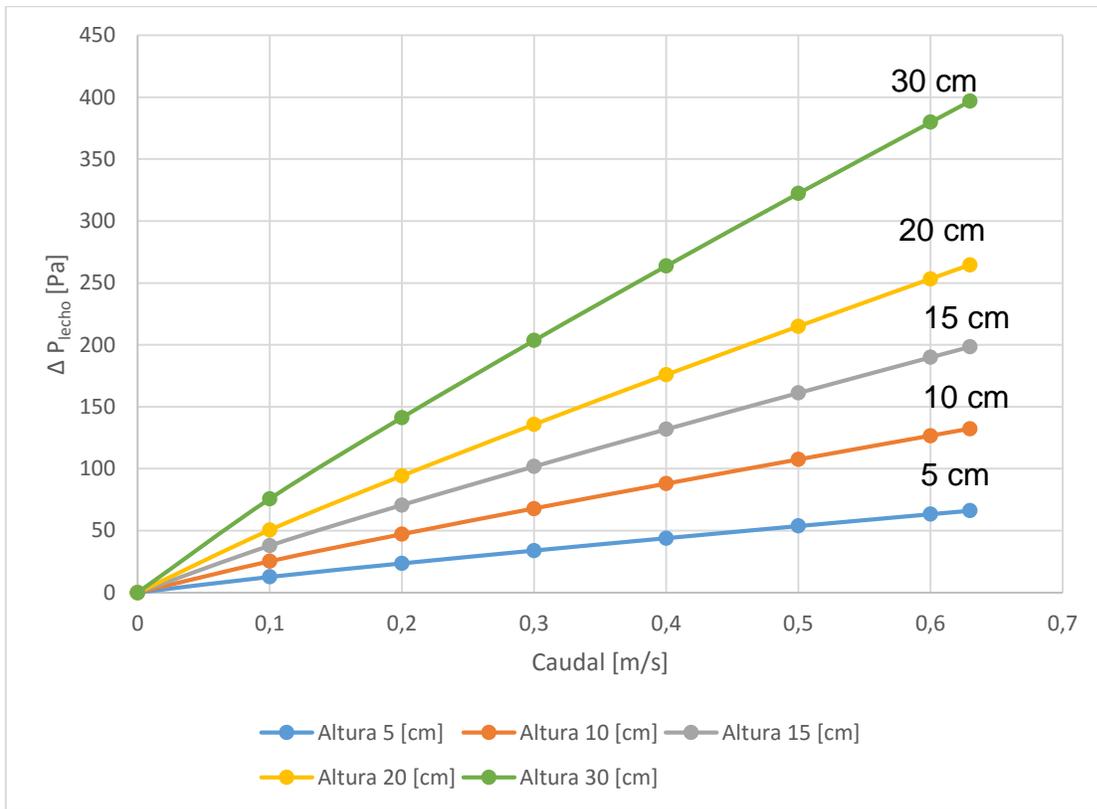


Figura 4.6 Predicciones del modelo ΔP -Q de lechos de paletas con espesores de 5-30 cm

4.3. Estudio de Mecánica de Fluidos Computacionales (CFD) de las condiciones de aireación del lecho de secado.

A continuación se presentan los resultados de los estudios que se realizaron para la mejora de la condiciones de aireación del lecho de secado.

4.3.1. Generación del modelo CAD

El primer paso es generar un modelo CAD de la geometría del dominio fluido, tarea que se realiza con los planos de construcción del equipo.

Este modelo mantiene la geometría inicial y las principales características relevantes de la caja de aire, no se toman en cuenta detalles que a nivel físico y de fabricación serían importantes en la construcción del secador, ya que no tienen mucha importancia para esta instancia.

El modelo representativo de una cámara de secado típica (caja de aire), es un paralelepípedo recto de $2,1 \times 0,75 \times 0,95 \text{ m}^3$. El aire se inyecta en por una ventana izquierda inferior de $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$ y se extrae por una ventada derecha superior de $0,25 \times 0,25 \text{ m}^2$, ver Figura 4.7.

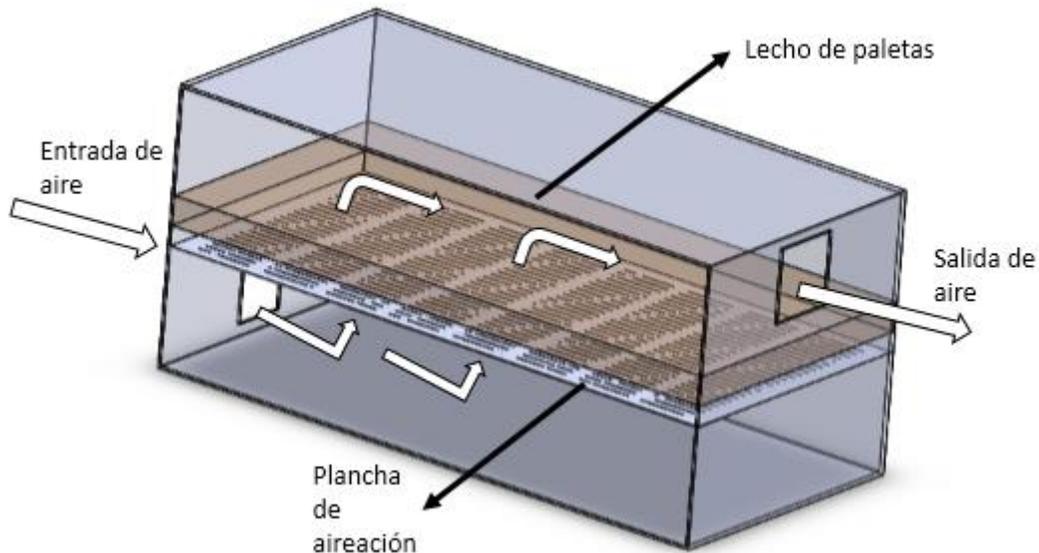


Figura 4.7 Modelo de Caja de aireación (Zona de secado)

Para poder dirigir el flujo de aire uniforme hacia el lecho de paletas, la cámara cuenta con una plancha de aireación con unas dimensiones de $2000 \times 735 \times 2 \text{ mm}^3$ con 208 ranuras de $2,8 \times 200 \text{ mm}^2$ de sección de paso de aire.

El lecho de paletas está ubicado en la parte superior de la plancha de aireación, con unas dimensiones de $2000 \times 735 \times 100\text{-}300 \text{ mm}^3$. Para modelar el lecho de paletas como un medio poroso se utiliza la ecuación 2.4.

4.3.2. Análisis CFD de la cámara de secado original

En esta sección se presenta el análisis CFD de la cámara de secado, el cual fue realizado tridimensionalmente. El primer análisis con la cámara de secado original se realiza con una velocidad de inyección de es 5 m/s.

Las condiciones de frontera que permiten analizar el problema, son: i) Inlet velocity, permite fijar la velocidad de entrada a la cámara de pruebas, en este caso 5 m/s, ii) Environment Pressure, fija la presión de salida en la cámara de pruebas, en este caso con 101.325 Pa, y iii) Adiabatic Wall, no permite intercambio de calor con el ambiente, no es importante para este análisis.

En la Figura 4.8 se puede ver un corte transversal de la cámara de secado, en éste se muestran la entrada y la salida de aire, el lecho de paletas y la ubicación de la plancha de aireación. Este esquema es el mismo para todas las figuras que se muestran a continuación.

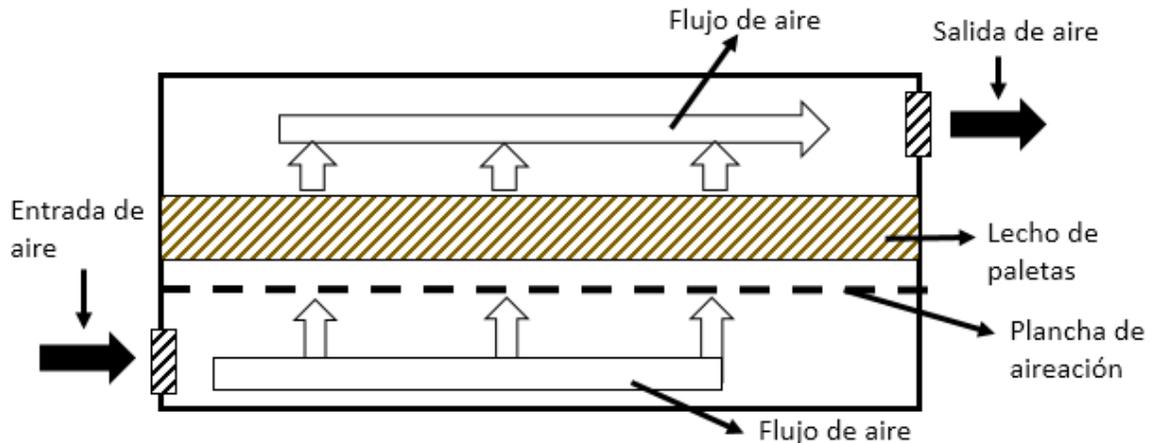


Figura 4.8 Sección típica de la cámara de aireación empleada en el análisis CFD

En la Figura 4.9 se muestra el campo de velocidad del aire dentro de la cámara de secado, en esta se fija una velocidad de entrada de 5 m/s en el lado izquierdo. El aire se distribuye en forma de jet llegando a una velocidad de 5 m/s hasta la mitad de la cámara. Hacia arriba se difunde y pierde velocidad. La velocidad de impacto en el lecho es baja, del orden de 1 – 2 m/s. La velocidad del aire que sale del lecho es baja, del orden de 0,5 m/s o menos. El flujo de aire cerca de la ventana de extracción tiende a acelerarse hasta unos 2-3 m/s en la entrada del ducto de extracción.

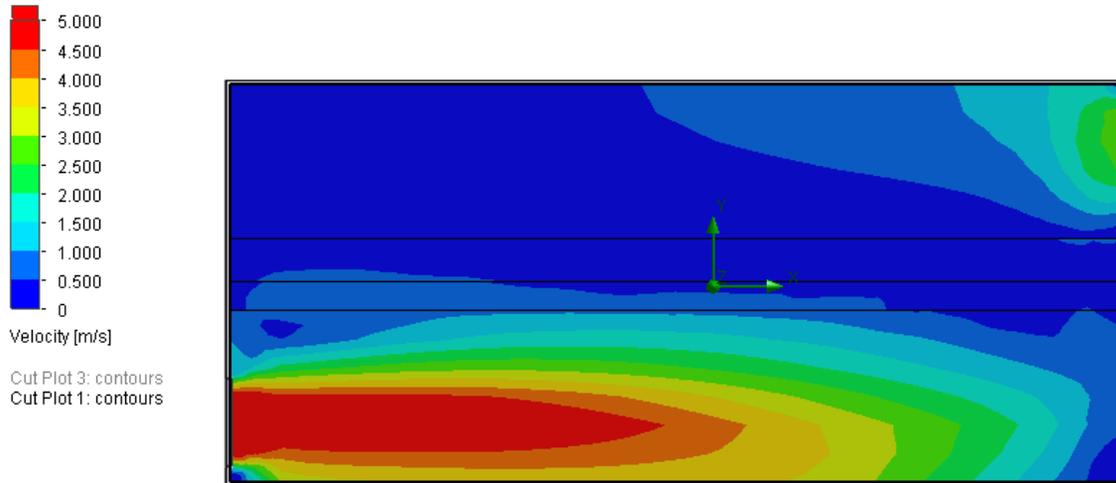


Figura 4.9 Corte transversal de la cámara de aireación

En la Figura 4.10 se muestra la velocidad del aire en la superficie superior de la plancha de aireación. El aire tiene una velocidad alta en las paredes laterales entre 1 a 2 m/s, en la zona del centro la velocidad disminuye hasta 0,5 a 1 m/s, lo que indica que el flujo no realiza una buena penetración del lecho.

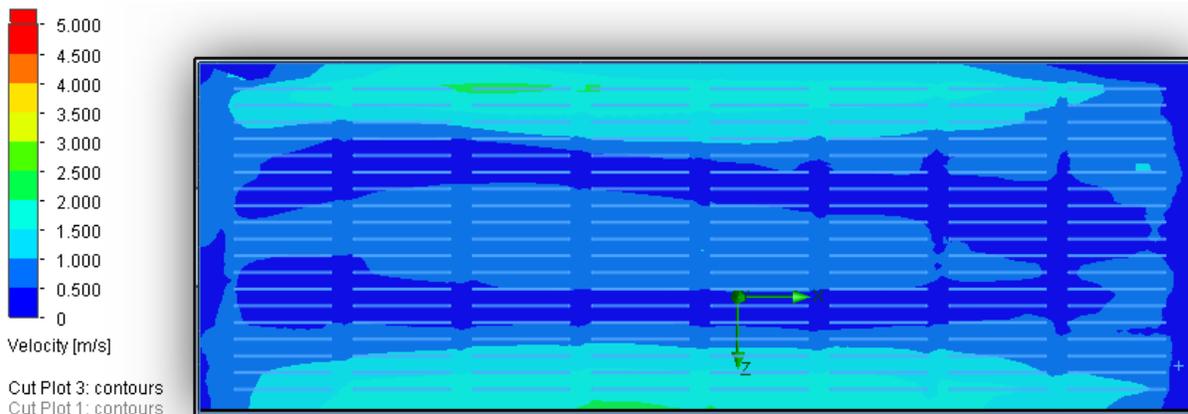


Figura 4.10 Velocidad salida desde la plancha de aireación

A partir del estudio de la cámara de secado original se concluye que la configuración de diseño posee una muy baja aireación, con un patrón de flujo preferente hacia las paredes laterales del lecho. Por lo anterior es muy probable que desarrolle baja penetración de aire en el lecho y un alta tasa de defectos de secado en las paletas.

4.3.3. Análisis CFD de cámaras de secado con patrón de flujo optimizado

Por lo visto en la sección 4.3.2 la configuración de diseño tiene una muy baja aireación y existe un patrón de flujo preferente, para solucionar lo anterior se estima que las cámaras de secado se pueden mejorar mediante:

- i) Incorporación de deflectores de flujo para favorecer el direccionamiento del flujo hacia la plancha de aireación, y/o
- ii) Aumentando la velocidad de inyección entre 10 a 20 m/s

4.3.3.1. Modificación de la velocidad de entrada al lecho de secado

El primer análisis de flujo optimizado plantea subir la velocidad de entrada entre 10 – 20 m/s.

Modelo con 10 m/s

En la Figura 4.11 se observa que el aire ingresa por el lado izquierdo a una velocidad de 10 m/s y se distribuye en forma de jet a una velocidad de 7 a 10 m/s. Hacia adelante y hacia arriba el jet se va difundiéndose y perdiendo velocidad, el impacto con el lecho de paletas en la zona media es a una velocidad cercana a 3 m/s. En la ventana de salida se observa un aumento de velocidad llegando a unos 6 m/s.

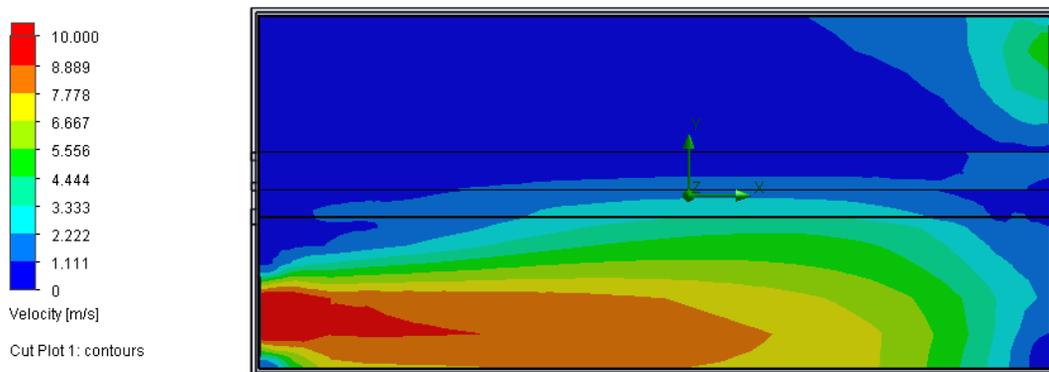


Figura 4.11 Corte transversal cámara de aireación, 10 [m/s]

En la Figura 4.12 se observa que existe flujo preferente en la zona media y en las paredes laterales donde la velocidad llega a unos 3 m/s. En otras zonas la velocidad de salida es baja llegando a 1 m/s.

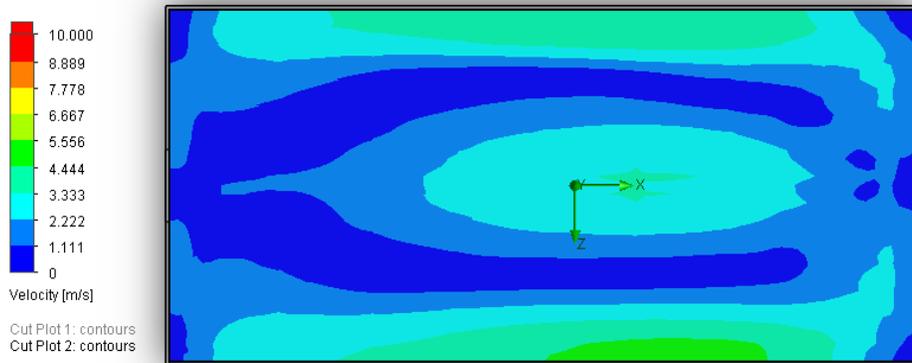


Figura 4.12 Plancha de aireación, 10 [m/s].

Modelo con 15 [m/s]

En la Figura 4.13 el aire sale por el lado izquierdo en forma de jet a una velocidad de 15 m/s, la velocidad del aire va disminuyendo a medida que se expande en la cámara de aireación, en la zona de la derecha la velocidad de aire tiene como promedio 10 m/s. La velocidad que impacta el lecho es buena llegando a unos 3 - 5 m/s. La velocidad del aire aumenta en la zona superior derecha donde se ubica la salida de aire, llegando a una velocidad de 10 m/s.

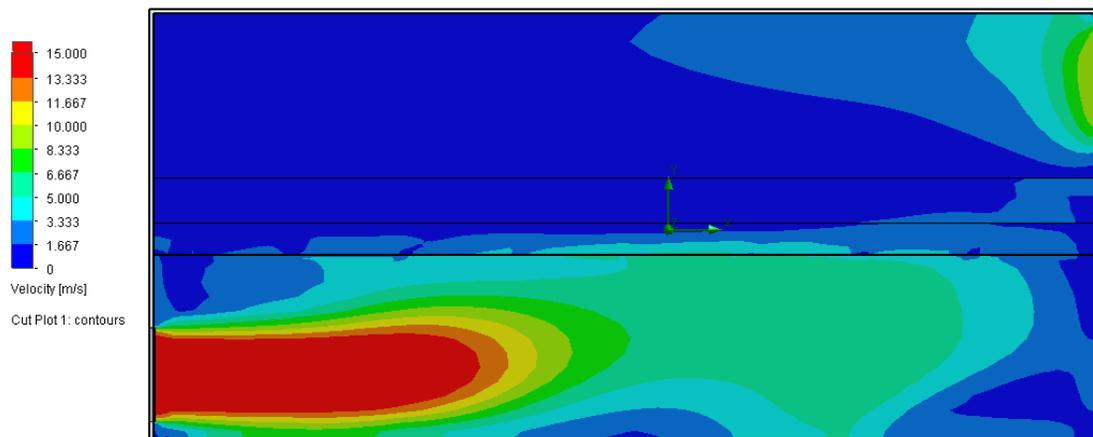


Figura 4.13 Corte transversal cámara de aireación, 15 [m/s].

De la Figura 4.14 se observa que el flujo de aire tiene una dirección preferente en las zonas media y en las paredes laterales. La velocidad promedio en algunas zonas preferentes alcanza entre 5 a 8 [m/s], en las zonas no preferentes la velocidad es de 1 a 3 [m/s].

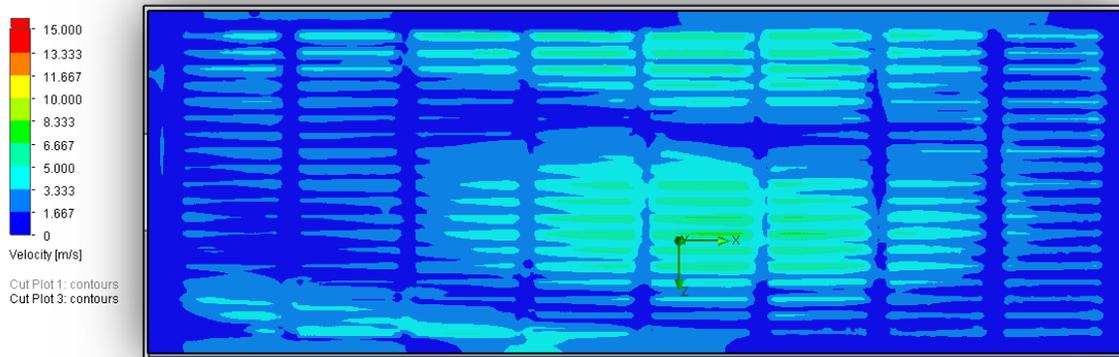


Figura 4.14 Plancha de aireación, 15 [m/s].

Modelo con 18 [m/s]

En la Figura 4.15 la velocidad de salida del lado izquierdo es de 18 m/s, se forma un jet que llega hasta la zona media de la cámara, luego la velocidad del aire va disminuyendo hacia la derecha y hacia arriba. La velocidad de impacto en el lecho es alta, llegando a unos 5 m/s en algunas zonas. El flujo en la ventana de extracción tiende a acelerarse hasta llegar a unos 15 m/s en la zona más próxima a la salida

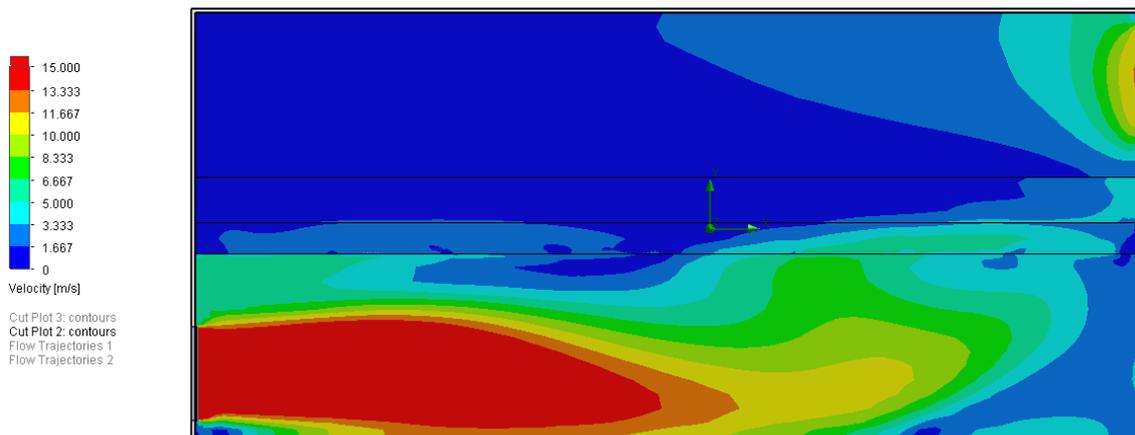


Figura 4.15 Corte transversal cámara de aireación, 18 [m/s].

En la Figura 4.16 se observa un gran flujo preferente en la zona central y en el lado superior de la figura, llegado a valores máximos de 10 m/s en otras zonas que no son preferentes la velocidad llega a los 5 m/s.

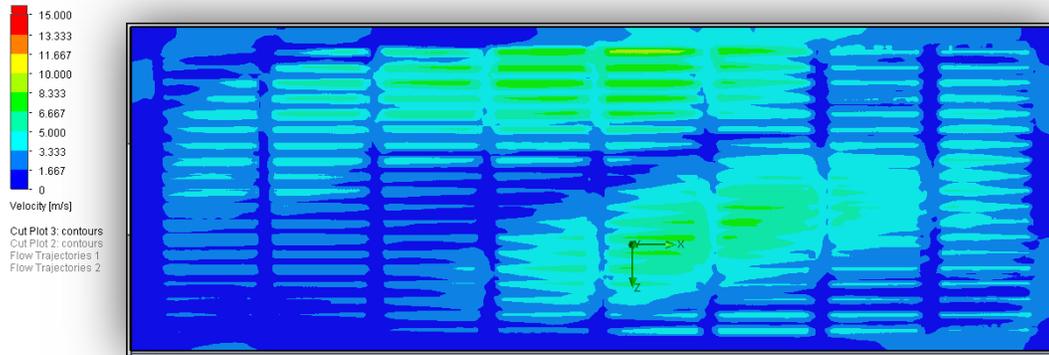


Figura 4.16 Plancha de aireación, 18 [m/s].

Modelo con 20 [m/s]

En la Figura 4.15 la velocidad de salida del lado izquierdo es de 18 m/s, se forma un jet que alcanza hasta la pared opuesta de la cámara, luego la velocidad del aire va disminuyendo hacia arriba. La velocidad de impacto en el lecho es alta, llegando a los 10 m/s en algunas zonas. El flujo en la ventana de extracción tiende a acelerarse hasta llegar a los 15 m/s en la zona más próxima de la salida

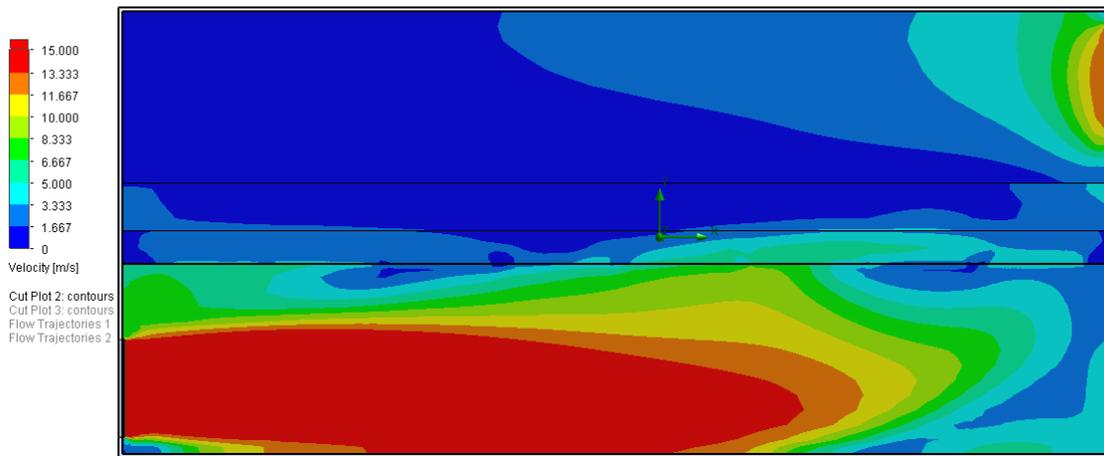


Figura 4.17 Corte transversal cámara de aireación, 20 [m/s].

En la Figura 4.18 se observa una alta velocidad en casi toda la plancha de aireación en la zona superior y en el centro, con velocidad que llegan 10 m/s. en otras zonas la velocidad llega a unos 5 m/s.

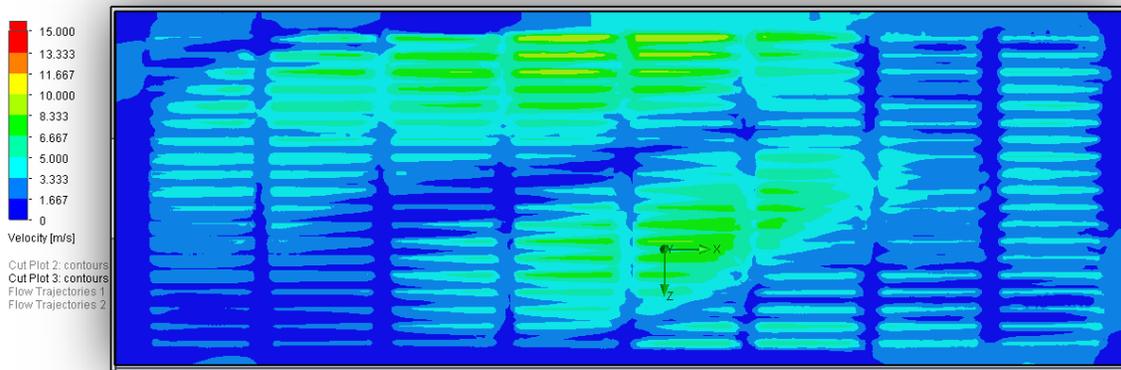


Figura 4.18 Plancha de aireación, 20 [m/s].

4.3.3.2. Análisis de la cámara de secado con la incorporación de deflectores

Los resultados del análisis CFD explorando el efecto de la velocidad de inyección muestran que no es posible conseguir mejoras que impacten sustantivamente la distribución de aire al lecho de secado, lo que promueve el desarrollo de una nueva estrategia de mejora basada en la incorporación de deflectores de velocidad; para generar componentes de velocidad que impacten al lecho.

Los deflectores son típicamente chapas rectas o curvas, dispuestas transversalmente con respecto al flujo; para desviar el flujo de aire en la dirección deseada. Para encontrar una distribución apropiada de deflectores se condujeron experimentos CFD hasta obtener una configuración muy homogénea del aire por la plancha de aireación. La Figura 4.19 muestra la configuración de deflectores finalmente aceptada para el diseño mejorado de la cámara.

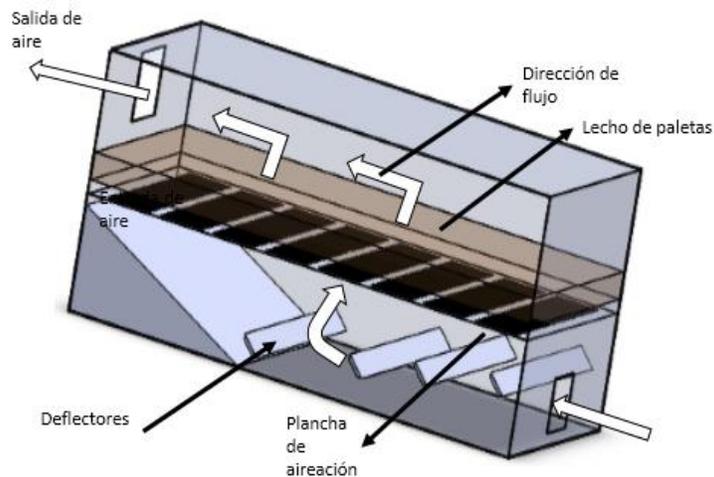


Figura 4.19 Modelo con deflectores incorporados

Modelo con 15 [m/s]

En la Figura 4.20 el aire ingresa a una velocidad de 15 m/s, los deflectores van dirigiendo el aire hacia la plancha de aireación y la cuña en la pared de la derecha permite disminuir el volumen de la cámara plena y direccionar el aire que pasa por debajo de los deflectores. A medida que el aire pasa por los deflectores va perdiendo velocidad. La velocidad que tiene el aire al impactar el lecho de paletas es buena, cerca de 5 m/s en algunas zonas y de 3 m/s en otras. En la zona de salida del aire se produce una aceleración del mismo llegando a más de 10 m/s.

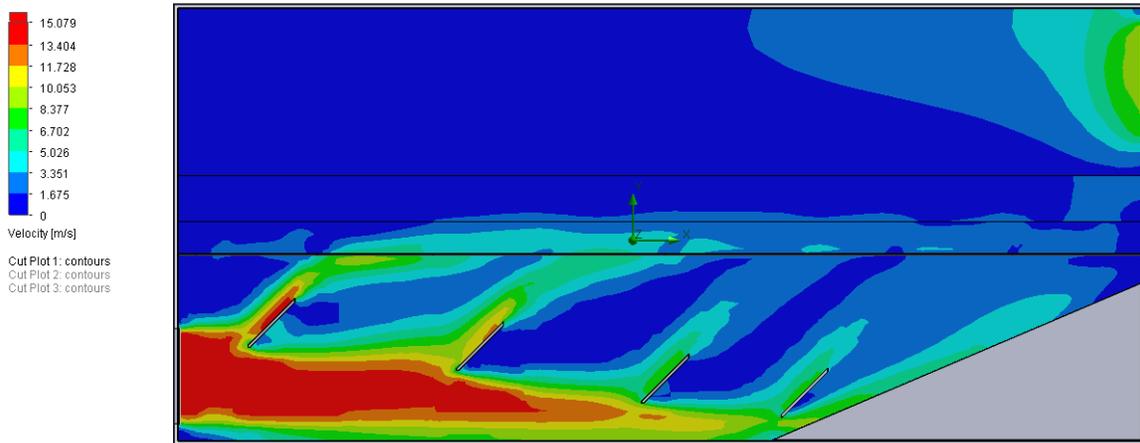


Figura 4.20 Corte transversal de la cámara de aireación, 15 [m/s].

La Figura 4.21 muestra una vista superior de la plancha de aireación, se observa que existen zonas preferentes donde el aire llega a velocidades cercanas a los 8 [m/s], en las otras zonas la velocidad es cercana a 3-5 [m/s] que es lo buscado para la plancha de aireación.

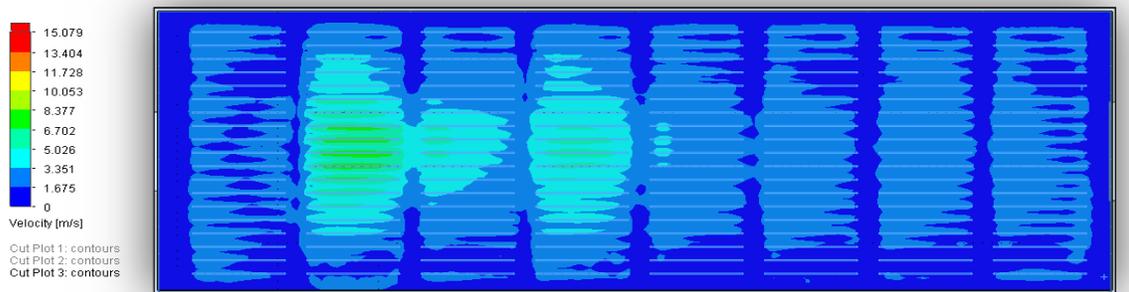


Figura 4.21 Velocidad salida plancha de aireación, 15 [m/s].

Modelo con 18 [m/s]

En la Figura 4.22 el aire ingresa por la izquierda a una velocidad de 18 m/s, los deflectores van dirigiendo el efectivamente aire hacia la plancha de aireación. A medida que el aire avanza por la cámara plena la velocidad va disminuyendo. La velocidad de impacto con el lecho de paletas es entre 5 a 10 m/s, se considera muy alta para el proceso de secado.

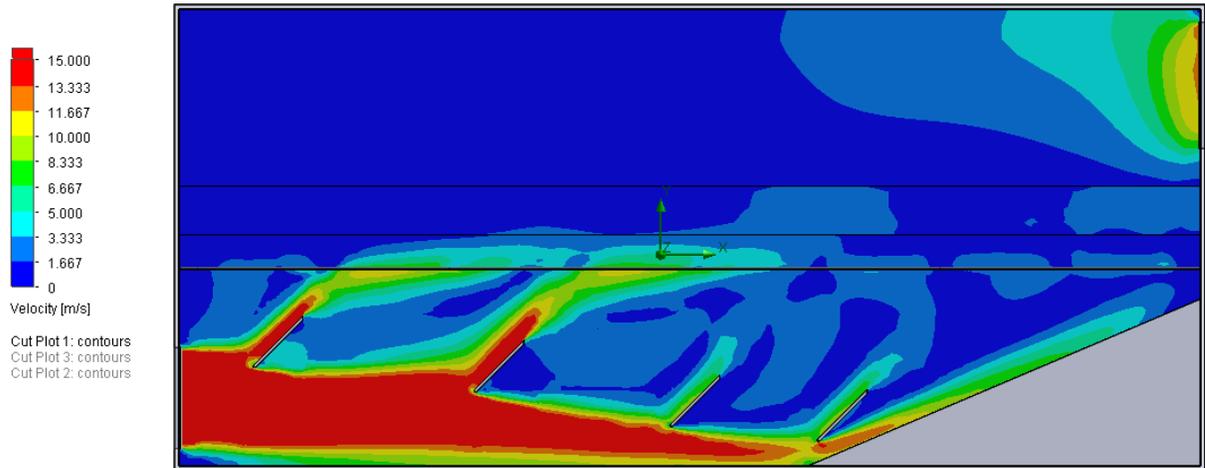


Figura 4.22 Corte transversal cámara de aireación, 18 [m/s].

La Figura 4.23 muestra una vista superior de la plancha de aireación, se observan dos zonas donde existe flujo preferencial, en éstas la velocidad del aire llega hasta unos 8 m/s; en otras zonas la velocidad de aire ronda los 3 m/s.

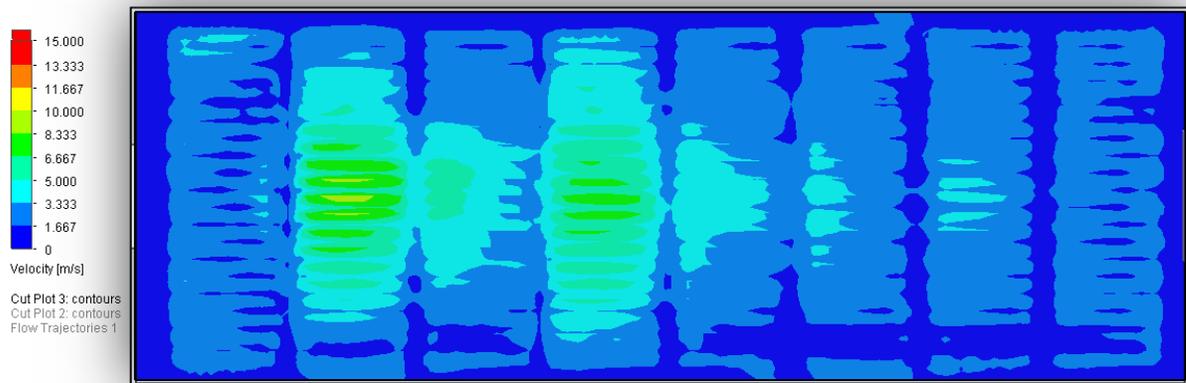


Figura 4.23 Plancha de aireación, 18 [m/s].

Modelo con 20 [m/s]

En la Figura 4.22 el aire ingresa por la izquierda a una velocidad de 20 m/s, los deflectores dirigen correctamente el aire hacia la plancha de aireación. A medida que el aire avanza por la cámara plena la velocidad va disminuyendo. La velocidad de impacto con la que llega al lecho de paletas es entre 5 -11 m/s, se considera muy alta para el proceso de secado.

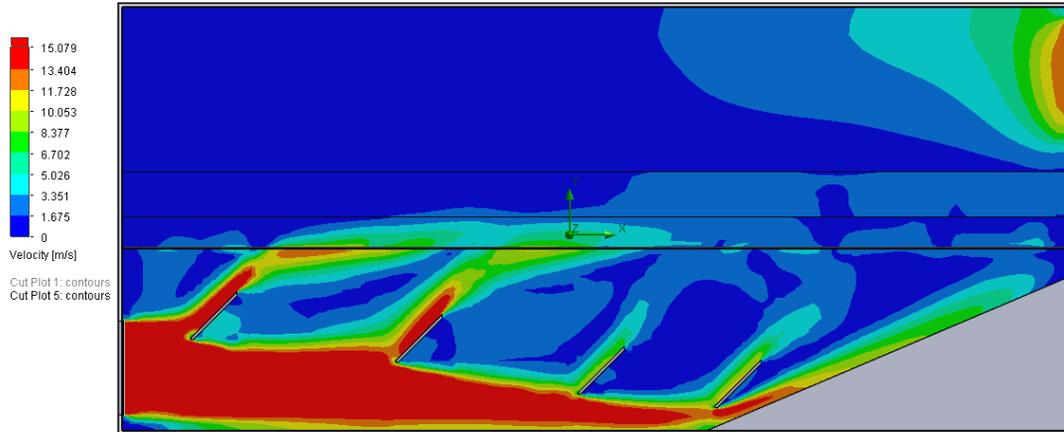


Figura 4.24 Corte transversal cámara de aireación, 20 [m/s].

La Figura 4.25 muestra una vista superior de la plancha de aireación, se observa una zona donde existe flujo preferencial, la velocidad en ésta llega a los 11 m/s como máximo, con mínimos de 5 m/s; en las otras zonas la velocidad del aire llega a unos 3 m/s.

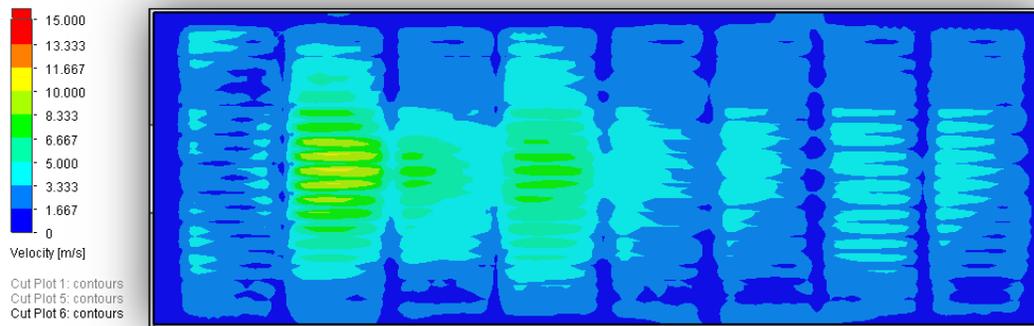


Figura 4.25 Plancha de aireación, 20 [m/s].

4.3.3.3. Conclusiones del análisis CFD de la camada de secado

- El análisis CFD de la cámara de secado original muestra flujo preferente en la plancha de aireación y baja velocidad de impacto en el lecho (1 m/s).
- El análisis CFD muestra que la velocidad mínima de aire debe ser de 15 [m/s] y no de 5 [m/s] como originalmente estaba propuesto.
- La incorporación de deflectores permite homogenizar el flujo hacia el lecho de paletas promoviendo un secado uniforme de la cama de paletas

4.4. Configuración de alta eficiencia y desempeño para los ventiladores e intercambiador convectivo ad hoc para el secador.

A continuación se muestran los resultados del balance térmico por cada una de las zonas del secador y se exponen las pérdidas de presión, para terminar con la selección de ventiladores y radiadores requerida para esta configuración optimizada.

4.4.1. Balance térmico de los ciclos de secado

A continuación se muestra los resultados del balance térmico de los ciclos de secado, de acuerdo a la metodología expuesta en la sección 3.4.1.

4.4.1.1. Balance térmico Zona 1

Para calcular la potencia de secado de la zona 1, se considera que el aire de entrada tiene temperatura ambiente, 25 °C, y sale a 90 °C (condición dada en la Tabla 2.3 para la zona 1).

La potencia de evaporación está dada por la ecuación 3.1, la potencia de calentamiento del agua contenida está dada por la ecuación 3.2 y con la con la ecuación 3.3 se determina la potencia de calentamiento de las paletas. La potencia total es la suma de todas las anteriores.

Los resultados de las distintas potencias calculadas y la potencia total necesaria en la zona 1 se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Potencia térmica de total zona 1.

Potencia	Potencia [kW]	Incidencia %
Potencia de evaporación del agua libre q_v [kW]	64,58	87,2
Potencia de calentamiento de agua libre en las paletas q_{ca} [kW]	6,05	8,2
Potencia de calentamiento de las paletas q_{cm} [kW]	3,46	4,7
Potencia total q_t [kW]	74,08	100

La Tabla 4.5 indica que la mayor potencia necesaria es la de evaporación, esto se debe al valor del calor de vaporización del agua contenida en la madera que es de 2.257 kJ/kg, luego sigue la potencia de calentamiento del agua contenida con un 8,2 % de incidencia y por último la potencia de calentamiento de las paletas. La potencia de calentamiento del agua libre en las paletas es casi el doble que la de

las paletas, porque el agua tiene un calor específico que es casi el doble que el de las paletas.

El balance térmico del ciclo de secado, para una tasa de 30 % de renovación de aire se muestra en Tabla 4.6. Los puntos A, B, C y D son relevantes para determinar el balance térmico según la Figura 4.26.

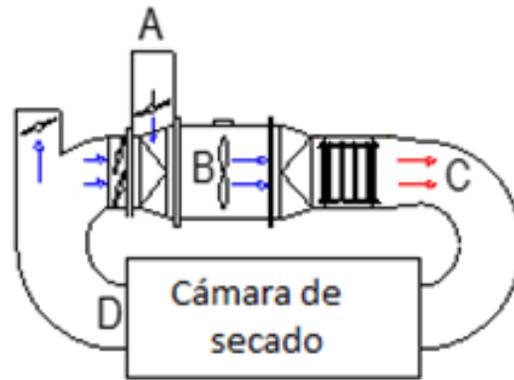


Figura 4.26 Diagrama del ciclo de secado.

Los puntos anteriores están definidos como:

- Entrada de aire ambiente (Punto A)
- Mezcla de aire ambiente y recirculado (Punto B)
- Aire de secado (Punto C)
- Aire post secado (Punto D)

Tabla 4.6 Ciclo de aire en la zona 1

Punto	Temperatura [°C]	Humedad Relativa %	Volumen específico [m³/kg]	Entalpía [kJ/kg]	Humedad Absoluta [g/kg]
A	25	35%	0,87	42,99	7,04
B	60	9%	0,98	91,40	12,88
C	90	3%	1,07	123,00	12,88
D	78	5%	1,04	115,42	15,81

De la Tabla 4.6 se puede ver que a humedad relativa del aire a la salida del secador es de 5 % y su temperatura de es 78 [°C]. A partir de los datos de la Tabla 4.6 se obtiene el ciclo de secado y se grafica en la Figura 4.27.

La potencia del ciclo se define como el cambio de entalpía del aire al pasar el lecho de palos y está definido con la ecuación 4.11. Esta potencia se debe suministrar al radiador para calentar el aire de secado, considerando la humedad del mismo y la renovación con aire fresco.

$$\text{Potencia ciclo de aire [kW]} = Q(h_c - h_b)$$

4.11

Donde:

- Q= Flujo másico de aire [kg/s].
- h_x =entalpia del punto c o b [kJ/kg].

La Figura 4.27 muestra la humedad absoluta en función de la temperatura de bulbo seco, se puede ver que en la transición de C a D existe un aumento de la humedad absoluta producto de la evacuación del agua libre de las paletas de pintura.

Con los datos de la Tabla 4.6 y con la ecuación 4.11 se determina la potencia del ciclo de aire. La eficiencia del ciclo se calcula con el cociente entre la potencia total y la potencia de ciclo de aire. Los resultados están expuestos en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Potencia del ciclo de aire y eficiencia térmica, zona 1

Potencia total q_t [kW]	Potencia del ciclo de aire [kW]	Eficiencia del ciclo de secado [%]
74	321	23

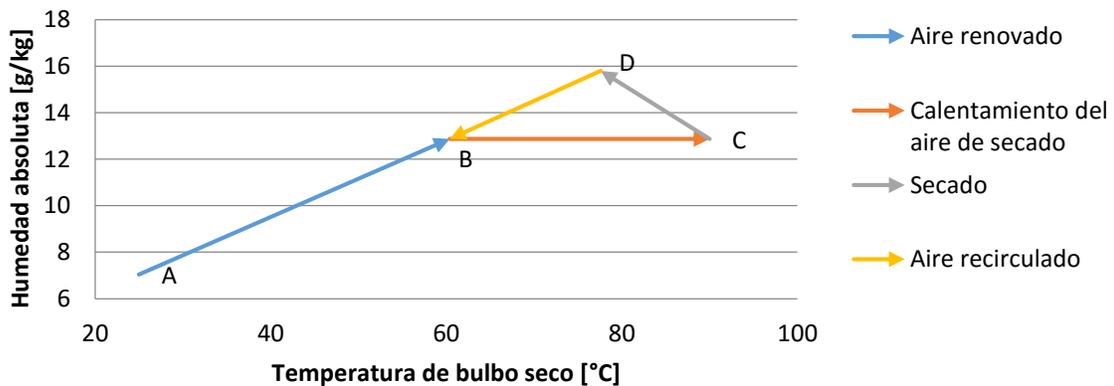


Figura 4.27 Ciclo de secado de la zona 1.

4.4.1.2. Balance térmico Zona 2

En esta zona la carga entra al ciclo de secado con una temperatura de 45 °C y debe salir con alrededor de 33 °C, por lo tanto, la carga entrega calor al proceso, esto puede verse en la Tabla 4.8 donde la potencia de calentamiento de agua libre en las paletas y la potencia de calentamiento de paletas es negativa. De todas formas la materia se seca debido al flujo de aire y a la potencia para evaporar el agua. En la Tabla 4.8 se muestran las potencias térmicas necesarias y la total de secado de la zona 2.

Tabla 4.8: Potencia térmica total de la zona 2.

Potencia	Potencia [kW]	Incidencia %
Potencia de evaporación del agua libre q_v [kW]	64,58	108,2
Potencia de calentamiento de agua libre en las paletas q_{ca} [kW]	-2,23	-3,7
Potencia de calentamiento de las paletas q_{cm} [kW]	-2,66	-4,5
Potencia total q_t [kW]	59,68	100

A continuación se emplea el método iterativo para determinar el ciclo de aire de la zona 2 del secador, del cual se obtienen los resultados de la Tabla 4.9. El porcentaje de renovación de aire para este caso se considera de 50%.

Tabla 4.9: Ciclo de aire en la zona 2 de secado a 45°C.

Punto	Temperatura [°C]	Humedad Relativa %	Altura geográfica [m]	Volumen específico [m³/kg]	Entalpía [kJ/kg]	Humedad Absoluta [g/kg]
A	25	35%	160	0,87	42,99	7,04
B	28	38%	160	0,88	52,12	9,04
C	45	15%	160	0,93	69,10	9,04
D	33	38%	160	0,90	63,76	11,60

El aire deja el ciclo de secado con 38% de humedad relativa, lo que es coherente para una temperatura de 33°C y, por lo tanto, se logra el objetivo de secado con un 50% de renovación de aire. Con los valores anteriores se grafica el ciclo de aire de la zona 2, en la Figura 4.28.

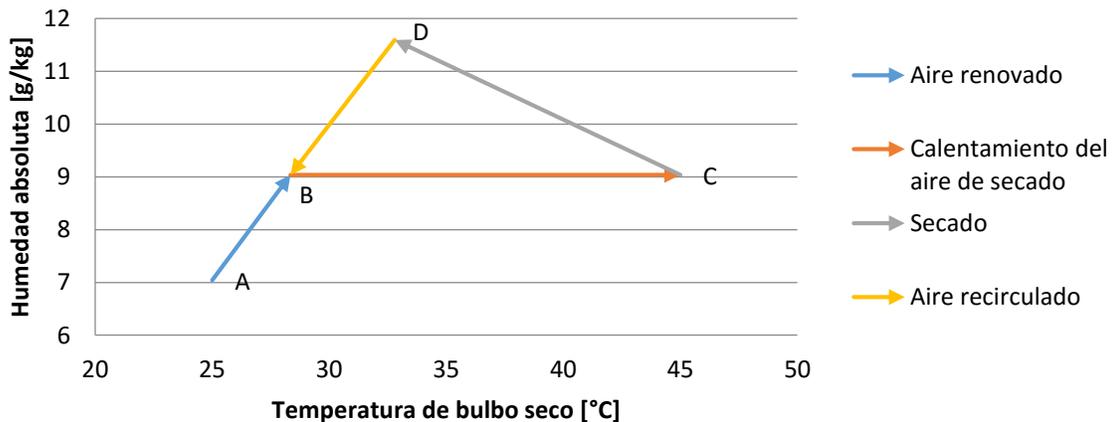


Figura 4.28: Ciclo de secado de la zona 2.

Con los resultados de la Tabla 4.9 y la ecuación 4.11 se determina la potencia del ciclo de aire. La eficiencia del ciclo se calcula con el cociente entre la potencia total y la potencia de ciclo de aire. Los resultados están expuestos en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Potencia del ciclo de aire y le eficiencia térmica en la zona 2.

Potencia total q_t [kW]	Potencia del ciclo de aire [kW]	Eficiencia del ciclo de secado [%]
59	195	30

4.4.1.3. Balance térmico Zona 3

En la zona 3 se termina el secado de las paletas a 90°C, la carga entra a 33°C y sale a 85°C. La potencia de evaporación está dada por la ecuación 3.1, la potencia de calentamiento del agua contenida está dada por la ecuación 3.2 y con la ecuación 3.3 se determina la potencia de calentamiento de las paletas. Los resultados de las distintas potencias calculadas y la potencia total necesaria, en la zona 3, están dadas en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Potencia térmica total de la zona 3.

Potencia	Potencia [kW]	Incidencia %
Potencia de evaporación del agua libre q_v [kW]	16,14	65,6
Potencia de calentamiento de agua libre en las paletas q_{ca} [kW]	3,42	13,9
Potencia de calentamiento de las paletas q_{cm} [kW]	5,03	20,5
Potencia total q_t [kW]	24,59	100

En la Tabla 4.11 se observa que existen resultados parecidos a la zona 1, donde la potencia de evaporación es la que tiene mayor incidencia, la diferencia está en la potencia de calentamiento de paletas es mayor al calentamiento de agua contenida.

Del análisis del ciclo de secado de la zona 3, considerando un 30% de renovación de aire, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Ciclo de aire en la zona 3 de secado a 90°C.

Punto	Temperatura [°C]	Humedad Relativa %	Altura geográfica [m]	Volumen específico [m³/kg]	Entalpía [kJ/kg]	Humedad Absoluta [g/kg]
A	25	35%	160	0,87	42,99	7,04
B	65	5%	160	0,99	88,73	8,54
C	90	2%	160	1,06	114,02	8,54
D	85	3%	160	1,05	111,51	9,27

En la Figura 4.29 se grafica la humedad absoluta del aire durante el ciclo de secado en función de la temperatura de bulbo seco.

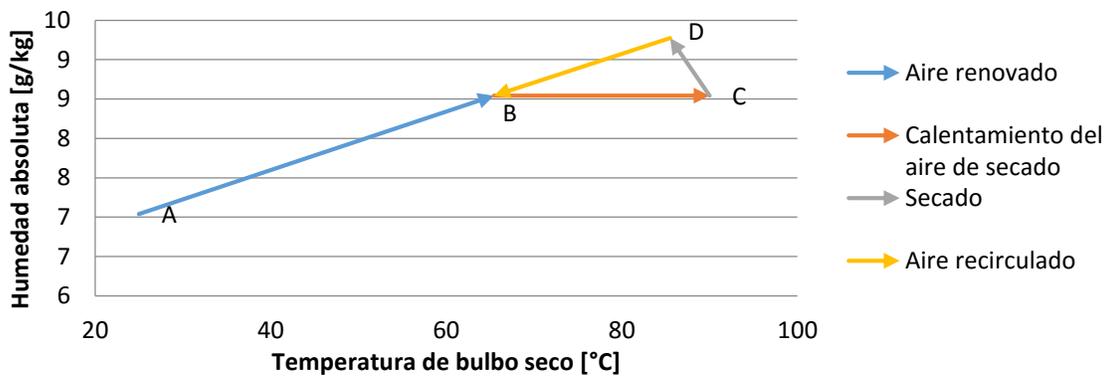


Figura 4.29: Ciclo de secado de la zona 3.

Con los resultados de la Tabla 4.12 y la ecuación 4.11 se determina la potencia del ciclo de aire. La eficiencia del ciclo se calcula con el cociente entre la potencia total y la potencia de ciclo de aire. Los resultados están expuestos en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Potencia del ciclo de aire y le eficiencia térmica en la zona 3.

Potencia total q_t [kW]	Potencia del ciclo de aire [kWt]	Eficiencia del ciclo de secado [%]
24	256	9

4.4.1.4. Principales conclusiones del balance térmico por zona

- La zona 1 es la de mayor potencia de ciclo, ya que en esta zona se debe calentar las paletas que están a temperatura ambiente hasta llegar a 90 °C.
- La zona 2 es la que tiene menores requerimientos energéticos, esto se debe a la baja temperatura del aire que circula en esta zona.

4.4.2. Pérdidas térmicas en el secador

Aparte del balance térmico de cada ciclo es relevante determinar las pérdidas térmicas producto de la diferencia de temperatura que existe entre el ambiente y el secador convectivo. Las pérdidas térmicas se desarrollan por las paredes, el techo y el piso del secador como se aprecia en la Figura 4.30. Los cálculos se realizan según metodología expuesta en la sección 3.4.2.

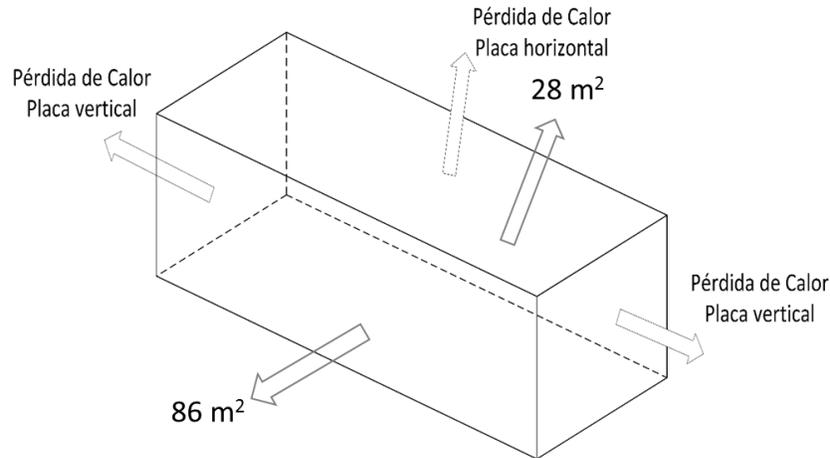


Figura 4.30 Modelo paralelepípedo del secado y sus pérdidas térmicas

4.4.2.1. Pérdidas térmicas por las paredes laterales

Para estimar las pérdidas térmicas por las paredes del secador se considera un modelo de placa plana convectiva por el interior del secador y uno de placa plana vertical con convección natural por el exterior. Para este modelo se obtienen los resultados de la Tabla 4.14, considerando el área de todas las paredes laterales de 86 m².

Tabla 4.14 Resultados de pérdidas térmicas por las paredes

Coeficiente de transferencia de calor [W/m ² ·K]	Transferencia de calor por superficie [W/m ²]	Temperatura de pared interior [°C]	Temperatura de pared exterior [°C]	Pérdida de térmicas paredes verticales [W]
0,37	24,3	89	33	2.095

4.4.2.2. Pérdidas térmicas por el techo y piso

El techo y el piso del secador tienen una superficie de 28 m² cada uno. Se considera un modelo de transferencia de placa plana convectiva al interior y de placa horizontal con convección natural al exterior. Los resultados del cálculo de la pérdida térmica por el techo del secador se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Modelo de pérdidas térmicas por el techo y piso del secador.

Coeficiente de transferencia de calor [W/m ² ·K]	Transferencia de calor por superficie [W/m ²]	Temperatura de pared interior [°C]	Temperatura de pared exterior [°C]	Pérdida de térmicas paredes verticales [W]
0,35	22,62	89	38	1.252

4.4.2.3. Pérdidas térmicas totales del secador prototipo

Según el modelo simplificado del secador considerando un área total de 142 m² de transferencia de calor se tiene que el valor total de las pérdidas térmicas se estima en 3,3 kW. Si se considera que en las 3 zonas se pierden la misma cantidad de calor, cada una perdería 1,1 kW, se plantea así porque esta cantidad es muy baja en comparación con la potencia del ciclo del aire de cada zona

4.4.3. Análisis de pérdida de presión en el circuito de ventilación de zonas de secado

En esta sección del trabajo se describen las pérdidas de presión que se desarrollan en las diferentes zonas del secador. Al determinar la pérdida de presión de los conductos y la pérdida de presión provocada por los lechos de paletas (ver sección 4.2) se puede determinar cuál es la potencia de ventilación que se necesita para cada zona del secador. En la Figura 4.26 muestra los puntos significativos que se utilizan para el análisis de pérdida de presión producto de la ductería.

En la Figura 4.31 se puede ver un esquema 3D del secador prototipo. En la imagen se observa la ductería de cada una de las zonas del secado, también están señaladas la ubicación de un radiador y la del ventilador axial; actuales.

La pérdida de presión provocada por los lechos es calculada con la ecuación 4.10, para una altura de 300 mm de paletas y una velocidad 15 m/s, se tiene que la pérdida de presión llega a unos 500 Pa.

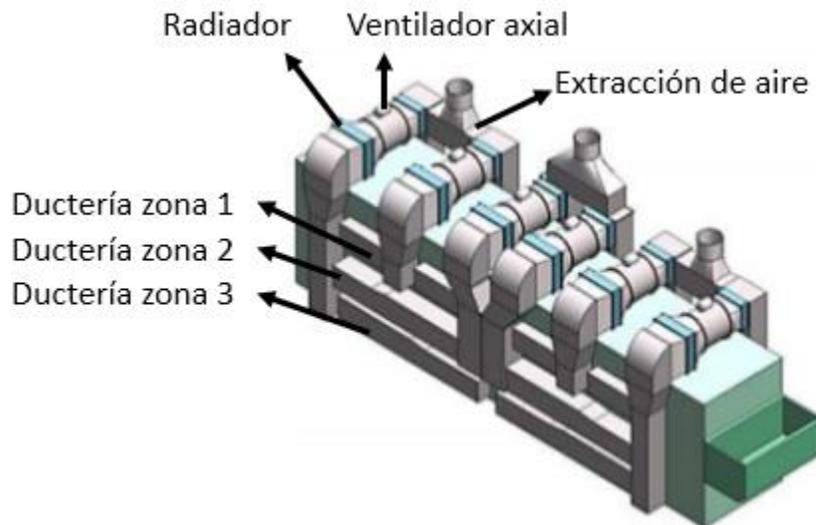


Figura 4.31 Esquema 3D del secador prototipo.

4.4.3.1. Pérdidas de Presión en Ductería de la Zona 1

En cada zona el sistema de ductos para conducir el aire es diferente, para este caso se muestra un diagrama del ducto típico de la zona 1 en la Figura 4.32. El largo del recorrido del aire es de 4,1 m y tiene las siguientes singularidades:

- i) Codo redondeado 90° $D < 1$ posterior al radiador.
- ii) Una reducción cónica.

- iii) Te de bifurcación previa a las entradas al secador.
- iv) 5 inyecciones de aire a una cámara plena.
- v) Una entrada de aire de renovación en el punto A del ciclo de secado.

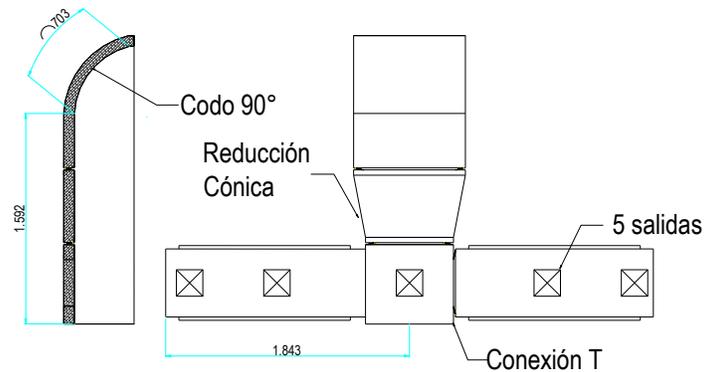


Figura 4.32 Ductería en la zona 1 del secador.

Empleando la metodología descrita y aplicando la geometría del ducto de inyección, se obtiene el resultado de pérdida de presión en la zona 1 que se muestra en la Tabla 4.16. Los parámetros A y B son valores que se necesitan para emplear la correlación de Churchill (ver sección 3.4.3.4).

Tabla 4.16 Pérdida de presión del aire por flujo a través del ducto en la zona 1.

Punto de operación	Densidad del aire [kg/m ³]	Número de Reynolds	Parámetro A	Parámetro B	Coefficiente de fricción	Largo del ducto [m]	Pérdida de presión [Pa]
C	0,94	3,59E+05	1,20E+22	2,07E-64	0,014	4,10	11

De acuerdo a las singularidades que debe atravesar el flujo de aire en la zona 1, se calculan las pérdidas de presión cada una de ellas y se obtiene el resultado de la Tabla 4.17.

Tabla 4.17 Pérdidas de presión en el fitting de los ductos de la zona 1.

Fitting	Coefficiente de fricción	Cantidad en la línea	Punto de operación del flujo	Densidad del fluido [kg/m ³]	Presión dinámica [Pa]	Pérdida de presión [Pa]
Codo 90° redondeado con D<1	0,5	1	C	0,93	105,63	52
T flujo separado	0,30	1	C	0,93	105,63	31
Flujo de salida a un espacio	1,00	5	C	0,93	105,63	528
Flujo de entrada de un espacio	0,35	1	A	1,15	129,31	45
Reducción cónica	0,05	1	C	0,93	105,63	5
Pérdida de presión fitting [Pa]						663

Para obtener la pérdida de presión total se suma la correspondiente al radiador, con esto el resultado de la pérdida de presión para la zona 1 está dado en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 Pérdidas de presión zona 1

Tipo de pérdida	Cantidad [Pa]	Incidencia %
Pérdida de presión radiador	160	12,0
Pérdida de presión fricción	11	0,8
Pérdida de presión fitting	663	49,7
Pérdida de presión lecho de paletas	500	37,5
Pérdida de presión total	1.334	100

La mayor incidencia está en la pérdida de presión provocada por los fitting, esto se debe principalmente a las 5 salidas que se tienen en esta zona. El otro punto importante es la pérdida de presión provocada por lechos de paletas que llega a un 37,5 % del total.

4.4.3.2. Pérdidas de Presión en Ductería de la Zona 2

En la Figura 4.33 se muestra la ductería en la zona 2 del secador, en este caso las singularidades son:

- i) Codo redondeado 90°
- ii) 2 reducciones cónicas
- iii) Codo corto de 90°
- iv) 5 salidas
- v) Una entrada de aire de renovación en el punto A de secado.

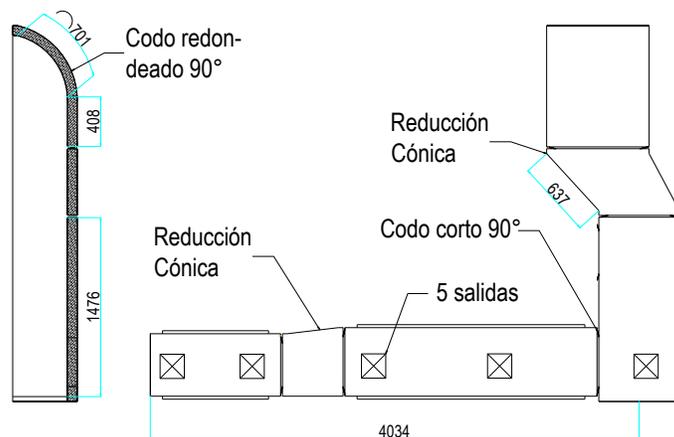


Figura 4.33 Ductería en la zona 2 del secador.

De acuerdo a la geometría de la ductería, el largo del recorrido del fluido es de 7,3 m. La pérdida de presión a través de la ductería se presenta en la Tabla 4.19. Los parámetros A y B son valores que se necesitan para emplear la correlación de Churchill.

Tabla 4.19 Pérdida de presión del aire por flujo a través del ducto en la zona 2.

Punto de operación	Densidad del aire [kg/m ³]	Número de Reynolds	Parámetro A	Parámetro B	Coefficiente de fricción	Largo del ducto [m]	Pérdida de presión [Pa]
C	1,08	4,10E+05	1,45E+22	2,43E-65	0,014	7,30	22

Para la zona 2 se presentan las pérdidas de presión por fittings, en el flujo de aire, en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20 Pérdidas de presión en el fitting de la zona 2 de secado.

Fitting	Coefficiente de fricción	Cantidad en la línea	Punto de operación del flujo	Densidad del fluido [kg/m ³]	Presión dinámica [Pa]	Pérdida de presión [Pa]
Codo 90° corto	1,3	1	C	1,08	120,97	157
Codo 90° redondeado con D<1	0,5	1	C	1,08	120,97	60
Flujo de salida a un espacio	1	5	C	1,08	120,97	604
Flujo de entrada de un espacio	0,35	1	A	1,15	129,31	45
Reducción cónica	0,05	2	C	1,08	120,97	12
Pérdida de presión fitting [Pa]						880

Para obtener la pérdida de presión total se suma la correspondiente al radiador, con esto el resultado de la pérdida de presión para la zona 2 está dado en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21 Pérdidas de presión zona 2

Tipo de pérdida	Cantidad [Pa]	Incidencia %
Pérdida de presión radiador	160	10,2
Pérdida de presión fricción	22,1	1,4
Pérdida de presión fitting	879,9	56,3
Pérdida de presión lecho de paletas	500	32,0
Pérdida de presión total	1.362	100

La mayor incidencia está en la pérdida de presión provocada por los fitting, esto se debe principalmente a las 5 salidas que se tienen en esta zona y a las reducciones de ductos, el total de estas pérdidas llegan al 56,3% del total. El otro punto importante es la pérdida de presión provocada por lechos de paletas que llega a un 32 % del total.

4.4.3.3. Pérdidas de Presión en Ductería de la Zona 3

En la Figura 4.34 se muestra un diagrama del ducto típico de la zona 3. El largo del recorrido del aire es de 8,5 m y tiene las siguientes singularidades:

- i) Codo redondeado 90° $D < 1$;
- ii) Dos reducciones cónicas
- iii) Un codo corto de 90°
- iv) 5 salidas a un espacio
- v) Una entrada de aire de renovación en el punto A del ciclo de secado.

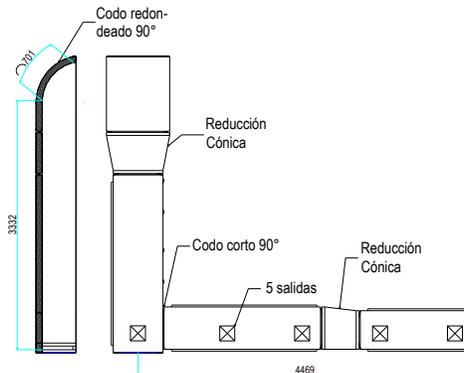


Figura 4.34 Ductería en la zona 3 del secador.

Empleando la metodología descrita y aplicando la geometría del ducto de inyección, se obtiene el resultado de la pérdida de presión en la zona 3 que se muestra en la Tabla 4.22. Los parámetros A y B son valores que se necesitan para emplear la correlación de Churchill.

Tabla 4.22 Pérdida de presión del aire por flujo a través del ducto en la zona 3.

Punto de operación	Densidad del flujo [kg/m³]	Número de Reynolds	Parámetro A	Parámetro B	Coefficiente de fricción	Largo del ducto [m]	Pérdida de presión [Pa]
C	0,94	3,60E+05	1,20E+22	1,98E-64	0,014	8,50	23

De acuerdo a las singularidades que debe atravesar el flujo de aire en la zona 3, se calculan las pérdidas de presión cada una de ellas y se obtiene el resultado de la Tabla 4.23.

Tabla 4.23 Pérdidas de presión en el fitting de los ductos de la zona 3.

Fitting	Coefficiente de fricción	Cantidad en la línea	Punto de operación del flujo	Densidad del fluido [kg/m ³]	Presión dinámica [Pa]	Pérdida de presión [Pa]
Codo 90° corto	1,3	1	C	0,94	106,13	137
Codo 90° redondeado con D<1	0,5	1	C	0,94	106,13	53
Flujo de salida a un espacio	1	5	C	0,94	106,13	530
Flujo de entrada de un espacio	0,35	1	A	1,15	129,31	45
Reducción cónica	0,05	2	C	0,94	106,13	10
Pérdida de presión fitting [Pa]						777

Para obtener la pérdida de presión total se suma la correspondiente al radiador, con esto el resultado de la pérdida de presión para la zona 3 está dado en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24 Pérdidas de presión zona 3

Tipo de pérdida	Cantidad [Pa]	Incidencia %
Pérdida de presión radiador	160	11,8
Pérdida de presión fricción	23,1	1,7
Pérdida de presión fitting	777,5	57,1
Pérdida de presión lecho de paletas	300	29,4
Pérdida de presión total	1.260	100

La mayor incidencia está en la pérdida de presión provocada por los fitting, esto se debe principalmente a las 5 salidas que se tienen en esta zona y a las reducciones de ductos, el total de estas pérdidas llegan al 57% del total. El otro punto importante es la pérdida de presión provocada por lechos de paletas que llegan a un 29 % del total.

4.4.4. Selección de equipos para atender los requerimientos operacionales del secador

En esta sección se describe la selección de equipos, ventiladores y radiadores, que se tienen que utilizar producto de la nueva configuración de manejo de aire del secador prototipo.

Radiadores

En el caso de los radiadores la potencia térmica de cada una de las zonas está dada en la Tabla 4.25, según esta se tiene que la zona 1 es la de mayores requerimientos energéticos de unos 322 kW. El secador cuenta con 2 radiadores por cada una de las zonas, por lo tanto se deben instalar 2 equipos de 161 kW como mínimo.

Tabla 4.25 Resumen requerimientos de potencia térmica por zona

Zona	Potencia térmica [kW _t]	Pérdida térmica [kW _t]	Total por zona [kW _t]	Incidencia %
Zona 1	321	1,1	322,1	41,5
Zona 2	195	1,1	196,1	25,3
Zona 3	256	1,1	257,1	33,2
Total			775,3	100

Por lo tanto se requieren 6 radiadores, con una capacidad cada una de 165 kW_t. El equipo tiene que ser operado con una presión de vapor a 10 bar y un flujo nominal de unos 0,24 kg/h.

El equipo seleccionado se puede ver en la Figura 4.35. Sus dimensiones típicas son 740x300x930 mm y posee una capacidad térmica máxima de 208 kW_t, un rango de operación de 2,5 a 30 bar y un área de intercambio de 45 m². Otro detalles relevantes del equipo son los siguientes:

- Procedencia: China
- Tipo: Tubo compacto con aletas.
- Calefacción Fuente: vapor a baja presión / medio (0.3-2.5MPa)
- Material de tubo: acero al carbono
- Tipo: elipse
- Diámetro externo: 36 * 14 mm
- Espesor del tubo: 2 mm



Figura 4.35 Intercambiador de calor vapor – aire seleccionado para la aplicación

Ventiladores

La nueva configuración de ventiladores indica que las condiciones de operación deberían ser de 18.900 m³/h, con una presión mínima de 1.670 [Pa], esto es debido a que la zona 2 tiene una pérdida de presión de 1.562 [Pa] considerando la ductería y la pérdida de presión del lecho de paletas. En la Tabla 4.26 se entrega un resumen de la pérdida de presión en cada una de las zonas del secador.

Tabla 4.26 Resumen de pérdida de presión por zona

Zona	Pérdida de presión Ductería [Pa]	Pérdida de presión lecho de paletas [Pa]	Total por zona [Pa]	Incidencia %
Zona 1	834	500	1.334	30
Zona 2	1.062	500	1.562	37
Zona 3	960	500	1.460	33
Total			4.356	100

La tecnología actual de ventiladores axiales no permite la configuración de un solo ventilador para un caudal de aire de 18.900 m³/h y una presión de 1.570 [Pa].

Debido a esto se selecciona un equipo especial (dos ventiladores en serie) marca Systemair, el modelo AXC 560 que cumple con las especificaciones de caudal y presión requerida. En la Figura 4.36 se muestra la curva característica de un ventilador axial, se puede ver que tiene una presión total de 1.600 Pa y cumple con el caudal de 18.900 m³/h. En la Figura 4.37 se puede ver una imagen del ventilador. Las principales características son:

- Máxima temperatura de transporte de aire: 300 °C
- Peso: 266 kg.
- Dimensiones: 1.000 mm de largo y un diámetro de 650 mm.

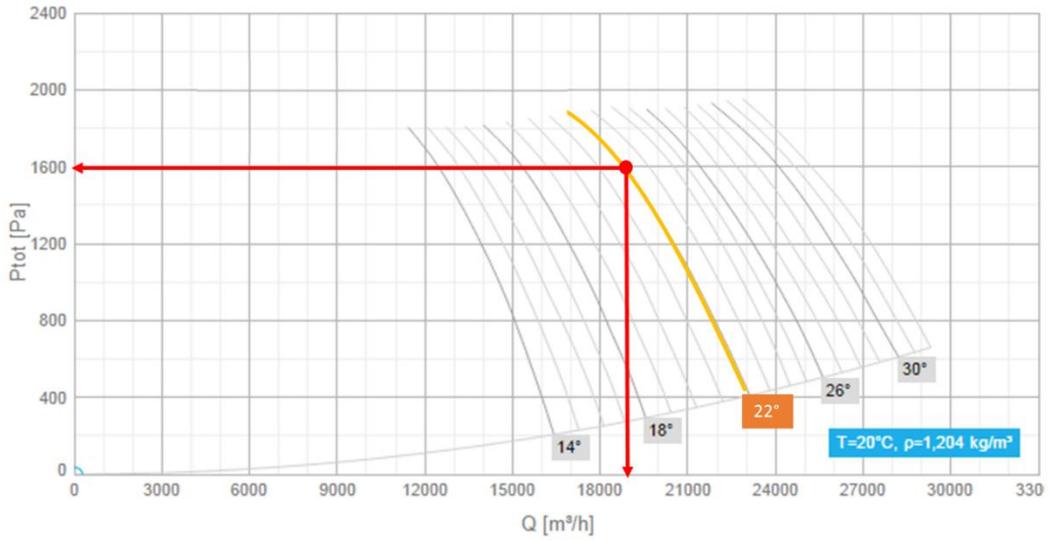


Figura 4.36 Curva característica ventilador Q (Caudal) vs P_s (Presión estática)



Figura 4.37 Ventilador Axial seleccionado. Marca Systemair

5. Discusión

En esta sección se realiza la discusión de los resultados obtenidos en el trabajo.

5.1. Mecanismos de distorsión de las paletas.

La distorsión que se produce en las paletas es inherente al proceso de secado y es provocado por el colapso celular, al producirse la evacuación del agua libre al interior de la madera. Es por esto que siempre van a existir problemas de defectos de secado, como son los alabeos tangenciales y longitudinales.

El colapso celular asociado a la evaporación del agua libre es producido por las altas temperaturas y un rápido secado superficial, es importante tener en cuenta estas dos variables al momento de realizar el secado de las paletas, ya que pequeños cambios en ellas pueden provocar un aumento del rechazo de paletas por las deformaciones producidas por el colapso celular.

La densidad de las maderas está directamente relacionada con la presencia de agua dentro de ella. El proceso de secado se va disminuyendo la cantidad de agua y por lo tanto también la densidad de la madera. A partir de la Figura 4.1 se puede observar como las propiedades mecánicas de la madera varían con la densidad. Maderas con bajas propiedades mecánicas en verde generan productos secos de bajas propiedades mecánicas, esto provoca una alta tendencia al colapso y a la formación de defectos.

La relación de aspecto entre los productos de álamo y hualle mostrados en la Tabla 4.3, indica que casi todos ellos tienen una alta tendencia al colapso en las dos direcciones, tanto en sus ejes de mayor y menor inercia, esto se debe principalmente a la configuración geométrica que poseen.

Para reducir la tendencia a la distorsión de las paletas, se deberían seguir los siguientes recomendaciones:

- i) Cambiar la madera con que se fabrican las paletas por una que tenga mejores propiedades mecánicas, como la madera hualle, que produce una menor cantidad de defectos en el secado,
- ii) Respetar los parámetros de secado, que son los tiempos de residencia en la zona de secado, la altura de la cama, la temperatura y la renovación de aire dentro del secador; de esta forma se reduce el efecto de las variables que pueden afectar a la madera en el proceso de secado.

5.2. Pérdidas de presión en lechos de paletas.

Según los resultados expuestos en la sección 4.2.2 existe una relación que permite caracterizar la pérdida de presión en lechos de paletas a diferentes alturas y distintos caudales de aire. La relación está dada por la ecuación 4.10 que es función del espesor de la cama de paletas y del caudal de aire que pasa por ella.

Al comparar la ecuación 4.10 con la ecuación de Ergún (sección 2.2.4) se aprecian varias similitudes, como que la pérdida de presión es proporcional al espesor del lecho, esto es de esperarse porque al aumentar el espesor del lecho se produce una mayor dificultad del aire para penetrar el lecho: lo que provoca un mayor pérdida de presión. Otra similitud de las ecuaciones es que son proporcionales a la velocidad del aire, esto provoca un aumento de las pérdidas de presión.

Los resultados de este estudio son similares a los encontrados por Klavina [30] donde el aumento de la velocidad incidente en el lecho provoca un aumento de la pérdida de presión. En el caso de Klavina los experimentos utilizan lechos de chip de madera, pero en general desarrollan el mismo comportamiento encontrado en las paletas de álamo, al ser éstas de pequeño tamaño.

La ecuación que encuentra Klavina es función de la altura del lecho (H) y la velocidad (v), esto es similar a la ecuación 4.10 y sigue los mismos principios de Ergun, donde la presión es función de la velocidad y la altura de los lechos.

$$\Delta P = 17,4 - 24,18H - 341v + 530,5Hv + 1478v^2 \text{ [Pa]} \quad 5.1$$

Según el estudio realizado por Codina [31], utiliza la fórmula de Kaltschmitt para la potencia de ventilación en el secado de chips de madera; dada por.

$$P_D = \frac{\frac{Q}{S_0} \cdot S \cdot R}{\eta_e \eta_f \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad 5.2$$

Donde:

- P_D : Potencia de ventilación para secado (kW).
- Q: Flujo de aire (m^3 / h).
- S: Área del lecho (m^2).
- S_0 : Área unitaria para determinar la tasa de aireación.
- R: Resistencia de la altura total de la pila (Pa).
- η_e : Eficiencia del motor de los ventiladores.
- η_f : Eficiencia de los ventiladores.

Como la potencia está dada por $P = \Delta P \cdot Q$ al igualar y despejar ΔP se obtiene:

$$\Delta P \sim \left(\frac{S}{S_0}\right)R \quad 5.3$$

Pero no se sabe cómo estimar R, debería tener un comportamiento probablemente potencial con el caudal, $R \sim Q^n$, con lo cual se obtiene la ecuación 5.4

$$\Delta P \sim \left(\frac{S}{S_0}\right)Q^n \quad 5.4$$

Finalmente se concluye que la ecuación 4.10 tiene el mismo comportamiento que la ecuación 5.2, porque son función del caudal y de la pérdida de presión que produce el lecho.

5.3. Estudios CFD de la cámara de secado.

En los estudios CFD se analiza el diseño original de la cámara de aireación, con una velocidad de entrada del aire de 5 m/s. Como se aprecia en la Figura 4.9, el flujo pierde velocidad a medida que se expande en la cámara de aireación, desarrollando una baja velocidad de impacto en el lecho cerca de 1 m/s. Por otro lado, en la Figura 4.10 se aprecia flujo preferencial en la plancha de aireación, lo anterior es lo mismo que fue detectado en el secador original en operación, flujo preferencial de aire en la plancha de aireación y baja velocidad de impacto con el lecho, por lo que el aire no pueda penetrar los lechos de paletas.

Los experimentos CFD permiten establecer unas condiciones mejoradas de disposición de la aireación del lecho consistentes en una velocidad de entrada 15 m/s y la incorporación de deflectores (4 deflectores y una cuña), lo que permite que la velocidad de impacto alcanza entre 4 a 5 m/s y una homogenización de la velocidad del aire en la plancha de aireación.

La validez del análisis CFD se puede apreciar al comparar análisis de problemas similares, como el de Prakash [32] en este trabajo se muestra el efecto de la dirección del viento en el confort térmico de una habitación con dos ventanas opuestas. En el trabajo se realiza una simulación CFD de la habitación, donde se varia el flujo de entrada en diferentes ángulos para saber cuál es la configuración que tiene un mejor confort térmico. En el análisis de Prakash se muestran resultados parecidos a los obtenidos en las cámara de secado del secador TEMSA, el aire fluye por zonas de preferencia, también la variación de ángulo de entrada del aire permite una homogenización del flujo; que en el caso de la cámara de aireación es producida por los deflectores y, por último, se aprecian los mismos efectos de aumento de la velocidad en la entrada y salida de aire al recinto en estudio.

5.4. Equipos para atender los requerimientos operacionales del secador

La selección de radiadores se realiza analizando cada una de las zonas del secador, la zona 1 es la que tiene mayores requerimientos energéticos, esto se debe a que esta zona es la primera del ciclo de secado y debe calentar el aire a 90°C. La segunda zona con altos requerimientos energéticos es la zona 3, en esta la temperatura del aire tiene que ser de 90°C a diferencia de la zona 2 que solo tiene que calentar el aire a 45°C y se necesita menos potencia térmica para elevar la temperatura de las paletas. La selección de radiadores indica que se deben utilizar 6 radiadores de 165 kW_t cada uno, lo que se traduce en un aumento de 34% de potencia térmica en cada radiador del secador (anteriormente eran de 120 kW cada uno).

El secador está configurado con 2 ventiladores por zona, éstos suministran 5.670 m³/h con una presión de 267 Pa; la nueva configuración plantea el cambio de ventiladores y elevar el caudal a 18.900 m³/h con una presión de 1.600 Pa. Este fuerte aumento se debe a que la velocidad de entrada a la cámara de secado se aumenta de 5 a 15 m/s y la pérdida presión total también tiene un aumento de 267 a 1.560 Pa, la cual se debe al aumento de pérdida de presión por el fitting y a la pérdida de presión producida por los lechos de paletas que fue subestimado en el diseño original.

El análisis del consumo energético entre la nueva y la antigua configuración de equipos (ventiladores y radiadores) se realiza analizando la potencia suministrada a los ventiladores y radiadores en función de la producción total de paletas. La capacidad de procesamiento del secador se estima en 4.112 kg de paletas por día, considerando un funcionamiento de 16 horas y una producción de 257 kg/h. Se asume que la pérdida de paletas para la antigua configuración es del 25% y de un 5% para la nueva configuración.

El índice de consumo energético se define como el cociente entre la energía total proporcionada a un proceso y la producción total, en este caso se calcula para los ventiladores y radiadores, y la producción total de paletas del secador sin defectos.

El índice de consumo energético térmico (ver Tabla 5.1) en la antigua configuración es de 3,7 kWh_t/kg y en la nueva llega a 3,9 kWh_t/kg, lo que indica un aumento del 5,4%. Se debe principalmente a que la potencia térmica total de la nueva configuración es más alta que de la configuración original, a pesar que se tenga una menor pérdida de paletas en la nueva configuración.

La energía térmica suministrada a los radiadores es producida por una caldera que utiliza material de desecho (madera no utilizada en los procesos o con defectos), lo que implica que tiene un costo unitario muy bajo.

En el caso de los ventiladores (ver Tabla 5.1), la potencia de cada ventilador aumenta de 7 kW a 15 kW. Este aumento de potencia se debe al aumento de la velocidad del aire dentro del secador y al aumento de la presión de suministro. La energía suministrada a los ventiladores con la antigua configuración es de 672 kWh; la nueva configuración necesita 1.440 kWh, que representa un aumento del 114 %.

El índice de consumo energético de ventilación (ver Tabla 5.1) en la nueva configuración tiene un valor del 0,37 kWh/kg y en la antigua configuración es 0,22 kWh/kg. Esta diferencia se produce principalmente porque la potencia de los ventiladores originales es baja en comparación a la potencia de la nueva configuración.

Por último en la Tabla 5.1 se hace una comparación de la energía total suministrada y del índice de consumo energético total de la configuración antigua de equipos vs la nueva. La energía total suministrada a la antigua configuración es 12.192 kWh, en cambio a la nueva configuración se le aportan 16.800 kWh, una variación del 37,8%. El índice de consumo energético total de la antigua configuración es de 3,9 kWh/kg y el de la nueva configuración es de 4,3 kWh/kg, que representa un aumento del 10,3%.

El índice de consumo energético de ventilación es más relevante que el índice de consumo térmico. Esto se debe a que la energía térmica es producida con desechos de la operación, con un costo unitario muy bajo, en cambio los ventiladores utilizan energía eléctrica; la cual tiene un valor considerable para la empresa.

Tabla 5.1 Comparación consumo energético radiadores y ventiladores

Variable	Configuración antigua	Configuración nueva	Unidad	Porcentaje de cambio
Capacidad del secador	4.112	4.112	kg	-
Potencia térmica del radiador	6 x 120	6 x 160	kW	-
Consumo de energía térmica	11.520	15.360	kWh _t	33,3%
Índice consumo energético radiadores	3,7	3,9	$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	5,4%
Potencia ventilador	6 x 7	6 x 15	kW	-
Consumo de energía por ventiladores	672	1.440	kWh	114,3%
Índice consumo energético ventilación	0,22	0,37	$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	68,2%
Energía total	12.192	16.800	kWh	37,8%
Índice consumo energético Total	3,9	4,3	$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	10,3%

6. Conclusiones

En base a los estudios desarrollados y a los resultados logrados, el trabajo proporciona las siguientes conclusiones:

- La distorsión de las paletas es inherente al proceso de secado, es provocada por el colapso celular y por la anisotropía de la madera, que generan tensiones residuales. Esto implica que al menos los productos de álamo siempre van a desarrollar defectos de secado con la tecnología de secado convectivo zonal.
- Para minimizar los defectos de secado, de cada especie de madera, existe una ventana operacional que permite disminuir la distorsión, pero que es dependiente de la tecnología de secado.
- Los lechos de paletas de 50 – 300 mm desarrollan un ΔP -Q tan alta como 500 Pa a 15 m/s, con una ley tipo Ergun $\Delta P = kQ^{0,9} [Pa]$, la que permite relacionar el espesor del lecho de paletas, la pérdida de presión y el caudal de aire incidente.
- Las cámaras de secado del secador bajo estudio pueden mejorar ostensiblemente su desempeño al reconfigurarse con deflectores de aire y cuña de fondo. La alimentación de aire debe ser como mínimo a 15 m/s para alcanzar una buena distribución de aire y promover un secado uniforme.
- Las cámaras de secado deben configurarse con un sistema de ventiladores tándem, de impulsión – succión, o un sistema de ventiladores en serie (2 unidades); con una capacidad de 18.900 m³/h a una presión de 1.600 Pa, y radiadores de 165 kW para desarrollar un proceso de alta eficiencia (minimizando las pérdidas).
- El índice de consumo energético (ICE) con la nueva configuración es de 4,3 kWh/kg, considerando un ICE de ventilación de 0,37 kWh/kg y un ICE térmico de 3,9 kWh/kg. El ICE de la nueva configuración es de un 10,3% mayor que el de la configuración actual, que tiene un valor de 3,9 kWh/kg.
- El secador convectivo zonal para este producto está en el límite de sus posibilidades, porque no puede manejar con holgura el problema de las pérdidas por distorsión y el sistema de aireación de lechos desarrolla pérdidas de presión muy altas. Por ello se estima que se requiere un cambio tecnológico, transitando hacia secado en lecho fluidizado.

7. Bibliografía

- [1] El Mundo Forestal, 2015. [En línea]. Available: www.elmundoforestal.com/terminologia/albura.html. [Último acceso: 28 Abril 2015].
- [2] B. Naturales, 6 Marzo 2015. [En línea]. Available: http://www.bosquesnaturales.es/actividad_que_madera.asp. [Último acceso: 6 Marzo 2015].
- [3] TIMBER, «timbersource,» 15 abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.timbersource.co.uk/softwood/>. [Último acceso: 15 abril 2015].
- [4] U. Extension, «utextension,» 2015. [En línea]. Available: <https://utextension.tennessee.edu/publications/Documents/PB1692.pdf>. [Último acceso: 20 abril 2015].
- [5] W. Nutsh, Tecnología de la madera y del mueble, Madrid: Editorial Reverté, 1996, p. 27.
- [6] Ministerio de agricultura, ganadería y pesca -. «Ministerio de agricultura, ganadería y pesca,» 2015. [En línea]. Available: http://64.76.123.202/new/0-0/forestacion/_archivos/_biblioteca/116%20%20X_%20Secado%20tradicional%20de%20eucalipto%20Gottert.pdf. [Último acceso: 15 abril 2015].
- [7] SOFOFA, «SOFOFA,» 06 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://web.sofofa.cl/informacion-economica/indicadores-economicos/estructura-de-la-industria/>. [Último acceso: 06 Noviembre 2014].
- [8] Compañía Chilena de Fósforos, 2015. [En línea]. Available: <http://www.fosforos.cl/empresa.htm>. [Último acceso: 28 abril 2015].
- [9] TEMSA, 2014. [En línea]. Available: www.temsa.cl. [Último acceso: 5 diciembre 2014].
- [10] M. d. e. y. s. s. -. G. d. España, 2015. [En línea]. Available: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/71.pdf>. [Último acceso: 25 abril 2015].
- [11] UK College of Agriculture, «UK College of Agriculture,» 2015. [En línea]. Available: <http://www2.ca.uky.edu/agc/pubs/for/for55/for55.htm>. [Último acceso: 25 abril 2015].

- [12] J. R. Silva, «Secado convencional de madera juvenil y adulta de sequoia sempervirens, Memoria para optar al Título de Ingeniero de la Madera,» Universidad de Chile, Santiago, 2004.
- [13] Ministerio de Industria, «Ministerio de Industria - Gobierno de Argentina,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.industria.gob.ar/wp-content/uploads/2013/11/Manual-Lenga.pdf>. [Último acceso: 28 abril 2015].
- [14] I. WOODWEB, «Wood web,» 2015. [En línea]. Available: http://www.woodweb.com/knowledge_base/Stickering_Wood_in_the_Basement.html. [Último acceso: 10 Abril 2015].
- [15] ISVE, 15 abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.isve.com/es/el-vac%C3%ACo-el-secreto-de-la-calidad-del-secado-isve>. [Último acceso: 15 abril 2015].
- [16] No tech Magazine, «No tech Magazine,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.notechmagazine.com/2013/04/solar-wood-drying-kiln.html>. [Último acceso: 15 abril 2015].
- [17] Benecke, «Benecke,» 20 Abril 2015. [En línea]. Available: http://www.benecke.com.br/equipamentos/equipamentos-detalhes.php?id=&prod_id=38&cat_id=17&lang=es. [Último acceso: 24 Abril 2015].
- [18] Ventilex, «Direct Industry,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/imtech-drygenic/secadora-lecho-fluidizado-55192-366111.html>. [Último acceso: 25 Abril 2015].
- [19] INNOVATEC, «TEMSA Informe técnico, Proyecto Innova 205-4324,» INNOVATEC, Santiago, 2005.
- [20] INNOVATEC, «Aumento de capacidad de secado en TEMSA/CCF - Diseño general de secado prototipo,» Santiago, 2014.
- [21] Ö. Akgiray, «Water Science and Technology,» *Water supply*, vol. 1, nº 2, pp. 65-72, 2001.
- [22] C. Blower, «Chicago Blower Argentina,» 04 Junio 2015. [En línea]. Available: http://www.chiblosa.com.ar/spanish/herramientas/teoria_de_los_ventiladores.htm. [Último acceso: 04 Junio 2015].
- [23] K. W. Center, «Industrial Ventilation,» Cincinnati, Signature Publications, 2004, pp. 6-1 - 6-6 , 9-3 - 9-15.

- [24] D. industry, «Direct industry,» 04 Junio 2015. [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/witt-sohn/product-37593-397702.html>. [Último acceso: 04 Junio 2015].
- [25] A.-B. Ltd, « All-Biz Ltd,» 04 Junio 2015. [En línea]. Available: <http://www.ar.all.biz/img/ar/catalog/56030.jpeg>. [Último acceso: 04 Junio 2015].
- [26] J. C. a. M. Y. F.J. McQuillan, «Properties of dry air,» Waterloo, Ontario, 1984.
- [27] J. M. Bergada Grañó, Mecánica de fluidos: Breve introducción teórica con problemas resueltos, Barcelona, España: Iniciativa Digital Politécnica, 2012, p. 507.
- [28] Climaver, «Manual de Conductos de aire acondicionado,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.isover.com.ar/productos/36130318165927/Documentos/climaver.pdf>. [Último acceso: 24 Junio 2015].
- [29] P. K. W. A. C. Franz Friedric, «Principles of Wood Science and Technology: Solid wood,» Berlin, Springer-Verlag, 1968, pp. 85-95.
- [30] I. O. f. Standardization, ISO 5801, Geneve , 1997, p. 20.
- [31] K. Klavina, A. Cinis y A. Zandeckis, *A study of pressure drop in an experimental low temperature*, 2014, p. 511–518.
- [32] M. Codina y I. López, « Biomass trade centre EU,» 2015. [En línea]. Available: http://www.biomassstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf_vsebine/Technical_backgrounds/XI.Technical_backgrounds.pdf.. [Último acceso: 2015].
- [33] D. Prakash y Ravikumar, «Simulation of indoor air flow for a room with windows at their adjacent walls under various wind flow direction using cfd,» *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, nº 11, pp. 1387 - 1394, 2012.
- [34] F. P. Laboratory, Wood Handbook, Madison, Wisconsin, 1999, pp. 2-3.
- [35] G. P. E. S. d. C.V., «GEA NIRO,» 15 Abril 2015. [En línea]. Available: http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/secadores/procesadores_de_lecho_fluidizado.htm. [Último acceso: 15 Abril 2015].
- [36] D. INNOVATEC, «Planos secador convectivo,» Santiago, 2014.
- [37] Universidad autonoma de Madrid, «Área de Ingeniería Química,» 2015. [En línea]. Available:

https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/Fluid/Fluidizacion%202006-07.pdf. [Último acceso: 24 abril 2015].

- [38] R. B. y. K. Nisbett, «Diseño en ingeniería mecánica de Shigley,» Ciudad de México, McGraw-hill, 2008, pp. 173-176.
- [39] ASHRAE, «ASHRAE Handbook—Fundamentals,» Atlanta , 2009, pp. 14-17.

Anexos

Anexo A: Fotografías del desarrollo experimental

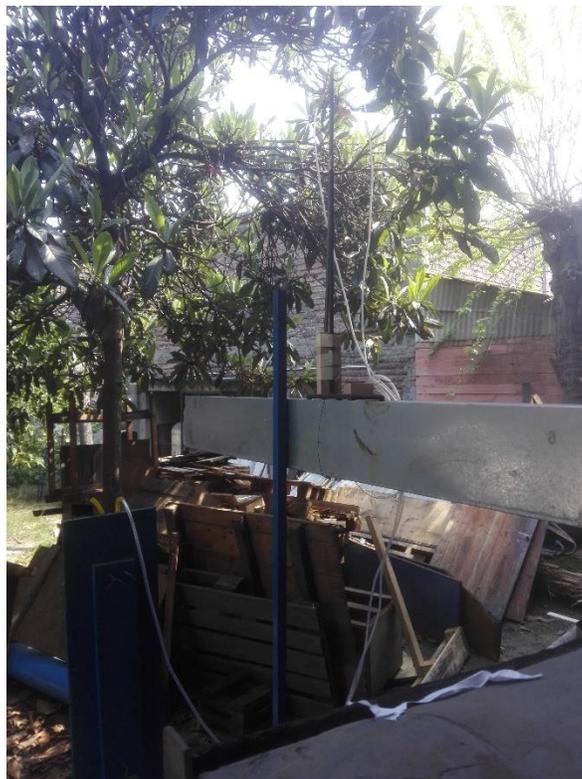
Toma de diferencia de presión en cámara de pruebas.



Lechos de palos en cámara de pruebas



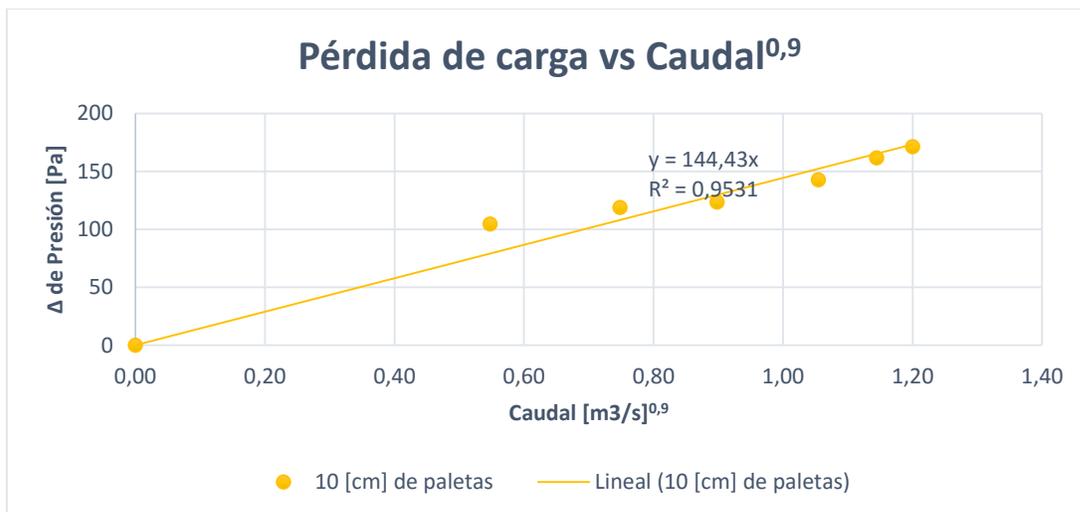
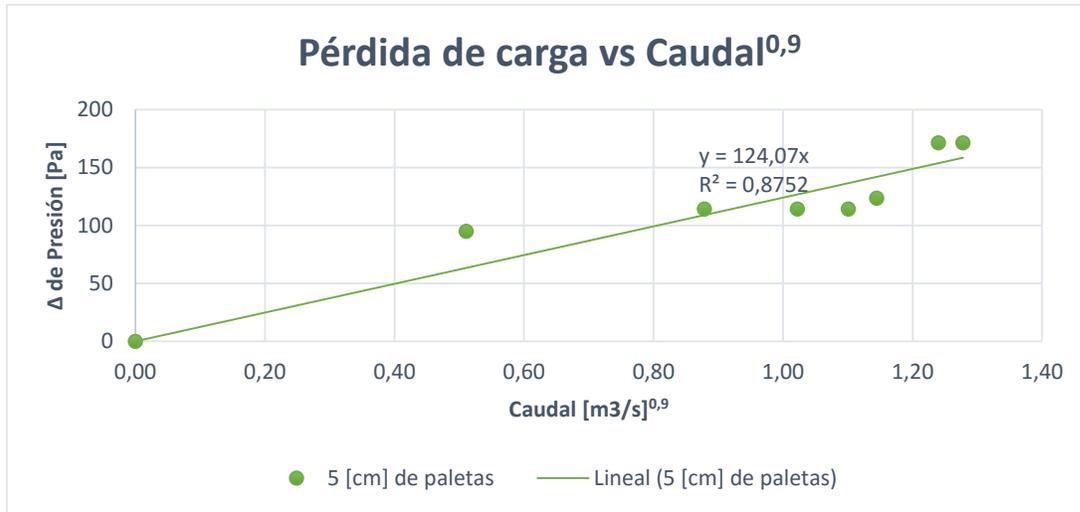
Instalación pitot para medir velocidad de salida



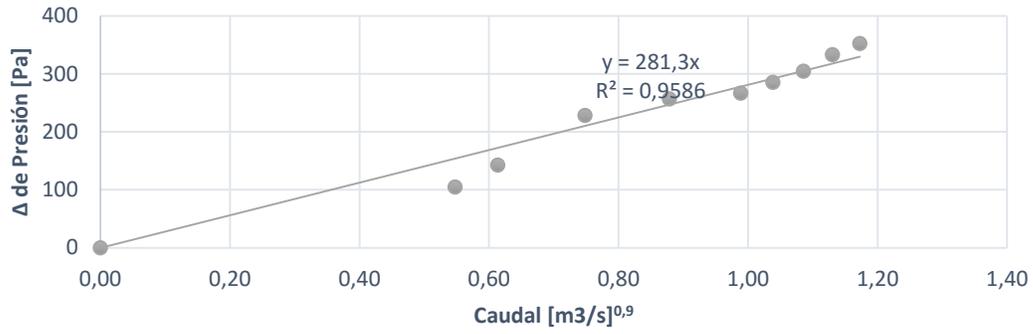
Medición velocidad de salida



Anexo B: Resultados de experiencias de Caída Presión vs Caudal, para diferentes alturas de cama de paletas

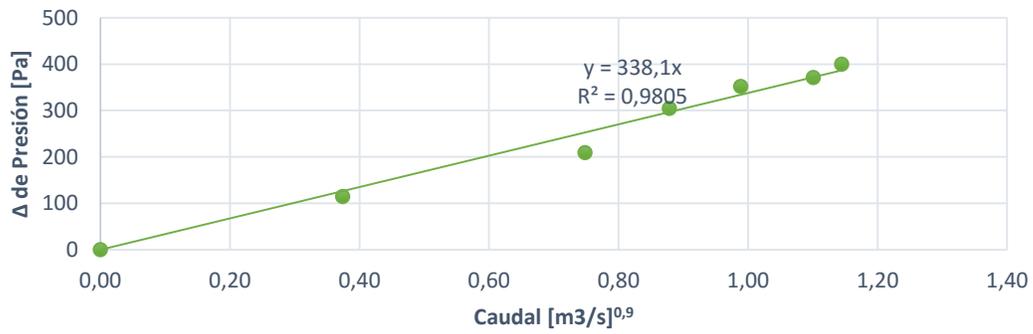


Pérdida de presión vs Caudal^{0,9}



● 15 [cm] de paletas — Lineal (15 [cm] de paletas)

Pérdida de presión vs Caudal^{0,9}



● 20 [cm] de paletas — Lineal (20 [cm] de paletas)