



Universidad del Bío-Bío  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería en Maderas  
Escuela Ingeniería Civil Química



# **CARACTERIZACIÓN Y DISMINUCIÓN DEL CICLO DEL GENERADOR DE AIRE CALIENTE EN LA PRODUCCIÓN DE VIDRIOS LAMINADOS.**

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos  
para obtener el título de Ingeniero Civil Químico

**VANESSA ANDREA ÁVILA GONZÁLEZ**

Profesor Tutor: William A. Gacitúa Escobar

Ingeniero Supervisor: German E. Mena Jara

Concepción, (1 de agosto de 2019)

## RESUMEN

Vidrios Lirquén es una empresa dedicada a la manufactura, transformación y distribución de vidrio flotado, vidrio laminado plano, espejos y vidrios para la industria de la construcción.

Actualmente la línea de vidrios laminados de Vidrios Lirquén S.A, ha tenido que aumentar su producción a 70 mil m<sup>2</sup>/mensuales, debido a la alta demanda de sus productos. Es por esto, que se hizo necesario buscar nuevas alternativas que permitieran optimizar el proceso productivo de vidrios laminados.

El generador de aire caliente es el último paso en la fabricación de vidrios laminados, la función principal de este equipo es aportar temperatura y presión a los pre-laminados, para que así ocurra la deformación y adherencia de la capa intermedia de polivinil butiral entre los vidrios. La temperatura y presión que se utiliza dentro del generador de aire caliente está regulada por el ciclo de este equipo el cual tiene una duración de 4 horas y consta de tres etapas, calentamiento, mantenimiento y enfriamiento.

La generación de aire caliente es una etapa limitante para aumentar la producción de vidrios laminados, ya que es la operación más lenta dentro del proceso, lo que ha provocado un estancamiento de carros con pre-laminados que están a la espera de ingresar al equipo.

En vista de lo anterior este trabajo tuvo como propósito encontrar alternativas para la disminución del tiempo de ciclo del generador de aire caliente en la producción de vidrios laminados, para ello se analizó la etapa de mantenimiento y enfriamiento del ciclo del generador de aire caliente, además de un estudio térmico entre el vidrio y el polivinil butiral y se determinaron las capacidades actuales del circuito de enfriamiento.

Los resultados permitieron disminuir a 30 minutos la etapa de mantenimiento, lo que permitiría aumentar la capacidad del generador de aire caliente y del proceso de fabricación de vidrios laminados en 2448 m<sup>2</sup>/ mensuales que corresponde a un 3% de la producción actual.

## **AGRADECIMIENTOS**

Con este trabajo se concluye mi etapa como estudiante universitaria, una etapa de perseverancia y esfuerzo constante. Esto fue posible gracias a mis padres Mirna y Pedro que fueron el pilar fundamental de mis estudios. De igual forma agradezco a mi hermana Valeria por su cariño y a toda mi familia que en algún momento me extendió su apoyo en los momentos que los necesite. También quiero agradecer a mis abuelos María y Moisés que tuvieron una gran incidencia en mi forma de ser y en el camino que seguí, aunque ya no se encuentran conmigo, los recuerdo cada día.

Gracias a Jason por su compañía y apoyo durante estos 6 años, y también a mis compañeras y amigas por su enorme cariño, voluntad y solidaridad.

Doy gracias a mis supervisores German Mena y Juan Carlos Otárola por haberme acogido durante estos meses en Vidrios Lirquén, estoy muy agradecida de su cariño, apoyo y el aprendizaje que me entregaron. Gracias a Wladimir Muñoz por haberme dado la oportunidad de realizar mi práctica profesional en esta empresa.

Agradezco a mi profesor guía William Gacitúa, por su compromiso y buena disposición, también doy gracias al profesor José Navarrete por brindarme la oportunidad de haber trabajado con él y a todos los académicos que formaron parte de mi formación académica.

Dedico este trabajo a mi familia, amigos y a Dios por haberme ayudado a concluir este proceso, y a todos los que contribuyeron a que esto fuera posible.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
TABLA DE CONTENIDOS .....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABLAS .....	viii
NOMENCLATURA .....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 El vidrio .....	4
3.2. Tipos de vidrio .....	4
3.3 Composición del vidrio laminado .....	6
3.4 Adhesión del polivinil butiral .....	6
3.5. Proceso de Laminación vidrios Lirquén S. A.....	8
3.5.1. Zona de carga.....	8
3.5.2. Sala de armado.....	8
3.5.3. Zona de sellado .....	8
3.5.4. Zona de armado de carros.....	9
3.5.5. Zona del generador de aire caliente .....	10
3.6 Control de calidad de vidrios laminados. ....	11
3.6.1. Ensayo Pummel. ....	11
3.6.2. Test de impacto.....	12

3.6.3.	Test de Ebullición .....	12
4.	OBJETIVO(S) GENERAL(ES) Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
4.1.	Objetivo general.....	13
4.2.	Objetivos específicos.....	13
5.	METODOLOGÍA.....	14
5.1.	Análisis etapa de mantenimiento. ....	14
5.1.1.	Caracterización de la película de polivinil butiral.....	14
5.1.1.1.	Estudio de la interfase entre el PVB y el vidrio mediante SEM.....	14
5.1.1.1.1.	Preparación de muestras. ....	15
5.1.1.1.2.	Utilización de SEM. ....	15
5.1.1.2	Análisis del PVB mediante DSC.....	15
5.1.2.	Transferencia de calor en vidrios laminados. ....	16
5.1.3.	Ensayo con ciclo de menor duración.....	21
5.2.	Análisis etapa de enfriamiento.....	22
5.2.1.	Recopilación de antecedentes operacionales. ....	22
5.2.2.	Balance de energía en el generador de aire caliente .....	22
5.2.3.	Caracterización de radiadores.....	23
5.2.4.	Torre de enfriamiento.....	27
5.3.	Estimación de producción.....	29
5.3.1.	Recopilación y clasificación de información.....	29
5.3.2.	Modelo para cuantificar la producción de laminados .....	29
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
6.1.	Etapa de mantenimiento .....	30
6.1.1.	Caracterización de la película de polivinil butiral.....	30
6.1.2.	Transferencia de calor en vidrios laminados. ....	32

6.1.3.	Ensayo con ciclo de menor duración.....	33
6.2.	Etapa de enfriamiento.....	33
6.2.1.	Balance de energía en el generador de aire caliente .....	33
6.2.2.	Capacidades de los equipos .....	35
6.2.3.	Ciclo de generador de aire caliente. ....	37
6.3.	Aumento de capacidad del generador de aire caliente. ....	38
6.4.	Estimación económica.....	39
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	40
7.1.	Conclusiones .....	40
7.2.	Recomendaciones.....	41
8.	REFERENCIAS .....	42
9.	ANEXOS .....	44
9.1.	Cálculo de transferencia de calor .....	44
9.2.	Diagramas de factor de corrección.....	52
9.5.	Galería de imágenes .....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fabricación de VSM Y VST .....	5
Figura 2. Fabricación del vidrio flotado. ....	5
Figura 3. Adhesión de PVB con el vidrio.....	6
Figura 4. Influencia de iones alcalinos en la adherencia del vidrio .....	7
Figura 5. Influencia de la conductividad del agua de lavado en la adherencia del vidrio .....	7
Figura 6. Zona de sellado.....	9
Figura 7. Configuración de bloques con 3+3*0,38*3600*2500.....	9
Figura 8. Ciclo real generador de aire caliente. ....	11
Figura 9. Tiras indicadoras de temperatura en pre-laminados.....	16
Figura 10. Disposición bloques de pre-laminados .....	17
Figura 11. Modelo para el cálculo de transferencia de calor .....	18
Figura 12. Intercambiador de calor flujo cruzado .....	24
Figura 13. Perfiles de temperaturas de diseño radiador principal .....	24
Figura 14. Circuito de enfriamiento .....	27
Figura 16. Medidas PVB observado en SEM (30x).....	30
Figura 15. Vidrio laminado 3+3*0.38 observado en SEM (90x).....	30
Figura 17. Transición térmica PVB, fabricante 1.....	31
Figura 18. Transición térmica PVB, fabricante 2.....	32
Figura 19. Temperatura real y teórica del aire caliente (°C).....	35
Figura 21. Variación de potencia de la torre de enfriamiento.....	36
Figura 20. Variación de la potencia de enfriamiento de radiadores.....	36
Figura 22. Ciclo del generador de aire caliente actual e ideal .....	37
Figura 23. Ciclo óptimo .....	38
Figura 24. Estimación económica con respecto a la duración del ciclo del generador.....	39
Figura 25. Zona de Carga .....	56
Figura 26. Zona de lavado .....	56
Figura 27. Zona armado pre-laminados.....	56
Figura 28. Zona de sellado.....	56

Figura 29. Zona de armado de carros .....	56
Figura 30. Generador de aire caliente.....	56
Figura 31. Carros con vidrios laminados .....	57
Figura 32. Zona de armado de paquetes .....	57
Figura 33. Carro en Generador .....	57
Figura 34. Generador de aire caliente.....	57
Figura 35. Test de impacto .....	57
Figura 36. Pummel .....	57



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ciclos en estudio para el producto $3+3+0.38*3600*2500$ .....	22
Tabla 2. Temperaturas características polivinil butiral .....	31
Tabla 3. Registro de ensayos de calidad en vidrios laminados.....	33
Tabla 4. Extracto de planilla Excel para el cálculo de calor absorbido por el agua de los radiadores en diferentes instantes.....	34
Tabla 5. Extracto de planilla Excel para la estimación de temperatura teórica del aire .....	34
Tabla 6. Capacidad de los equipos que componen el circuito de enfriamiento.....	35
Tabla 7. Capacidad del generador de aire caliente.....	39
Tabla 8. Parámetros para el aire a 120 y 140 °C.....	44

## NOMENCLATURA

%	Porcentaje
$\Delta T_{ml}$	Diferencia de temperatura media logarítmica
m	Flujo masico
°C	Grados Celsius
$\mu S$	Microsiemens
A	Área
Cp	Calor especifico
D	Diámetro
DSC	Calorimetría de barrido diferencial
EVA	Etil vinil acetato
F	Factor de corrección
H	Coefficiente de convección
K	Conductividad térmica
L	Longitud
M	Masa
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
Mm	Milímetros
Un	Numero de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
PVB	Polivinil butiral

R	Resistencia
Re	Número de Reynolds
rpm	Revoluciones por minuto segundo
S	Microscopio electrónico de barrido
SEM	Temperatura
T	tiempo
T	Temperatura de transición vítrea
T <sub>g</sub>	Temperatura de fusión
T <sub>m</sub>	Vidrio templado
TV	Coefficiente global de transferencia de calor
U	Velocidad
v	Vidrio semi-templado Densidad
VST	Viscosidad cinemática
P	
Y	

## 1. INTRODUCCIÓN

Vidrios Lirquén es una empresa dedicada a la manufactura, transformación y distribución de Cristal Flotado, producido en la planta ubicada en la región del Biobío. Vidrios Lirquén fue fundada en el año 1933, y es el único productor de vidrio plano en Chile para uso en la industria de la construcción. Sus accionistas son las compañías multinacionales NSG / Pilkington, Saint Gobain, y el Grupo local Pathfinder. El alcance de esta empresa es la fabricación y distribución de cristal float, cristal laminado plano y espejos.

El vidrio laminado es un material compuesto por la unión de dos o más vidrios por medio de una capa de un material plástico. En la producción de vidrios laminados de Vidrios Lirquén S.A se utiliza polivinil butiral, el cual es un elastómero, que se obtiene a partir de la combinación de alcohol de polivinilo y butiraldehído, es una resina en polvo de color blanco el que luego es mezclado con plastificantes y aditivos para formar la película.

La particularidad del vidrio laminado, que es considerado un vidrio de seguridad, cuando el vidrio se fractura los trozos quedan unidos al polivinil butiral, evitando así la proyección de estos. Son utilizados ampliamente en la arquitectura y en la industria automotriz. También existen vidrios laminados acústicos, que permiten aislar el ruido del exterior, con protección UV, antibalas, entre otros.

La fabricación de vidrios laminados en Vidrios Lirquén S.A consiste en ensamblar manualmente los vidrios junto a una capa de polivinil butiral, para luego ingresar a una zona de calentamiento y prensado, la cual está compuesta por dos rodillos prensadores y por resistencias eléctricas que se extienden por tres zonas de calefacción. La finalidad de esta etapa es sacar el aire que se encuentra entre las láminas de polivinil butiral (PVB) y la superficie del vidrio y sellar los bordes del pre-laminado.

El último paso en la fabricación de vidrios laminados se lleva a cabo en el generador de aire caliente, en este equipo ocurre la adhesión total del polivinil butiral sobre el vidrio. El proceso del generador de aire caliente tiene por función principal aportar a los pre-laminados, el nivel de temperatura necesario que permita a la lámina de PVB fluir y deformarse permanente.

El ciclo del generador de aire caliente tiene una duración de 4 horas aproximadamente y se divide en tres etapas, calentamiento, mantenimiento y enfriamiento.

El calentamiento se realiza por medio de resistencias eléctricas y aire comprimido que elevan la temperatura y presión del generador de aire caliente hasta 134°C y 12 bar, respectivamente. Luego ocurre la etapa de mantenimiento en la cual la temperatura y presión permanecen constantes por 40 minutos a 134°C y 12 bar, en esta etapa no se tiene claridad de la temperatura que adquiere el vidrio y tampoco de la transición térmica que posee el polivinil butiral. La última etapa es el enfriamiento, el cual consiste en despresurizar el generador de aire caliente y alcanzar una temperatura en el interior del equipo de 22 °C. Cabe mencionar que esta etapa tiene una duración de 120 minutos.

Actualmente, la línea de vidrios laminados debe aumentar la producción debido a la alta demanda de sus productos, hace dos años la línea debía producir 50 mil m<sup>2</sup>/mes, actualmente la exigencia a aumentado a 70 mil m<sup>2</sup>/mes. Por lo tanto, es necesario buscar alternativas que permitan disminuir el tiempo de ciclo del generador de aire caliente, ya que es la etapa que mayor tiempo requiere en la producción de vidrios laminados.

Es por esto, que el presente trabajo tiene como finalidad visualizar, analizar y evaluar cada etapa del ciclo del generador de aire caliente, específicamente la etapa de mantenimiento y de enfriamiento. Se determinará el tiempo en que el polivinil butiral adquiere una temperatura aproximada de 134°C, para evaluar la disminución de la etapa de mantenimiento y se estudiarán las capacidades de los equipos que conforman el circuito de enfriamiento, específicamente radiadores y torre de enfriamiento. Por último, se realizará una evaluación económica, con la finalidad de proyectar la producción de vidrios laminados con respecto a las nuevas modificaciones del ciclo del generador de aire caliente.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, la generación de aire caliente se ha transformado en una etapa limitante para aumentar la producción de vidrios laminados, ya que es la operación más lenta dentro del proceso debido a que toma 240 minutos transformar pre-laminados a vidrios laminados. Esto ha provocado un estancamiento de carros con pre-laminados que están a la espera de ingresar al generador de aire caliente. También es una etapa con un alto costo energético, ya que se debe utilizar aire comprimido a 12 bar, el que luego de ser utilizado es liberado a la atmósfera.

La línea de producción de vidrios laminados ha tenido que aumentar su producción a tres turnos de trabajo, para así lograr la producción equivalente a 70 mil m<sup>2</sup> mensuales. Cabe mencionar que la línea de laminados de Vidrios Lirquén produce un 30% menos de laminados en comparación con Vasa S.A Argentina, siendo estas líneas similares en capacidad.

Dentro de las causas, es posible que la torre de enfriamiento no tenga la capacidad adecuada para enfriar, o que los radiadores encargados de la transferencia de calor entre el aire y el agua no tengan la capacidad de enfriamiento suficiente.

Hoy en día no se tiene información acerca de la transferencia de calor que ocurre dentro del generador de aire caliente, por esto se hace necesario analizar, caracterizar y evaluar nuevas alternativas que permitieran disminuir el tiempo de ciclo del generador de aire caliente.

Si se pudiera disminuir el tiempo de ciclo del generador de aire caliente en 5 minutos, se podrían ingresar 3 carros adicionales al mes, lo que significa un aumento entre 1000 a 1500 m<sup>2</sup> de vidrios laminados.

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. El vidrio

Actualmente, el vidrio se fabrica bajo dos procedimientos, Fourcault y A. Pilkington. El procedimiento de Fourcault, fue desarrollado en Europa durante la primera guerra mundial, el cual consiste en estirar una lámina de vidrio en un bloque refractario llamado *dabiteuse*, luego mediante unos enfriadores se solidifica el vidrio. El procedimiento A. Pilkington, fue desarrollado en Inglaterra en el año 1959, es un procedimiento nuevo, que ha reemplazado a algunos de los métodos precedentes para fabricar vidrio y es el que actualmente se utiliza en la planta de Vidrios Lirquén S.A. Este método consiste en fundir las materias primas en un horno a 1500 °C, luego el vidrio fluye a un baño de estaño fundido. El vidrio altamente fluido se extiende homogéneamente sobre la superficie del estaño, logrando un espesor uniforme y de superficie lisa. (Groover, 1997).

#### 3.2. Tipos de vidrio

El vidrio flotado o monolítico es un vidrio transparente o coloreado, de superficies planas, obtenido mediante el procedimiento de A. Pilkington. Este vidrio debe asegurar una visión nítida, libre de distorsión, ya que es la materia prima para la fabricación de espejos, vidrios templados y laminados. Cuando el vidrio flotado se rompe, lo hace en pedazos grandes de bordes afilados. Se ofrece en espesores de 1,5 a 19 mm (CAVIPLAN, 2009).

El vidrio templado (VT) es un vidrio flotado al que se le realiza un tratamiento térmico, el que consiste en calentar gradualmente el vidrio hasta la temperatura de ablandamiento 600 y 700 °C, para luego enfriar rápidamente con aire. El vidrio templado una vez que se rompe lo hace en pequeños trozos, este tipo de vidrio es considerado de seguridad.

El vidrio semi-templado se fabrica similarmente al vidrio templado, con la diferencia que el proceso de enfriamiento es más lento, debido a esto se produce una menor tensión en el vidrio. Se rompe en trozos más grandes que el vidrio templado y, por lo tanto, no es considerado como un vidrio de seguridad (Kuraray Europe GmbH, 2013)



Figura 1. Fabricación de VSM Y VST  
Kuraray Europe. (2013). Technical Manual del film PVB Trosifol.

El vidrio laminado es un material compuesto por la unión de dos o más vidrios de diferentes espesores, mediante capas intermedias realizadas con materiales plásticos traslucidos. El principal uso de este material es en la industria automotriz y arquitectónica, como vidrio de seguridad, ya que, en caso de fractura, los fragmentos de vidrio quedan adheridos a la capa del material plástico, evitándose así la proyección de las astillas de vidrio.

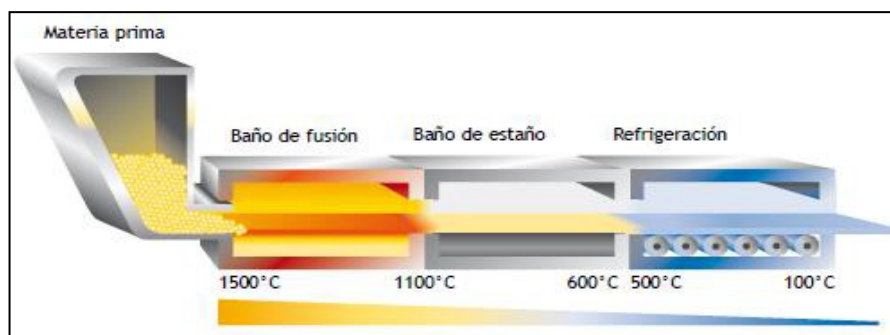


Figura 2. Fabricación del vidrio flotado.  
Kuraray Europe. (2013). Technical Manual del film PVB Trosifol.



### 3.3 Composición del vidrio laminado

El vidrio laminado está compuesto principalmente por capas intermedias de materiales plásticos, como el polivinil butiral, etil-vinil-acetato, polímeros ionoplásticos, poliuretanos y resinas.

La capa de polivinil butiral, es un elastómero, que se obtiene a partir de la combinación de alcohol de polivinilo y butiraldehído, es una resina en polvo de color blanco el que luego es mezclado con plastificantes y aditivos para formar la película, el que es utilizado en los vidrios laminados. Cabe mencionar que la resina de PVB en forma de película es rígida y sin la suficiente elasticidad para su uso en vidrios de seguridad. Los plastificantes adecuados son éster polietilenglicol y ácido adípico. La cantidad de plastificante y el tipo van a determinar las propiedades de la película (Kuraray Europe GmbH, 2013).

### 3.4 Adhesión del polivinil butiral

La adhesión entre el polivinil butiral y el vidrio se hace principalmente por la unión del hidrogeno del grupo de hidróxidos del polivinil butiral y los grupos de silanol (Si-OH) del vidrio. Si la adhesión es baja ocurre la delaminación, si es alta el vidrio laminado fallará a impactos.

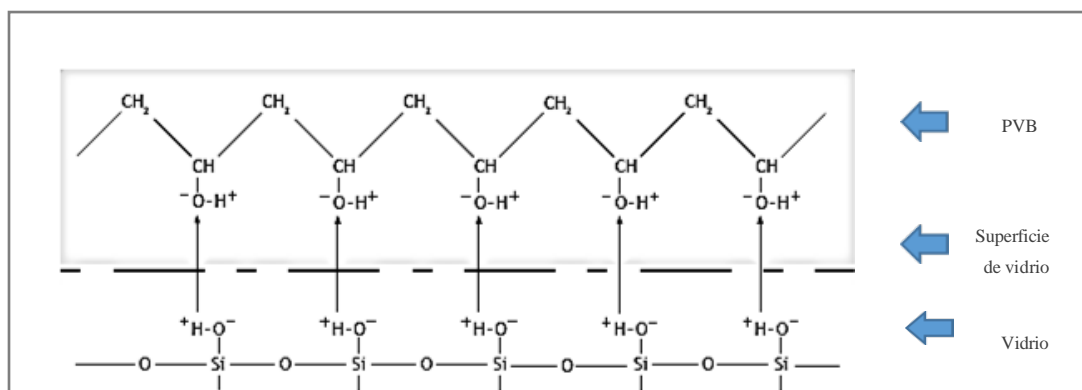


Figura 3. Adhesión de PVB con el vidrio.

Kuraray Europe. (2013). Technical Manual del film PVB Trosifol.

Para que la adhesión entre el polivinil butiral y el vidrio sea óptima, se debe tener en cuenta que existen 3 parámetros que tienen directa incidencia en la calidad del vidrio laminado.

- El agua de lavado debe ser desmineralizada, es decir su conductividad debe ser menor a  $20 \mu\text{S}$
- La humedad relativa en la zona de ensamble de los vidrios laminados debe estar entre los 25 y 30%.
- El ciclo del generador de aire caliente debe tener un tiempo de ciclo, temperatura y presión adecuado.

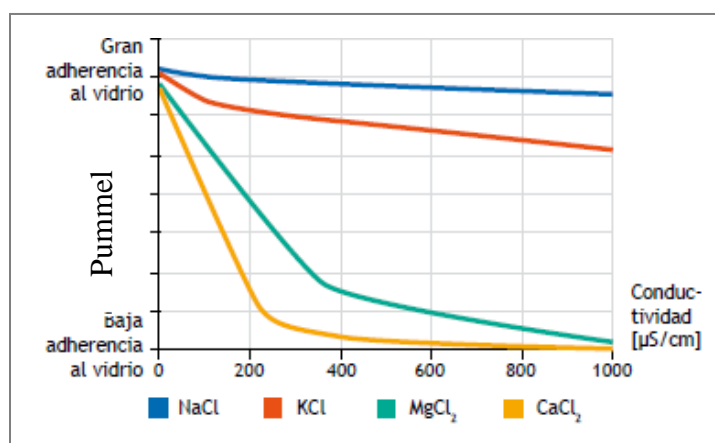


Figura 4. Influencia de iones alcalinos en la adherencia del vidrio.

Kuraray Europe. (2013). Technical Manual del film PVB Trosifol.

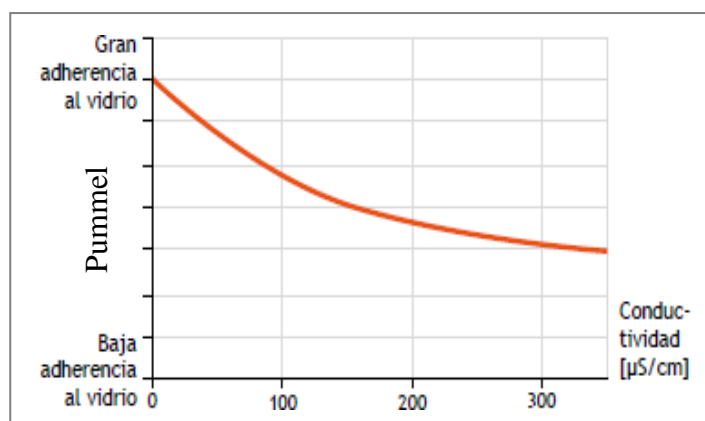


Figura 5. Influencia de la conductividad del agua de lavado en la adherencia del vidrio.

Kuraray Europe. (2013). Technical Manual del film PVB Trosifol

### 3.5. Proceso de Laminación vidrios Lirquén S.A

La fabricación de vidrios laminados en Vidrios Lirquén S.A, ocurre en la siguiente secuencia.

#### 3.5.1. Zona de carga

El proceso comienza en la zona de carga, donde el vidrio flotado es cargado o “volteado” sobre una mesa de aire. Seguido a la carga, se continúa con el lavado, cuya finalidad es extraer las impurezas provenientes en el vidrio, luego se realiza el secado mediante unos sopladores, al término de esta etapa el vidrio queda en condiciones óptimas para ingresar a la sala de armado.

#### 3.5.2. Sala de armado

En la sala de armado se procede a ensamblar los vidrios y la capa de polivinil butiral, este es un proceso semi automatizado. Luego dos operadores cortan el PVB sobrante en todo el contorno del vidrio. Cabe mencionar que esta es una sala climatizada donde se hace control de la temperatura y humedad.

#### 3.5.3. Zona de sellado

Una vez armada la estructura de vidrios/PVB, se continúa con la fase de pre-laminado en la zona de prensado y calentamiento. Esta zona está compuesta por dos rodillos prensadores (calandras), es una zona cerrada y en su interior se encuentra una serie de resistencias eléctricas que permiten calentar los vidrios a una temperatura de 60 °C. En esta etapa se deben lograr tres objetivos, eliminación del aire residual de la estructura, adherencia parcial del vidrio a la lámina de PVB y sellado de los bordes del laminado para evitar la penetración del aire en la generación de aire caliente.

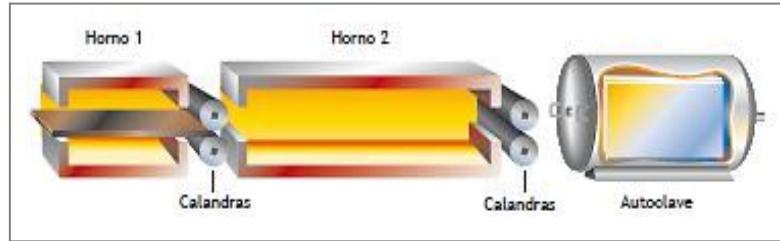


Figura 6. Zona de sellado

Kuraray Europe. (2013). Technical Manual del film PVB Trosifol.

### 3.5.4. Zona de armado de carros

Una vez que ha finalizado la zona de sellado, los pre-laminados llegan a la mesa de descarga por medio de un tren de rodillos. El operador retira el pre-laminado de la mesa de descarga con un cuadro de ventosas, y lo posiciona manualmente en un carro diseñado para el montaje de pre-laminados. Una vez que este carro está completo y preparado, es trasladado a través de un circuito de rieles hacia el interior del generador de aire caliente. Los carros se llenan mediante bloques de pre-laminados separados por listones de fibra de vidrio/plástico, la cantidad de pre-laminados que alcanzan en un carro es variable, ya que depende del tipo de producto.

Los productos se nombran según el espesor de los cristales seguido del espesor del PVB, por ejemplo, el producto 3+3\*0,38\*3600\*2500 es la abreviatura utilizada para nombrar un vidrio laminado de dos cristales de 3 mm, con una capa de PVB de 0,38 mm de espesor y con dimensiones 3600 (mm) de ancho y 2500 (mm) de alto.



Figura 7. Configuración de bloques con 3+3\*0,38\*3600\*2500

Elaboración propia.

### 3.5.5. Zona del generador de aire caliente.

El generador de aire caliente es un equipo de presión y temperatura controlada, cuyo fluido principal de trabajo es aire comprimido. Su función es distribuir uniformemente la presión y temperaturas sobre los vidrios pre-laminados, permitiendo la adhesión total de la película de PVB a las láminas de vidrio. El generador de aire caliente tiene un ciclo que se divide en tres etapas, calentamiento, mantenimiento y enfriamiento:

- El calentamiento ocurre con la adición de aire comprimido al generador de aire caliente desde un acumulador de aire a temperatura ambiente y presión de 12 bar, el aire es homogeneizado y calentado hasta 134 °C a través de un ventilador axial y un grupo de resistencias eléctricas.
- Alcanzadas las condiciones anteriores, se entrará en una fase de mantenimiento de la máxima temperatura y presión (134 °C y 12 bar, respectivamente), el fabricante de polivinil butiral recomienda un tiempo de mantenimiento no menor a 40 minutos.
- Finalizada la fase anterior, se dará inicio a un enfriamiento del aire interior a presión constante, a través de una batería de enfriamiento por la cual recircula agua desde la torre de refrigeración. El aire caliente ingresa a tres radiadores en paralelo ubicados dentro del generador de aire caliente, el que luego es enfriado con agua que circula a través de los tubos de los radiadores, esta agua proviene de una torre de enfriamiento ubicada aproximadamente a 100 metros del generador de aire caliente. El caudal de agua que es ingresado al equipo es regulado por una válvula de control, para así dar cumplimiento al ajuste de la temperatura.

### 3.5.6 Zona de armado de vidrios laminados y etiquetado

Una vez completado el ciclo del generador de aire caliente, el carro es retirado y posicionado en la zona de armado de los vidrios laminados. El operador retira uno a uno los laminados y los posiciona en un carro móvil, armando los paquetes correspondientes por espesores, etiquetándolos y entregándolos a Stockroom.

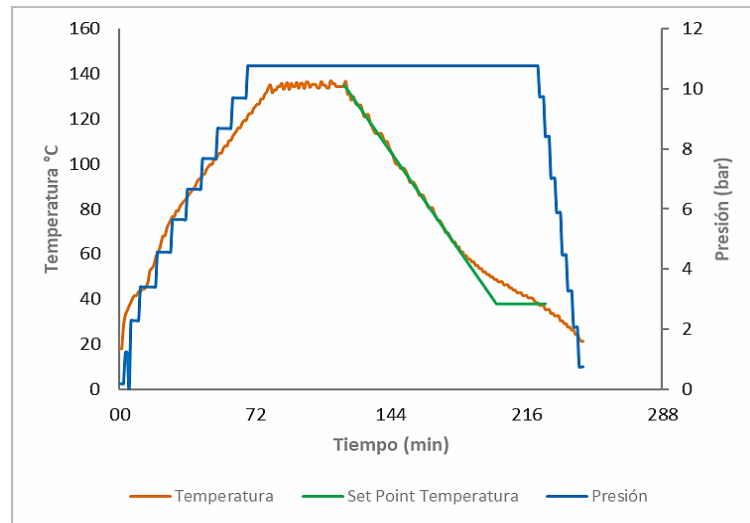


Figura 8. Ciclo real generador de aire caliente.

Elaboración propia.

## 3.6 Control de calidad de vidrios laminados.

### 3.6.1. Ensayo Pummel.

El objetivo del ensayo es determinar la adherencia entre la película de PVB y el vidrio. La escala cualitativa para medición de adhesión es la Pummel, y consiste en golpear repetidas veces un vidrio laminado, siguiendo un patrón establecido. La adhesión está relacionada inversamente por la cantidad de vidrio desprendido del laminado y sus valores van de 0 para la más baja hasta 10 para la más alta.

### 3.6.2. Test de impacto

Permite evaluar si el vidrio laminado se rompe en forma segura. Esta, se considera segura, cuando después del ensayo de impacto por una bolsa de lastre, se observan numerosas rajaduras o fisuras, pero no cortes o aberturas a través de las cuales pueda pasar una esfera de 76mm de diámetro. Para el ensayo, se utiliza una probeta estándar de 1930 (mm) de longitud y 865 (mm) de ancho. La bolsa es lanzada a tres alturas sobre el vidrio laminado, 300, 450 y 1200 (mm). Después de cada impacto se debe inspeccionar la probeta, verificando si se ha roto en forma segura.

### 3.6.3. Test de ebullición.

Permite evaluar la decoloración del PVB, aparición de burbujas y posible deslaminación de vidrios laminados al ser expuestos en agua a una temperatura de 100°C durante dos horas. Para ello, se deben tomar 2 muestras de vidrio laminado de 30x30 (cm), con una frecuencia semanal. Este ensayo también es importante para la longevidad del producto sometido a humedad y calor, ya que en estos casos se producen burbujas en el laminado si no está fabricado adecuadamente. No deben aparecer burbujas en el centro del vidrio.

#### **4. OBJETIVO(S) GENERAL(ES) Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

##### 4.1. Objetivo general

Aumentar la capacidad de producción del generador de aire caliente, mediante ciclos de menor duración.

##### 4.2. Objetivos específicos

- Estudiar la etapa de mantenimiento del generador de aire caliente y determinar la transferencia de calor en el vidrio laminado.
- Caracterizar la etapa de enfriamiento y obtener las capacidades actuales de los equipos principales que componen esta etapa.
- Establecer una solución técnica que permita disminuir el tiempo de ciclo del generador de aire caliente y cuantificar el aumento de la capacidad en base a la nueva propuesta.



## 5. METODOLOGÍA.

El desarrollo de este estudio se enmarca en la evaluación de nuevas alternativas para disminuir el tiempo de ciclo del generador de aire caliente en la producción de vidrios laminados, en Vidrios Lirquén S.A.

Para el logro del objetivo propuesto, se decidió trabajar en el análisis de la etapa de mantenimiento y enfriamiento del generador de aire caliente, debido a que la etapa de calentamiento solo depende de la potencia de las resistencias eléctricas ubicadas en el manto del generador de aire caliente.

Los cálculos y ensayos se realizarán con el producto 3+3+0.38\*3600\*2500, ya que es considerado un producto estándar y que representa el 30% de la producción de vidrios laminados.

### 5.1. Análisis etapa de mantenimiento.

#### 5.1.1. Caracterización de la película de polivinil butiral.

Actualmente no se cuenta con una mayor información acerca de las propiedades térmicas del polivinil butiral y tampoco de la adhesión que ocurre entre polivinil butiral y el vidrio. Por lo tanto, se estimó conveniente analizar una muestra de vidrio laminado mediante un microscopio electrónico de barrido y también un ensayo de calorimetría diferencial de barrido, esto permitirá tener mayor conocimiento acerca del polivinil butiral y su interacción con el vidrio.

#### 5.1.1.1. Estudio de la interfase entre el PVB y el vidrio mediante SEM.

##### 5.1.1.1.1. Preparación de muestras.

Para estudiar la interfase entre el polivinil butiral y el vidrio, se fabricó una muestra de vidrio laminado 3+3\*0.38 con dimensiones de 100x60 (cm), la cual fue ingresada al generador de aire caliente bajo un ciclo normal. Luego esta muestra fue cortada en trozos de 5x5 (cm) con un cortador de punta de diamante y cutter.

##### 5.1.1.1.2. Utilización de SEM.

El microscopio electrónico de barrido (*Scanning Electron Microscope* o SEM) es una técnica de microscopía electrónica que utiliza un haz de electrones que interactúa con la materia, lo que permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra. Este ensayo se llevó a cabo en el Centro de Biomateriales y Nanotecnología de la Universidad del Bío-Bío, el cual consistió en colocar la muestra en una cámara de vacío del SEM sin tratamiento previo, para luego retirar todo el aire y comenzar a bombardear la muestra con un haz de electrones de baja frecuencia, los que son detectados y convertidos en una imagen.

#### 5.1.1.2. Análisis de PVB mediante DSC.

El ensayo de calorimetría diferencial de barrido (*Differential Scanning Calorimetry* o DSC) se llevó a cabo en el Centro de Polímeros Avanzados (CIPA) de la Universidad del Bío-Bío. Este ensayo consiste en obtener la diferencia de calor aplicado entre la muestra y una referencia, esta diferencia de calor es medida como una función del aumento de temperatura.

Se analizaron dos muestras de polivinil butiral de distintos fabricantes, pero con el mismo espesor y color. El ensayo se realizó con una tasa de calentamiento de 0,17 °C/segundo para ambas muestras durante 30 minutos, esto permitió identificar las transiciones térmicas de las muestras de polivinil butiral.

## 5.1.2 Transferencia de calor en vidrios laminados.

### 5.1.2.1 Obtención de temperatura en interior de generador de aire caliente.

Para calcular la transferencia de calor que ocurre entre el aire del generador de aire caliente y los vidrios laminados, es necesario determinar la temperatura que adquiere un vidrio laminado, una vez que el aire dentro del generador alcanza una temperatura de 134°C y 12 bar de presión.

Se utilizarán tiras adhesivas indicadoras de temperatura marca ibv, cuyo rango de medición se encuentra entre los 154 y 116 °C, el cambio de color de blanco al negro, indicará la temperatura en el interior del generador de aire caliente.

Se escogieron tres vidrios pre-laminados (tipo 3+3\*0.38\*3600\*2500) y se colocaron nueve tiras adhesivas en diferentes zonas del vidrio (ver Figura 9).

Luego los vidrios fueron ubicados en el centro de tres bloques, los cuales se posicionaron en la zona interior, exterior y central del carro con pre-laminados, este carro fue ingresado al generador de aire caliente y se procedió a realizar un ciclo normal, ver Figura 10. Una vez terminado el ciclo del generador de aire caliente, se promediaron las temperaturas indicadas en las tiras adhesivas, obteniéndose 130 °C como temperatura promedio.

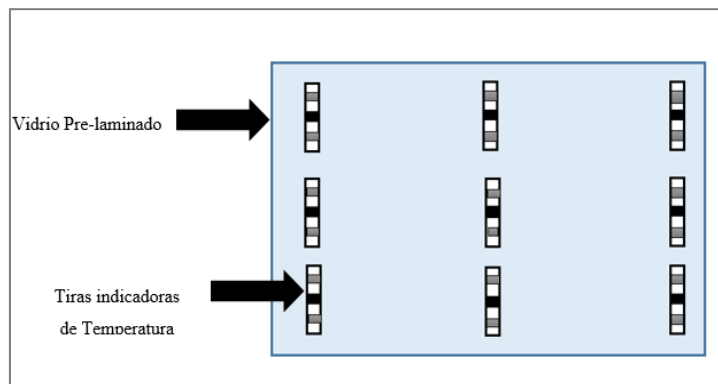


Figura 9. Tiras indicadoras de temperatura en pre-laminado. Elaboración propia.

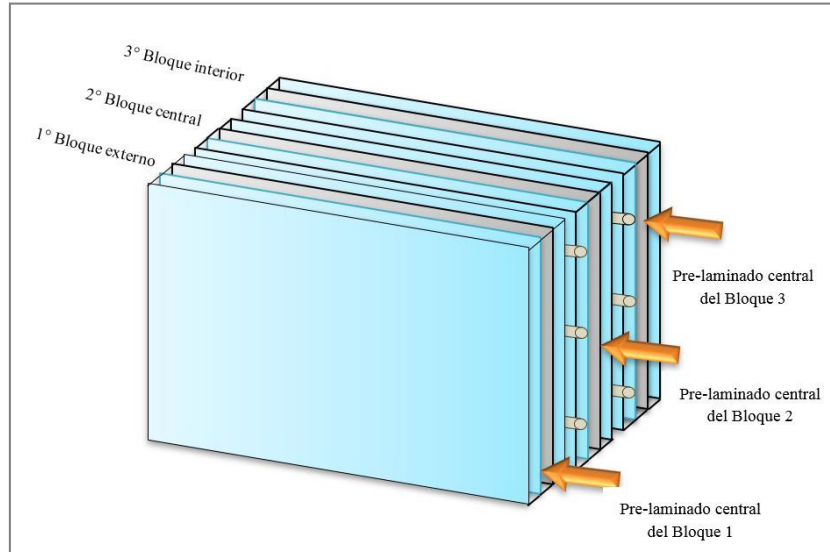


Figura 10. Disposición bloques de pre-laminados. Elaboración propia.

#### 5.1.2.2. Cálculo transferencia de calor.

En la Figura 11. se puede observar el modelo utilizado para el cálculo de la transferencia de calor en un bloque de vidrio laminado estándar, donde la temperatura y la presión utilizada para calentar y adherir el PVB al vidrio es de 134°C (407 K) y 12 bar de presión. Para este estudio la configuración de fue de tres laminados

El propósito de este cálculo es determinar el tiempo que se demora en adquirir el vidrio laminado central una temperatura de 130 °C (403 K). Esto permitirá decidir si se puede disminuir el tiempo de mantenimiento recomendado por el fabricante de polivinil butiral (40 minutos).

La metodología utilizada para calcular la transferencia de calor que ocurre en la fase de mantenimiento del generador de aire caliente hacia los vidrios laminados es la siguiente:

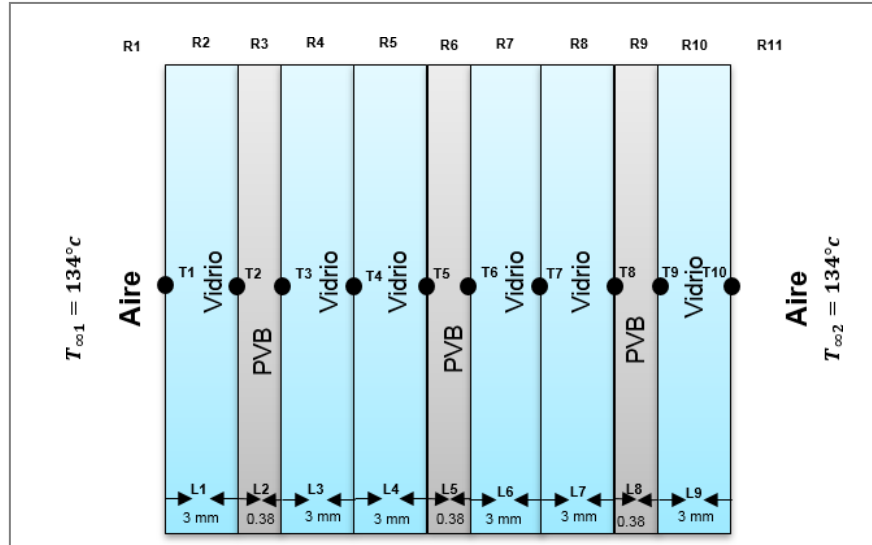


Figura 11. Modelo para el cálculo de transferencia de calor. Elaboración propia.

5.1.2.2.1. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del aire por convección.

Para obtener el coeficiente de transferencia de calor del aire por convección se debe determinar el número de Reynolds y Nusselt.

$$Re = \frac{v \cdot L_c}{\nu} \quad \text{Ecuación (1)}$$

El número de Reynolds es  $9,4819 \cdot 10^7$ , por lo tanto, el flujo de aire dentro del generador de aire caliente tiene un comportamiento turbulento, ya que se encuentra dentro del rango  $5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 10^7$  (Yunus A. Çengel, 2011).

La convección forzada sobre una placa plana con flujo turbulento se debe cumplir que el número de Prandtl debe ser  $Pr > 0,6$  para utilizar la siguiente correlación:

$$Nu = 0,037 Re_L^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

El número de Prandtl para 134°C y 12 bar de presión es 0,70506, el número de Nusselt es 79273,51 y la conductividad térmica del aire 0,033323  $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$ . Por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor del aire por convección es 733,786  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ .

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad \text{Ecuación (3)}$$

#### 5.1.2.2.2. Cálculo de resistencias térmicas para un bloque de vidrio laminado.

La resistencia térmica es la capacidad que tiene un material para oponerse al flujo de calor, el sistema que se está analizando en este informe se compone por tres materiales, aire, vidrio y polivinil butiral, cuyas resistencias térmicas se obtienen según la Ecuación 4 y 5.

$$R_{(\text{Convección, aire})} = \frac{1}{h_1 \cdot A} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$R_{(\text{Conducción, vidrio, PVB})} = \frac{L_1}{k_1 \cdot A} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Las resistencias térmicas del aire, vidrio y polivinil butiral son respectivamente  $1,51 \cdot 10^{-4} \left(\frac{K}{W}\right)$ ,  $3,17 \cdot 10^{-4} \left(\frac{K}{W}\right)$  y  $2,11 \cdot 10^{-4} \left(\frac{K}{W}\right)$ .

#### 5.1.2.2.3. Cálculo de temperaturas intermedias para un bloque de vidrio laminado.

En la Figura 11. Se puede observar que el aire se encuentra en los extremos del bloque de vidrios laminados y a la misma temperatura (134°C), por lo que se optó realizar el análisis a la mitad del bloque, para que no se anulen los términos del numerador de la Ecuación (6).

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty_1} - T_{\infty_2}}{R_{\text{total}}} = (\text{W}) \text{ ó } \left( \frac{\text{J}}{\text{s}} \right) \quad \text{Ecuación (6)}$$

Por lo tanto, la razón de transferencia de calor es:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty_1} - T_5}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = \frac{134 - 130}{1,313 \cdot 10^{-3}} = 3046,46 \text{ (W)}$$

Reemplazando la razón de transferencia en la Ecuación (6), y despejando T se pudieron determinar las temperaturas  $T_1, T_2, T_3, T_4$  y  $T_5$ , sus valores respectivos son 133,54 (°C), 132,57(°C), 131,93(°C), 130,96(°C), y 130,00(°C)

#### 5.1.3.2.4. Cálculo de tiempos para temperaturas intermedias.

Cuando se cuenta con la razón de transferencia de calor  $\dot{Q}$ , entonces se puede determinar la cantidad total de transferencia de calor Q durante un intervalo de tiempo (Holman).

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad \text{Ecuación (7)}$$

Cuando  $\dot{Q}$  es constante la Ecuación (7) se reduce a:

$$Q = \dot{Q} \cdot \Delta t \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

$$\Delta t = \frac{Q}{\dot{Q}} \quad \text{Ecuación (9)}$$

La ganancia de calor de un cuerpo se manifiesta como un aumento en su energía interna, por lo tanto:

$$Q = \Delta U = m \cdot Cp \cdot \Delta T = \text{Joule} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Despejando la Ecuación (10), se obtiene el calor transferido para:

$$Q_1 (T_{\infty 1} - T_1) = 25.983,1125 \text{ (J)} \quad Q_2 (T_1 - T_2) = 54.446,175 \text{ (J)}$$

$$Q_3 (T_2 - T_3) = 4.332,698 \text{ (J)}$$

$$Q_4 (T_3 - T_4) = 54.446,175 \text{ (J)} \quad Q_5 (T_4 - T_5) = 54.446,175 \text{ (J)}$$

Reemplazando el calor transferido en la Ecuación (9), se obtiene el tiempo que toma la transferencia de calor necesaria para que los materiales en estudio tomen la temperatura intermedia estimada.

El tiempo que requiere la transferencia de calor desde el aire al vidrio es 8,53 (s), para el vidrio es de 17, 87 (s) y para una capa de PVB es de 1,42 (s).

Para un mayor detalle de los cálculos realizados ver el Anexo 9.1

### 5.1.3. Ensayo con ciclo de menor duración.

Debido a los cálculos y ensayos realizados, se procedió a disminuir en 10 minutos el ciclo del generador de aire caliente, específicamente la etapa de mantenimiento. Para llevar a cabo lo anterior, se debió modificar el ciclo del generador de aire caliente en el software Fix 32, donde se cambió el tiempo de mantenimiento de la temperatura y presión a 30 minutos y 138 minutos respectivamente. Luego se ingresó un carro con pre- laminados de 3+3+0.38\*3600\*2500 al generador de aire caliente. Una vez terminado el ciclo se procedió a realizar las pruebas de calidad que consisten en una prueba de impacto, test de ebullición y Pummel.



## 5.2. Análisis etapa de enfriamiento.

### 5.2.1. Recopilación de antecedentes operacionales.

Se escogieron dos ciclos del generador de aire caliente, con una cantidad similar de laminados al ensayo especificado en el ítem 5.1.3. Luego a través de la plataforma Sequoia se descargaron los datos de caudal, temperatura de agua de entrada y salida del generador, presión del sistema, temperatura del sistema, y potencia eléctrica de los equipos, todos estos datos se descargaron para intervalos de un minuto hasta completar la duración total del ciclo.

Tabla 1. Ciclos en estudio para el producto  $3+3+0.38*3600*2500$ .

	Ciclo Ensayo	Ciclo Normal	Ciclo Normal
Fecha	26-06-2019	06-05-2019	25-05-2019
Inicio Ciclo	9:32:00	5:33:00	8:40:00
Fin ciclo	13:26:00	9:50:00	12:46:00
Duración Ciclo	3:54:00	4:17:00	4:06:00

### 5.2.2. Balance de energía en el generador de aire caliente.

Una vez obtenidos los datos operacionales de los ciclos del generador de aire caliente, se procedió a realizar una planilla Excel con la finalidad de realizar un balance de energía entre el agua y el aire dentro del generador de aire caliente.

La Ecuación (11) permite establecer el calor absorbido por el agua en intervalos de un minuto, con  $C_p = 4,182$  (kJ/kg °C) y  $\rho_{\text{agua}} = 1000$  (kg/m<sup>3</sup>), se considera densidad contante durante toda la etapa de enfriamiento.

$$Q = \dot{m}_w \cdot C_{p_w} \cdot (T_{w2} - T_{w1}) \quad \text{Ecuación (11)}$$

Reemplazando el calor absorbido por el agua en la Ecuación (13), se puede determinar la temperatura del aire  $t_{a1}$  (Ecuación 14) para cada instante, lo cual debería coincidir con la temperatura del sistema medido por la termocupla del generador de aire caliente.

Calor absorbido por el agua = Calor rechazado por el aire

$$\dot{m}_w \cdot C_{p_w} \cdot \Delta T_w = \dot{m}_a \cdot C_{p_a} \cdot \Delta T_a \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$\dot{m}_w \cdot C_{p_w} \cdot (T_{w2} - T_{w1}) = \dot{m}_a \cdot C_{p_a} \cdot (T_{a2} - T_{a1}) \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$T_{a1} = \frac{T_{a2} - (T_{w2} - T_{w1})}{m_a \cdot C_{p_a}} \quad \text{Ecuación (14)}$$

### 5.2.3. Caracterización de radiadores.

Para caracterizar los radiadores ubicados dentro del generador de aire caliente, fue necesario determinar en terreno las dimensiones, número de tubos y material, ya que no se contaba con toda la información de diseño.

Actualmente, el generador de aire caliente tiene tres radiadores en paralelo, los cuales se utilizan para enfriar el aire caliente del generador. Los radiadores son un tipo de intercambiadores de calor de flujo cruzado, debido a que ingresa aire caliente el cual es impulsado por un ventilador ubicado en la parte posterior del generador de aire caliente, y por los tubos circula agua de enfriamiento desde una torre de enfriamiento.

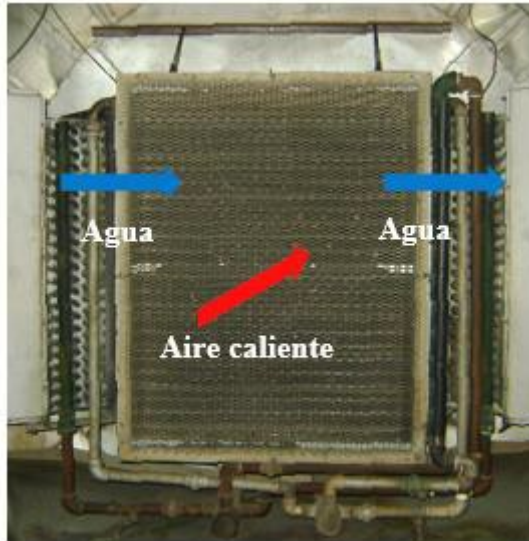


Figura 12. Intercambiador de calor flujo cruzado. Elaboración propia.

#### 5.2.3.1. Capacidad de radiadores.

Mediante la inspección en terreno se pudo determinar que las dimensiones del radiador principal son 800x1020 (mm), tiene 50 tubos y el diámetro externo de los tubos es de 15,9 (mm). Con respecto a los datos de diseño, el flujo de aire es 4,17 (m<sup>3</sup>/s), agua 1,65 (l/s).

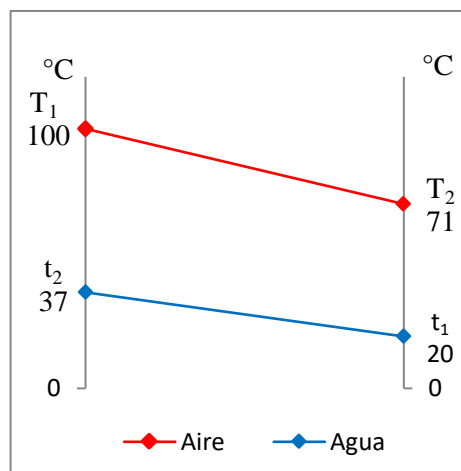


Figura 13. Perfiles de temperaturas de diseño radiador principal.  
Elaboración propia.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \cdot f \quad \text{Ecuación (15)}$$

La diferencia de temperatura media logarítmica es 56,79 °C, se obtuvo reemplazando los datos de diseño de la Figura 13. en la Ecuación (16).

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Para obtener el factor de corrección de temperatura  $f$  es necesario determinar  $R$  y  $S$ , donde:

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} = 1,71 \quad S = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - t_1)} = 0,213 \quad \text{Ecuación (17)}$$

Luego mediante los diagramas del factor de corrección, (ver Anexo 9.2) se pudo determinar que  $f$  es  $\approx 0,97$ .

El área de transferencia de calor del lado de los tubos es 1,89 m<sup>2</sup>, y corresponde al área superficial de estos. Se supuso un diámetro interno y largo de los tubos de 15 (mm) y 800 (mm) respectivamente, por lo tanto:

$$A = \pi \cdot D_i \cdot n^{\circ} \text{ tubos} \cdot L \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$A = \pi \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 0,8 = 1,88 \text{ m}^2$$

La razón de la transferencia de calor del aire caliente hacia el agua caliente se determinó mediante un balance de energía sobre el flujo de aire:

$$Q = \dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot \Delta T_a \quad \text{Ecuación (19)}$$

$$\dot{Q} = 4,17 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 0,946 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (100^\circ\text{C} - 71^\circ\text{C}) = 116,7 \text{ kW}$$

Asumiendo que los tres radiadores tienen similares características se considera que la capacidad nominal es:

$$Q = 116,7 * 3 = 350,1 \text{ (kW)}$$

Despejando el coeficiente global de transferencia de la Ecuación (15), se obtiene:

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T_{ml} \cdot F} = \frac{116,7 \text{ kW}}{1,88 \text{ m}^2 \cdot 56,79 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 0,97} = 1126,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$$

Para determinar la capacidad actual de enfriamiento de los radiadores, se empleará una metodología basada en los métodos de aproximación o área bajo la curva.

Conocido el calor absorbido por el agua, obtenido por la Ecuación (11), se podrá estimar la energía extraída del sistema por cada minuto.

$$E = Q \cdot \text{tiempo} \quad \text{Ecuación (20)}$$

La etapa de enfriamiento tiene una duración en promedio de 120 minutos, por lo tanto, mediante la Ecuación (20) se obtuvo que la energía total es 3.268.430 kJ.

$$E_{\text{total}} = \sum Q \cdot \text{tiempo} = \text{kJ} \quad \text{Ecuación (21)}$$

Por medio de la Ecuación (22), se obtuvo que la capacidad actual es 453,9 (kW).

$$\text{Capacidad (kW)} = \frac{E_{\text{total}} \text{ (kJ)}}{\text{tiempo total enfriamiento (segundos)}} \quad \text{Ecuación (22)}$$

#### 5.2.4. Torre de enfriamiento

La torre de enfriamiento de agua modelo compacto BT-1509 es una torre de tiro inducido, diseñada para un caudal máximo de agua de 30 (m<sup>3</sup>/h), temperatura de entrada y salida de 28 y 22°C.

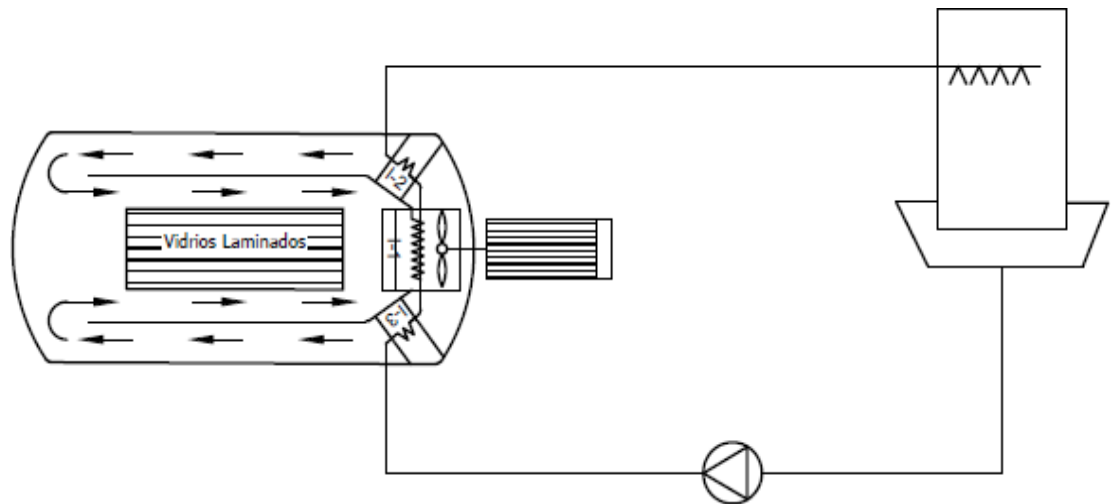


Figura 14. Circuito de enfriamiento

##### 5.2.4.1. Verificación de temperaturas.

Mediante la plataforma Sequoia fue posible obtener los datos de temperatura de entrada y salida del generador de aire caliente, además de la temperatura y humedad relativa del ambiente en el que se encuentra la torre de enfriamiento.

El flujo de agua que sale del generador de aire caliente, es el mismo que ingresa a la torre de enfriamiento, en la Tabla 4 y 5. podemos observar que la temperatura de este flujo de agua supera los 100°C, por lo que se decidió corroborar en terreno mediante el uso de un termómetro con sonda.

Una vez iniciado el ciclo de enfriamiento se debió esperar 10 minutos para realizar las mediciones de temperatura, ya que no llegaba flujo de agua a la torre, la  $T_{\text{máx entrada}}$  y  $T_{\text{salida}}$  medidas fueron 80 y 16°C.

#### 5.2.4.2. Capacidad torre de enfriamiento.

Para calcular la capacidad ideal de la torre de enfriamiento modelo BT-1509 se consideró la temperatura de entrada y de bulbo húmedo especificada en los datos de diseño, ver Anexo 9.3

Por medio de la Ecuación (11) es posible determinar la capacidad nominal ideal y nominal de la torre de enfriamiento.

$$Q = 8,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \cdot (28 - 17^\circ\text{C}) = 383,7 \text{ kW}$$

Para el cálculo de la capacidad nominal se consideró la temperatura de entrada y de salida de la torre:

$$Q = 8,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \cdot (28 - 22^\circ\text{C}) = 209,3 \text{ kW}$$

Para determinar la capacidad actual de enfriamiento de la torre de enfriamiento, se empleará la misma metodología basada en los métodos de aproximación o área bajo la curva utilizada para el cálculo de la capacidad de los radiadores.

La etapa de enfriamiento tiene una duración en promedio de 120 minutos, por lo tanto, mediante la Ecuación (22) se obtuvo que la energía total es 3.326.994,28 kJ y que la capacidad actual es 462,1 (kW).

### 5.3. Estimación de producción.

#### 5.3.1. Recopilación y clasificación de información.

Mediante el software SAP (Systeme Anwendungen und Produkte) fue posible obtener la producción de los últimos meses de la línea de laminado, esta información fue descargada como un tipo de planilla Excel donde se indica la fecha, tipo de producto y la cantidad de metros cuadrados fabricados.

Los datos fueron ordenados y clasificados por tipo de producto, se identificaron 64 productos diferentes, del cual el 70% corresponde a vidrios laminados de tamaño estándar (3600\*2500 (mm<sup>2</sup>)), con un espesor de PVB de 0,38 (mm) y de espesor de cristal de 3, 4 y 5 (mm).

#### 5.3.2. Modelo para cuantificar la producción de laminados

Para cuantificar la producción de laminados, se debió determinar la cantidad de metros cuadrados de pre-laminados que alcanzan en un carro antes de ingresar al generador de aire caliente, para esto se debió considerar la configuración de llenado de los carros por cada tipo de producto.

En base al mix de producción, se obtuvo la cantidad de m<sup>2</sup> de laminados por cada ciclo del generador de aire caliente, Ecuación (23).

$$\frac{\text{m}^2\text{laminados}}{\text{ciclo}} = \frac{\text{m}^2\text{laminados}}{\text{minutos}} \cdot \text{tiempo de ciclo del generador} \quad \text{Ecuación (23)}$$

Mediante la Ecuación (24) se estimó que la capacidad mensual del generador de aire caliente, considerando downtime por movimiento de carros de 79.546 m<sup>2</sup>/mes.

$$\frac{\text{N}^\circ \text{ ciclos}}{\text{mes}} \cdot \frac{\text{m}^2\text{laminado}}{\text{ciclo}} = \frac{\text{m}^2\text{laminado}}{\text{mes}} \quad \text{Ecuación (24)}$$



## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Etapa de mantenimiento

#### 6.1.1. Caracterización de la película de polivinil butiral.

En la Figura 15, se puede observar que no existen espacios entre el polivinil butiral y el vidrio, por lo que se puede creer que la adhesión entre estos dos materiales es buena.

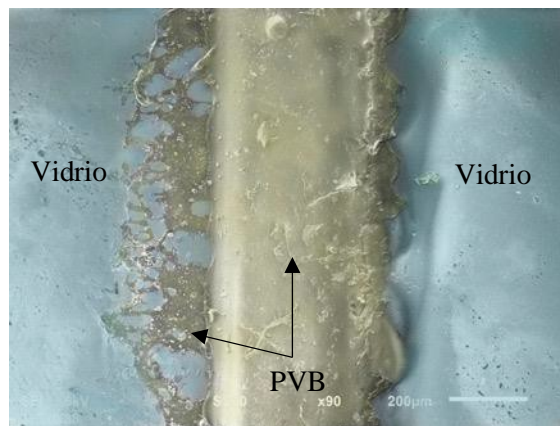


Figura 15. Vidrio laminado 3+3\*0.38 observado en SEM (90x)

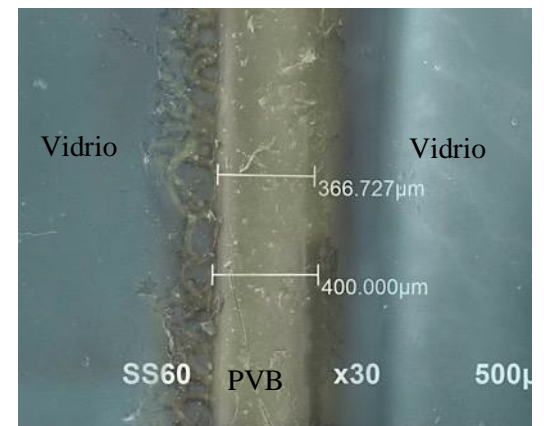


Figura 16. Medidas PVB observado en SEM (30x).

El espesor del polivinil butiral antes de realizarse el proceso en el generador de aire caliente es de 0.38 mm, en la Figura 16, se puede observar que en algunas zonas el PVB se contrae o se expande entre las paredes del vidrio, esto puede deberse a la temperatura y presión que se ejerce dentro del generador, permitiendo que el PVB fluya hacia el exterior de los vidrios.

Con respecto al ensayo DSC se obtuvieron las temperaturas características de transición de dos muestras de polivinil butiral proveniente de diferentes fabricantes, en la Tabla 2 se recopilan las temperaturas de transición vítrea y de fusión. Estos resultados indican que a los 134°C que es la temperatura máxima que se adquiere dentro del generador de aire caliente, el polivinil butiral solo se ablanda y no se funde.

También se puede observar que la diferencia entre las temperaturas de transición de las muestras es aproximadamente de 1°C, lo que es una diferencia no considerable entre ambos fabricantes.

Tabla 2. Temperaturas características polivinil butiral

Fabricante	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)
1	41,43	228,92
2	39,82	227,53

Con respecto a la energía necesaria para elevar la temperatura en cada muestra, esta difiere considerablemente. En las Figura 17 y 18 se puede apreciar que el área bajo la curva para la muestra del fabricante 1 y 2 es de 147,67 y 336, 40 (mJ) respectivamente.

Las reacciones de entrecruzamiento entre el grupo de hidróxidos del polivinil butiral y los grupos de silanol del vidrio son las encargadas de que exista la adhesión entre estos dos materiales. Estas reacciones ocurren sobre los 100°C (Chaudhry, Mittalb, & Brajendra, 2015), por lo que el polivinil butiral del fabricante 2 necesitará más anergia para alcanzar la temperatura en que ocurre la adhesión.

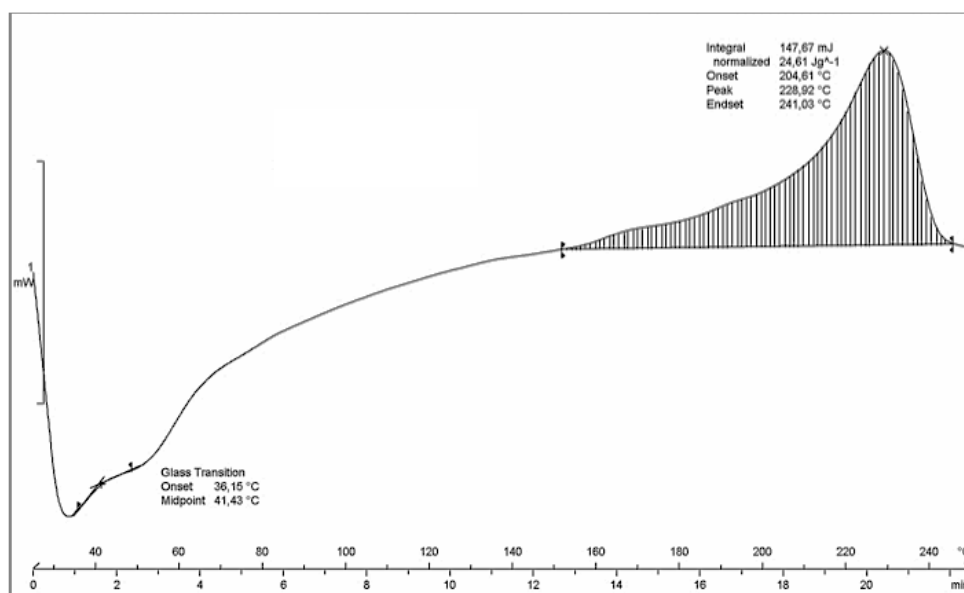


Figura 17. Transición térmica PVB, fabricante 1.

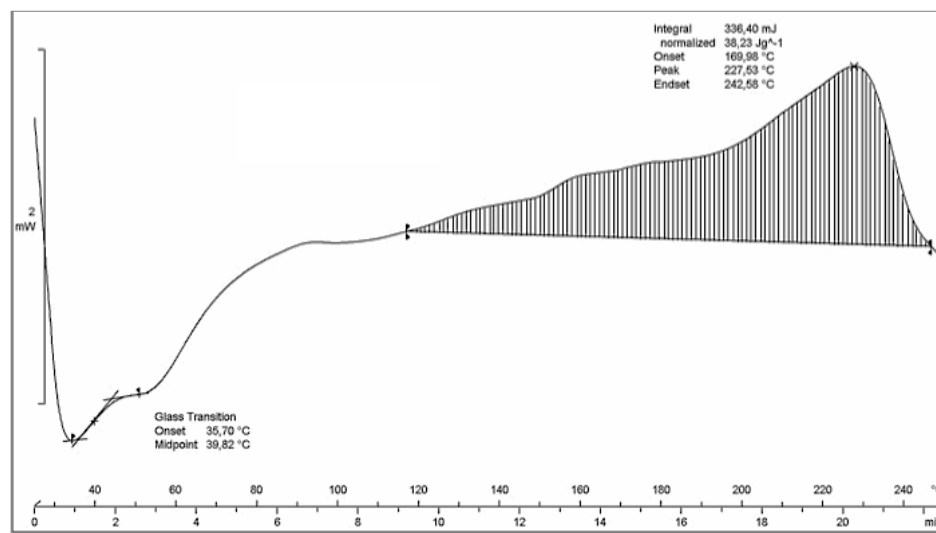


Figura 18. Transición térmica PVB, fabricante 2.

### 6.1.2 Transferencia de calor en vidrios laminados.

Los cálculos realizados permitieron determinar teóricamente, que la capa central de un vidrio laminado, es decir el polivinil butiral, expuesto a 134°C y 12 bar de presión adquiere una temperatura de 130°C a los 64 segundos una vez comenzada la etapa de mantenimiento.

Uno de los fabricantes de polivinil butiral indica que la temperatura en el centro de vidrio laminado de 6.2 mm expuesto a 135°C adquiere una temperatura de 130° C a los 120 segundos por lo que propone un tiempo de mantenimiento entre los 20 y 25 minutos (Saflex, 1994). Lo anterior se contrapone con un segundo fabricante el cual indica que el tiempo de mantenimiento no debe ser menor a los 40 minutos.

Por lo tanto, se estimó conveniente realizar un ensayo con un tiempo de mantenimiento de 30 minutos, ya que es un valor intermedio entre las recomendaciones de los dos fabricantes.

6.1.3. Ensayo con ciclo de menor duración.

Una vez concluido el ensayo con un ciclo corto (30 minutos de mantenimiento) se obtuvo que el 96% de los pre- laminados ingresados al generador de aire caliente salieron en perfectas condiciones, el 4% restante presentaba problemas por quiebre debido a la manipulación. Con respecto a los ensayos de calidad, los vidrios laminados clasificaron satisfactoriamente. En la Tabla 3. se muestra un resumen de los resultados.

Tabla 3. Registro de ensayos de calidad en vidrios laminados

Espesor de cristal (mm)	Espesor PVB (mm)	Humedad %	Temperatura (°C)	Test de impacto (Clasificación A-B-C)	Pummel (Clasificación 0-10)	Test Ebullición (N° de burbujas)
3	0,38	20,4	16,3	B	7	0

6.2. Etapa de enfriamiento

6.2.1. Balance de energía en el generador de aire caliente.

Debido al balance de energía realizado en el generador de aire caliente y considerando un 10 % de pérdidas de energía en el ambiente, se estimó teóricamente la temperatura del aire al interior del generador durante intervalos de un minuto durante la etapa de enfriamiento, y se obtuvo una diferencia entre un 8% y 40 % de la temperatura real medida por la termocupla del generador de aire caliente.

Tabla 4. Extracto de planilla Excel para el cálculo de calor absorbido por el agua de los radiadores en diferentes instantes

Tiempo (min)	T <sub>entrada</sub> agua (°C)	T <sub>salida</sub> agua (°C)	Caudal (l/min)	m <sub>w</sub> (kg/s)	T <sub>real</sub> aire (°C)	Q <sub>agua</sub> (kW)
00	20	91	29	0,48	131,082	143,5
01	18	104	30	0,50	131,082	179,8
02	17	112	28	0,47	128,454	185,4
03	17	120	65	1,08	130,093	466,6
04	17	124	32	0,53	127,515	238,7
05	17	128	47	0,78	126,256	363,6
06	16	130	65	1,08	126,256	516,5
07	15	130	48	0,80	126,256	384,7

Tabla 5. Extracto de planilla Excel para la estimación de temperatura teórica del aire.

Tiempo (min)	Δt <sub>agua</sub>	Caudal (l/min)	T <sub>real</sub> aire (°C)	T <sub>teórica</sub> aire (°C)	Q <sub>agua</sub> 10% pérdidas (kW)	Diferencia entre T <sub>real</sub> y T <sub>teórica</sub>
00	71	29	131,1	128,5	129,1	2%
01	86	30	131,1	120,7	161,8	8%
02	95	28	128,5	120,4	166,9	6%
03	103	65	130,1	101,5	419,9	22%
04	107	32	127,5	116,3	214,8	9%
05	111	47	126,3	106,5	327,3	16%
06	114	65	126,3	96,5	464,8	24%
07	115	48	126,3	104,0	346,7	18%

Temperatura del aire dentro del generador de aire caliente medido con termocupla.

Temperatura del aire calculado con el calor absorbido por el agua, Ecuación (12)

La diferencia entre la temperatura del aire real y calculada puede deberse a una descalibración de los equipos de medición, o también a el lugar donde se encuentra tomando la medición, ya que la temperatura no es homogénea dentro del generador, existiendo zonas con mayor temperatura (cerca de la puerta) y zonas más frías (superficie del generador). También puede ocurrir debido a una mala aislación del equipo, por lo que el calor absorbido por el agua no solo disminuye la temperatura del aire, sino que también se encarga de absorber el calor proveniente de las paredes del equipo. Y por último una mala mantención de los equipos de refrigeración, puede provocar la formación de incrustaciones en las tuberías de los radiadores y suciedad en los paneles de relleno de la torre de enfriamiento.

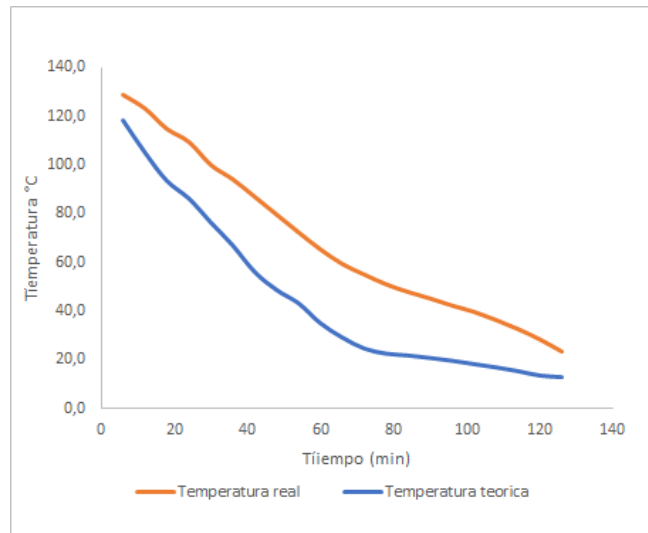


Figura 19. Temperatura real y teórica del aire caliente (°C).

## 6.2.2 Capacidades de los equipos

Los valores de la capacidad nominal y la capacidad actual calculada de los equipos que componen el circuito de enfriamiento del generador de aire caliente se presentan a continuación.

Tabla 6. Capacidad de los equipos que componen el circuito de enfriamiento.

Equipo	Capacidad nominal	Capacidad actual	
		Mínima	Máxima
Radiadores	350 (kW)	142 (kW)	900 (kW)
Torre de enfriamiento	209 (kW)	113 (kW)	875 (kW)
Bomba centrífuga	500 (l/min)	29 (l/min)	288 (l/min)

Las potencias actuales de los equipos que componen el circuito de enfriamiento tienen una alta variación durante la etapa de enfriamiento del generador de aire caliente, en la Tabla 7. se puede apreciar el valor mínimo y máximo de trabajo de estos equipos.

Mediante el cálculo de la energía extraída durante la etapa de enfriamiento (métodos de aproximación o área bajo la curva) se pudo estimar que la capacidad actual de refrigeración tanto de los radiadores como de la torre de enfriamiento es 453,9 y 462,1 (kW) respectivamente, lo que está sobre las capacidades nominales de los equipos.

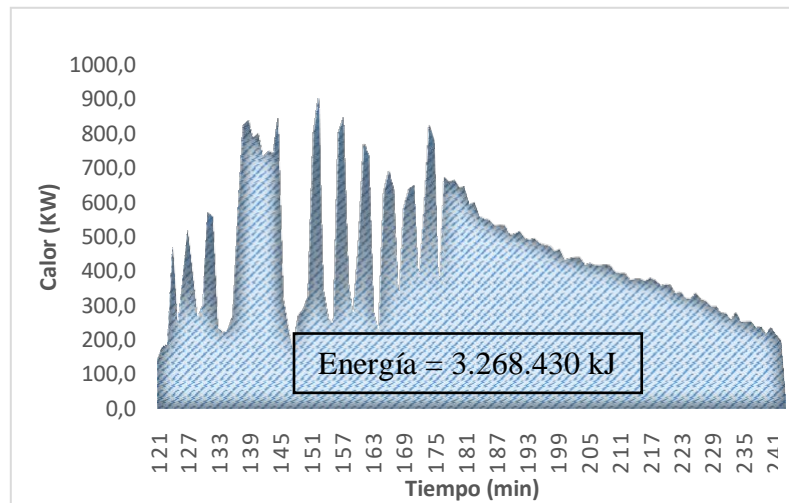


Figura 20. Variación de la potencia de enfriamiento de radiadores.

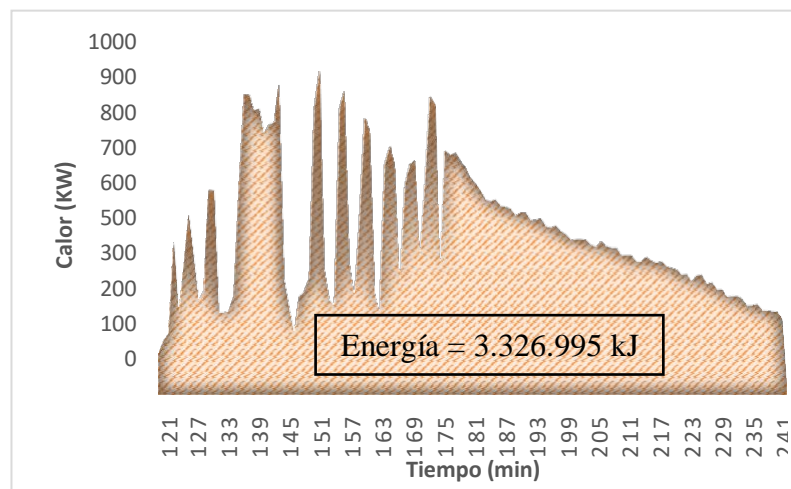


Figura 21. Variación de potencia de la torre de enfriamiento

6.2.3. Ciclo de generador de aire caliente.

En la Figura 22. se presenta el ciclo del generador de aire caliente actual e ideal del área de procesados de Vidrios Lirquén S.A. Actualmente, se espera que el enfriamiento ocurra según el ajuste de la temperatura el cual fue especificado por el área de control de la empresa, el enfriamiento ideal debiera tomar 80 minutos a una tasa de  $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Hoy en día, la etapa de enfriamiento se demora 120 minutos a una tasa de  $0,93^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

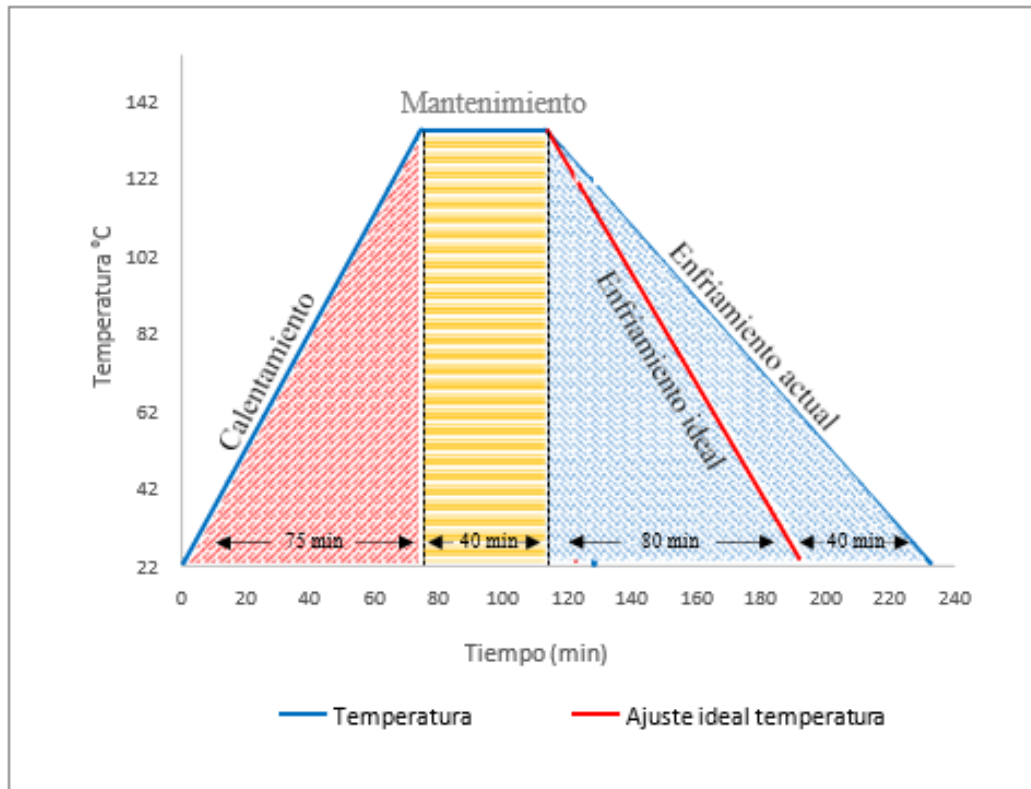


Figura 22. Ciclo del generador de aire caliente actual e ideal

Si las pérdidas de calor absorbido por el agua no superaran el 10 %, la etapa de enfriamiento podría ocurrir durante 75 minutos a una tasa de  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .



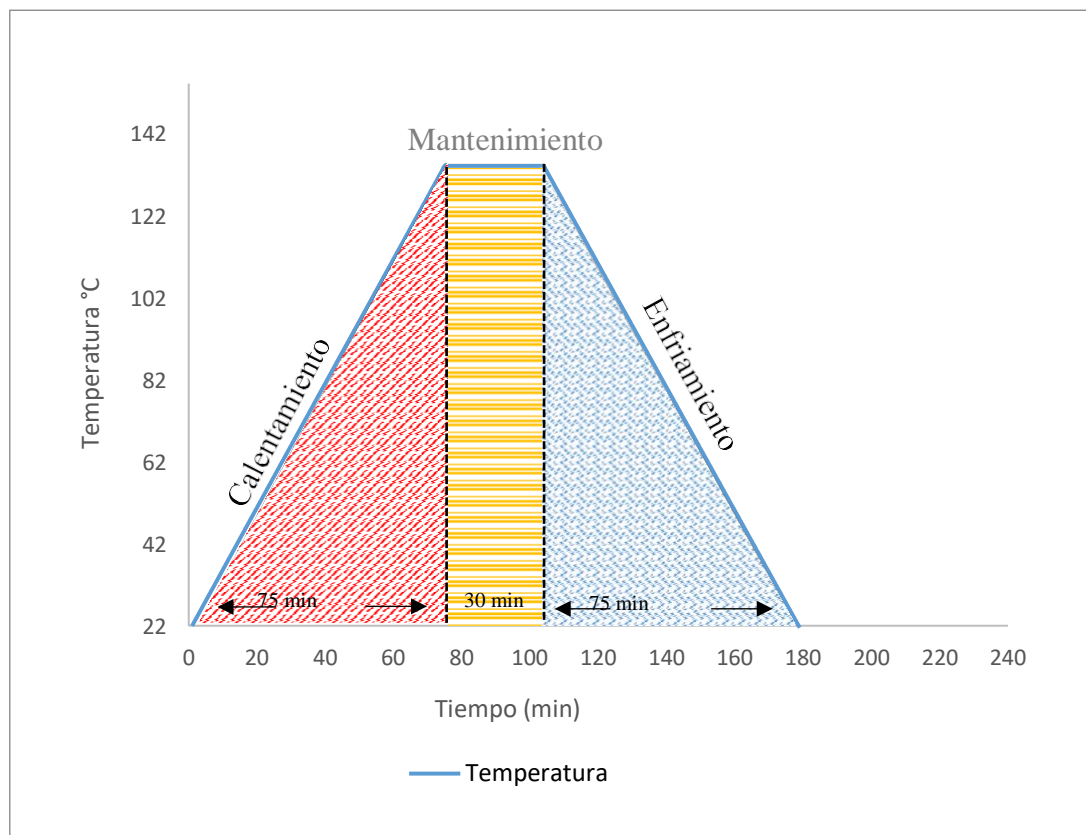


Figura 23. Ciclo óptimo

En la Figura 23. Se aprecia el ciclo que podría tener el generador de aire caliente si se considerara la disminución del tiempo de la etapa de mantenimiento y si se solucionaran los problemas de pérdidas de energía que ocurren actualmente en el sistema. Este ciclo tendría una duración de 180 minutos versus los 240 minutos que toma actualmente, existiendo una reducción de tiempo de 60 minutos.

### 6.3. Aumento de capacidad del generador de aire caliente.

Actualmente la capacidad del generador de aire caliente de transformar pre-laminados a vidrios laminados es de 79.546 (m<sup>2</sup>/mes). Con la reducción de 10 minutos en la etapa de mantenimiento es posible aumentar esta capacidad en un 3%.

Si se pudiera solucionar la pérdida de energía que existe en el sistema y se considerara los 10 minutos de reducción en la etapa de mantenimiento la capacidad sería 96.901(m<sup>2</sup>/mes), que corresponde a un aumento de un 22%.

Tabla 7. Capacidad del generador de aire caliente

Tiempo ciclo (min)	Capacidad del generador de aire caliente (m <sup>2</sup> /mes)
240	79.546
230	81.994
190	93.501
180	96.901

#### 6.4. Estimación económica

Se estima que el m<sup>2</sup> de vidrio laminado tiene un valor comercial de 20 dólares. Si se considera la disminución de 10 minutos de la etapa de mantenimiento se podría aumentar la capacidad de producción de laminados del generador de aire caliente en 2.448 m<sup>2</sup>/mes. Lo que equivale a un ingreso extra mensual de 48.960 dólares/mes.

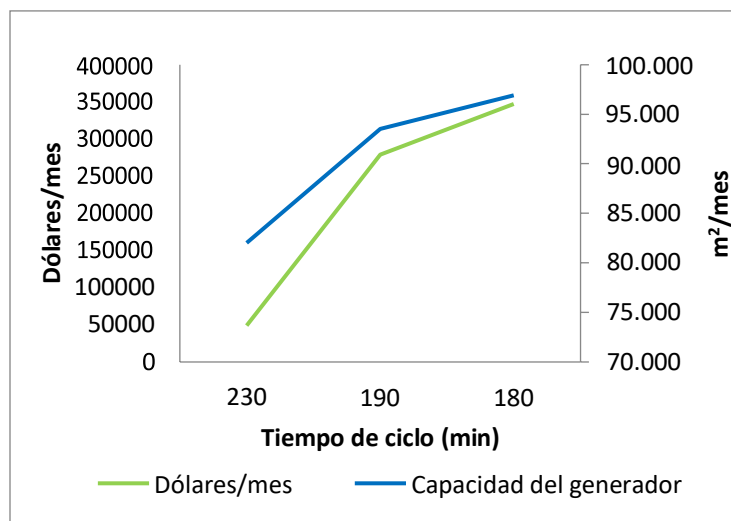


Figura 24. Estimación económica con respecto a la duración del ciclo del generador.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 7.1. Conclusiones

El cálculo de transferencia de calor entre el aire caliente del generador y los vidrios laminados permitió estimar que el polivinil butiral requiere teóricamente 64 segundos para adquirir en su centro una temperatura de 130 °C.

Debido al balance de energía realizado entre el aire del generador de aire caliente y el agua de enfriamiento se halló que existe una diferencia entre un 8% y 40% entre la temperatura indicada por el equipo de medición y la calculada teóricamente.

La capacidad actual de los radiadores y de la torre de enfriamiento son superiores a las capacidades nominales, debido a las pérdidas de energía que ocurren en el sistema. La tasa de enfriamiento óptima es de 1,4 °C/min durante 80 minutos, actualmente el generador de aire caliente se enfría a una velocidad de 0,93 °C/min por un tiempo de 120 minutos. Si las pérdidas de calor absorbido por el agua no superaran el 10 %, la etapa de enfriamiento podría ocurrir durante 75 minutos a una tasa de 1,5 °C/min.

Es posible disminuir la etapa de mantenimiento de 40 a 30 minutos del producto  $3+3*0.38*3600*2500$ , ya que la calidad de los vidrios no se vio afectada a la hora de realizar los ensayos de calidad. Además, implementar esta mejora no tiene ningún costo asociado para la empresa, por el contrario, aumenta la capacidad del generador de aire caliente en 2.448 m<sup>2</sup>/mes, lo que equivale a un ingreso extra mensual de 48.960 dólares/mes.

## 7.2. Recomendaciones

Con respecto a la etapa de mantenimiento, se recomienda continuar realizando ensayos disminuyendo entre 10 y 20 minutos el ciclo del generador, extendiéndolo a nuevos productos. Ya que se comprobó que es una buena alternativa, ya que no tiene costos para la empresa.

Revisar equipos de medición de temperatura dentro del generador de aire caliente, ya que existe mucha diferencia entre la temperatura del aire medida y la calculada.

Aumentar los puntos de medición de temperatura dentro del generador de aire caliente, ya que actualmente solo se toma en un solo punto. La temperatura dentro del equipo no es homogénea, existen zonas frías y calientes, por lo que es importante tener un promedio de la temperatura del interior.

Inspeccionar circuito de tuberías de equipos de enfriamiento, específicamente de los radiadores, ya que es posible que se hayan formado incrustaciones debido a que no se realiza ningún tipo de prevención ni de revisión.

Mejorar la aislación térmica del equipo, ya que un estudio termográfico realizado por la empresa Vidrios Lirquén S.A muestra zonas con alta temperaturas.

Realizar limpieza en las placas de relleno de la torre de enfriamiento, ya que en terreno se pudo observar que estas se encontraban sucias. El flujo de agua que sale de la torre de enfriamiento recircula hacia los radiadores, lo que puede estar dañando el equipo.

Con estas recomendaciones se puede disminuir el ciclo del generador de aire caliente y también mejorar la eficiencia energética del generador.

## 8. REFERENCIAS

Amstock, J. (1999). Manual del Vidrio en la Construcción. México: MC GRAW-HILL.

CAVIPLAN. (diciembre de 2009). Manual del Vidrio Plano. (3° Edición). Buenos Aires, Argentina. Recuperado el 30 de mayo de 2019

Chaudhry, A., Mittal, V., & Brajendra, M. (2015). Inhibition and promotion of electrochemical reactions by graphene in organic.

Elzière, P. (29 de septiembre de 2016). Laminated glass: dynamic rupture of adhesion. Francia.

Groover, M. P. (1997). Fundamentos de Manufactura Moderna. México.

Himmelblau, D. (s.f.). Principios básicos y calculos de ingeniería química. (Sexta edición). (P. H. S.A, Ed.)

Holman, J. (s.f.). Transferencia de calor (Octava Edición ed.). Mexico: Mc Graw- Hill. Kern, D.

(1999). Procesos de transferencia de calor. Mexico: Continental S.A. Kukkonen, K. (1998).

Automatic Autoclave. Tamglass Engineering.

Kuraray Europe GmbH. (2013). Technical Manual procesado del film PVB Trosifol (Sexta edición ed.).

LLanos, C. (2000). Análisis mecánico y estudio de transferencia de energía en torre de enfriamiento. Chile.

Mora, J. (2017). Evaluación d eficiencia de torres de enfriamiento en estación vacio, Compañia Siderúrgica Huachipato. Chile.

Osses, R. (1982). Estudio sobre torre de enfriamiento. Chile. Saflex. (1994). Guia del vidrio laminado. Belgica: Monsanto.

Towler, G., & Sinnott, R. (2013). Chemical engineering design (2° Edición ed.). Butterworth-Heinemann.

Yunus A. Çengel, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa. (Cuarta ed.). (P. E. Roig, Ed.) The McGraw-Hill.

## 9. ANEXOS

### 9.1. Cálculo de transferencia de calor

9.1.1. Obtención de parámetros Pr, Cp, k, ρ y ν para el aire a 134°C y 12 bar. El número de Pr, Cp, y k no varían con la presión por lo tanto sólo es necesario interpolar los valores para 134°C [ (Yunus A. Çengel, 2011)].

Tabla 9. Parámetros para el aire a 120 y 140 °C

Variable	P (atm)	120°C	140°C
Pr	1	0,7073	0,7041
Cp $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right)$	1	1011	1013
k $\left(\frac{\text{W}}{\text{m K}}\right)$	1	0,03235	0,03374
ρ $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	1	0,8542	0,8977
ν $\left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$	1	$2,522 \cdot 10^{-5}$	$2,745 \cdot 10^{-5}$

Fuente: (Yunus A. Çengel, 2011, pág. 884)

### 9.1.2. Interpolación

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \cdot (x - x_0) \quad \text{Ecuación (25)}$$

Interpolación para calor específico:

$$Cp (134^\circ\text{C}) = 1011 + \frac{1013 - 1011}{140 - 120} \cdot (134 - 120) = 1012,4 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right)$$

Interpolación para Número de Prandtl

$$\text{Pr} (134^\circ\text{C}) = 0,7073 + \frac{0,7041 - 0,7073}{140 - 120} \cdot (134 - 120) = 0,70506$$

Interpolación para Conductividad térmica

$$k (134^\circ\text{C}) = 0,03235 + \frac{0,03374 - 0,03235}{140 - 120} \cdot (134 - 120) = 0,033323 \left( \frac{\text{W}}{\text{m K}} \right)$$

Las propiedades  $\rho$  y  $\nu$  a una presión diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de  $\rho$  a la temperatura dada por P y al dividir  $\nu$  entre P [Yunus A. Çengel, 2011].

$$12 \text{ bar} = 11,8431 \text{ atm}$$

$$\rho (120^\circ\text{C}) = 11,8431 \cdot 0,8542 = 10,1164$$

$$\rho (140^\circ\text{C}) = 11,8431 \cdot 0,8977 = 10,6316$$

$$\nu (120^\circ\text{C}) = 11,8431 \cdot 2,522 \cdot 10^{-5} = 2,1295 \cdot 10^{-6}$$

$$\nu (140^\circ\text{C}) = 11,8431 \cdot 2,745 \cdot 10^{-5} = 2,3178 \cdot 10^{-6}$$

Interpolación para Densidad

$$\rho (134^\circ\text{C}) = 10,1164 + \frac{10,6316 - 10,1164}{140 - 120} \cdot (134 - 120) = 10,47704 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Interpolación para Viscosidad cinemática:

$$\nu (134^\circ\text{C}) = 2,1295 \cdot 10^{-6} + \frac{2,3178 \cdot 10^{-6} - 2,1295 \cdot 10^{-6}}{140 - 120} \cdot (134 - 120)$$

$$\nu (134^\circ\text{C}) = 2,26131 \cdot 10^{-6} \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

9.1.2. Obtención de número de Reynolds.

$$\text{Re} = \frac{v \cdot L_c}{\nu}$$



- Cálculo de Velocidad

Datos:

Velocidad de ventilador = 1750 rpm

Radio ventilador = 0,325 m

Longitud característica = 3,6 m

$$1 \text{ rpm} = \frac{2\pi \text{ rad}}{60 \text{ s}} = 0,105 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$v = 1750 \text{ rpm} \cdot 0,105 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 0,325 \text{ m} = 59,56 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{59,56 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 3,6 \text{ m}}{2,26131 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 9,4819374 \cdot 10^7$$

El número de Reynolds es  $9,4819374 \cdot 10^7$ , esto indica que el flujo de aire dentro del autoclave tiene un comportamiento turbulento [Yunus A. Çengel, 2011].]

Laminar:  $\text{Re} < 5 \cdot 10^5$

Turbulento:  $5 \cdot 10^5 \leq \text{Re} \leq 10^7$

Por lo tanto, para la convección forzada sobre una placa plana con flujo turbulento se deben cumplir los siguientes parámetros [Yunus A. Çengel, 2011]

Flujo turbulento =  $5 \cdot 10^5 < \text{Re} < 10^7$

$$\text{Nu} = 0,037 \text{ Re}_L^{0.8} \text{ Pr}^{\frac{1}{3}} \quad \text{Pr} > 0,6$$

$$\text{Sh} = 0,037 \text{ Re}_L^{0.8} \text{ Sc}^{\frac{1}{3}} \quad \text{Sc} > 0,5$$

9.1.3. Número de Nusselt:

$$Nu = 0,037 Re_L^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 0,037 \cdot (9,4819374 \cdot 10^7)^{0.8} 0,70506^{\frac{1}{3}} = 79273,50957$$

9.1.4. Cálculo de Coeficiente de transferencia de calor del aire por convección:

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad \text{por lo tanto,} \quad h = \frac{Nu \cdot k}{L_c}$$

$$h_{\text{aire}} = \frac{79273,50957 \cdot 0,033323 \frac{W}{mK}}{3,6 \text{ m}} = 733,786 \frac{W}{m^2K}$$

9.1.5. Cálculo de resistencias térmicas para un bloque de vidrio laminado 3+3+0,38.

Datos:

$$\text{Densidad del vidrio} = 2500 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{Espesor} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Area} = 9 \text{ m}^2$$

$$k_{\text{vidrio}} = 1,05 \frac{W}{m K}$$

$$k_{\text{PVB}} = 0,20 \frac{W}{m K}$$

$$\text{Densidad de PVB} = 1,065 \frac{g}{cm^3}$$

$$C_p \text{ PVB} = 1,85 \frac{J}{g K}$$

$$R_{1(Aire)} = \frac{1}{h_1 \cdot A} = \frac{1}{733,8 \frac{W}{m^2K} \cdot 9 \text{ m}^2} = 1,51 \cdot 10^{-4} \frac{K}{W}$$

$$R_{2(vidrio)} = \frac{L_1}{k_1 \cdot A} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,05 \frac{W}{m K} \cdot 9 \text{ m}^2} = 3,17 \cdot 10^{-4} \frac{K}{W}$$

$$R_{3(PVB)} = \frac{L_2}{k_2 \cdot A} = \frac{3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{0,20 \frac{W}{m K} \cdot 9 \text{ m}^2} = 2,11 \cdot 10^{-4} \frac{K}{W}$$

$$R_4 (\text{vidrio}) = \frac{L_3}{k_3 \cdot A} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,05 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 9 \text{ m}^2} = 3,17 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_5 (\text{vidrio}) = \frac{L_4}{k_4 \cdot A} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,05 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 9 \text{ m}^2} = 3,17 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_6 (\text{PVB}) = \frac{L_5}{k_5 \cdot A} = \frac{3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{0,20 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 9 \text{ m}^2} = 2,11 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_7 (\text{vidrio}) = \frac{L_6}{k_6 \cdot A} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,05 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 9 \text{ m}^2} = 3,17 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_8 (\text{vidrio}) = \frac{L_7}{k_7 \cdot A} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,05 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 9 \text{ m}^2} = 3,17 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_9 (\text{PVB}) = \frac{L_8}{k_8 \cdot A} = \frac{3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{0,20 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 9 \text{ m}^2} = 2,11 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{10} (\text{vidrio}) = \frac{L_9}{k_9 \cdot A} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,05 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 9 \text{ m}^2} = 3,17 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{11} (\text{Aire}) = \frac{1}{h_1 \cdot A} = \frac{1}{733,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 9 \text{ m}^2} = 1,51 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

9.1.6. Cálculo de temperaturas intermedias para un bloque de vidrio laminado 3+3+0,38.

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty_1} - T_{\infty_2}}{R_{\text{total}}} = W \text{ ó } \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

- Cálculo de la razón de trasferencia de calor

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty_1} - T_5}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = \frac{(407 - 403 \text{ K})}{1,313 \cdot 10^{-3}} = 3046,46 \text{ W}$$

- Cálculo de temperaturas intermedias.

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty_1} - T_1}{R_1} = \frac{407 - T_1}{1,51 \cdot 10^{-4}} = 3046,46 \text{ W}$$

$$T_1 = 134 - 3046,46 \cdot 1,51 \cdot 10^{-4} = 406,5399845 \text{ K}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_2} = \frac{406,5399845 - T_2}{3,17 \cdot 10^{-4}} = 3046,46 \text{ W}$$

$$T_2 = 406,5399845 - 3046,46 \cdot 3,17 \cdot 10^{-4} = 405,573 \text{ K}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_2 - T_3}{R_3} = \frac{405,573 - T_3}{2,11 \cdot 10^{-4}} = 3046,46 \text{ W}$$

$$T_3 = 405,573 - 3046,46 \cdot 2,11 \cdot 10^{-4} = 404,930 \text{ K}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_3 - T_4}{R_4} = \frac{404,930 - T_4}{3,17 \cdot 10^{-4}} = 3046,46 \text{ W}$$

$$T_4 = 404,930 - 3046,46 \cdot 3,17 \cdot 10^{-4} = 403,964 \text{ K}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_4 - T_5}{R_4} = \frac{403,964 - T_5}{3,17 \cdot 10^{-4}} = 3046,46 \text{ W}$$

$$T_5 = 403,964 - 3046,46 \cdot 3,17 \cdot 10^{-4} = 402,998 \text{ K}$$

9.1.7. Cálculo de tiempos para temperaturas intermedias.

$$Q = \int_0^{\Delta \text{tiempo}} \dot{Q} dt$$

Cuando  $\dot{Q}$  es constante:

$$Q = \dot{Q} \cdot \Delta t \qquad \Delta t = \frac{Q}{\dot{Q}}$$

La ganancia de calor por convección del cuerpo se manifiesta como un aumento en su energía interna.

$$Q = \Delta U = m \cdot C_p \cdot \Delta T = \text{Joule}$$

Tiempo de  $T_{\infty 1}$  a  $T_1$ :

$$m = \rho \cdot \text{volumen}$$

$$Q = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 835 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot (407 - 406,539) = 25983,1125 \text{ J}$$

$$\dot{Q} = 3046,46 \text{ W ó } \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

$$t_0 = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{25983,1125 \text{ J}}{3046,46 \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 8,52895 \text{ s (aire)}$$

Tiempo de  $T_1$  a  $T_2$ :

$$Q = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 835 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot (406,539 - 405,573) = 54446,175 \text{ J}$$

$$\dot{Q} = 3046,46 \text{ W ó } \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

$$t_1 = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{54446,175 \text{ J}}{3046,46 \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 17,87 \text{ s (vidrio)}$$

Tiempo de  $T_2$  a  $T_3$ :

$$\rho_{\text{PVB}} = 1,065 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \cdot \frac{1000000 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} = 1065 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C_{p\text{PVB}} = 1,85 \frac{\text{J}}{\text{g K}} \cdot \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 1850 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$Q = 1065 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \text{m} \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 1850 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot (405,573 - 404,930) = 4332,698 \text{ J}$$

$$t_2 = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{4332,698 \text{ J}}{3046,46 \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 1,42 \text{ s (PVB)}$$

Tiempo de  $T_3$  a  $T_4$ :

$$Q = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 835 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot (404,930 - 403,964) = 54446,175 \text{ J}$$

$$t_3 = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{54446,175 \text{ J}}{3046,46 \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 17,87 \text{ s (vidrio)}$$

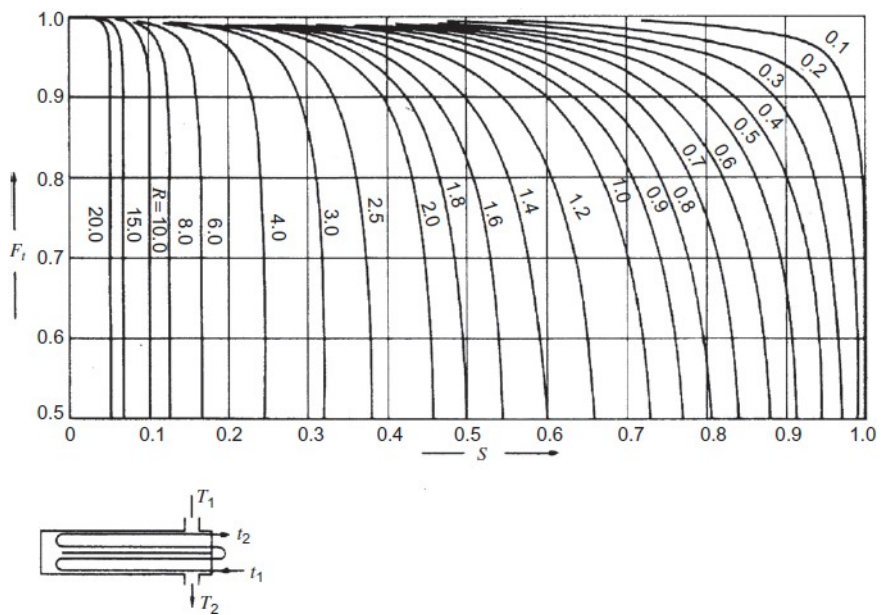
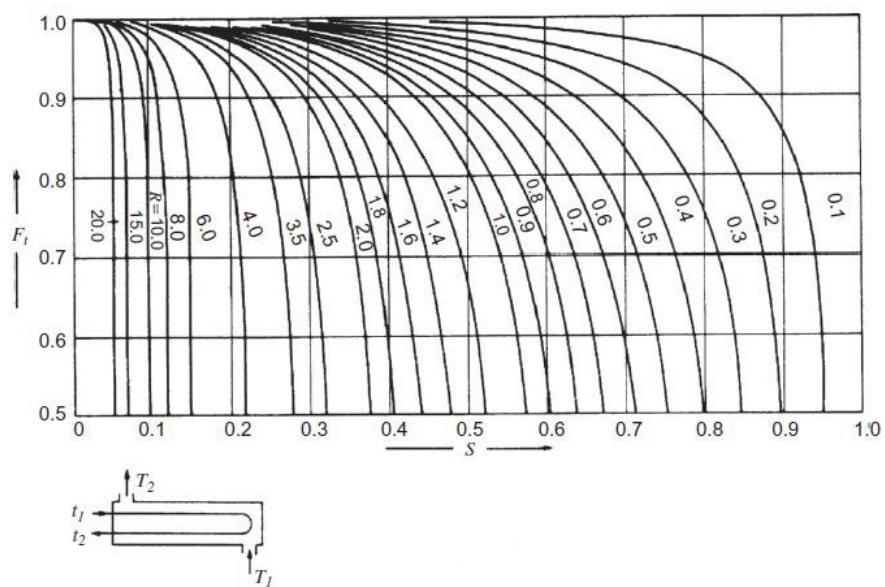
Tiempo de  $T_4$  a  $T_5$ :

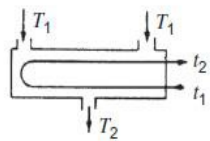
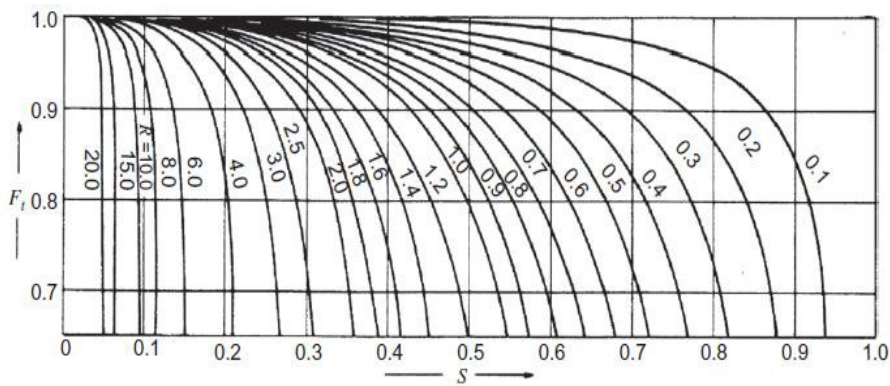
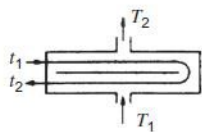
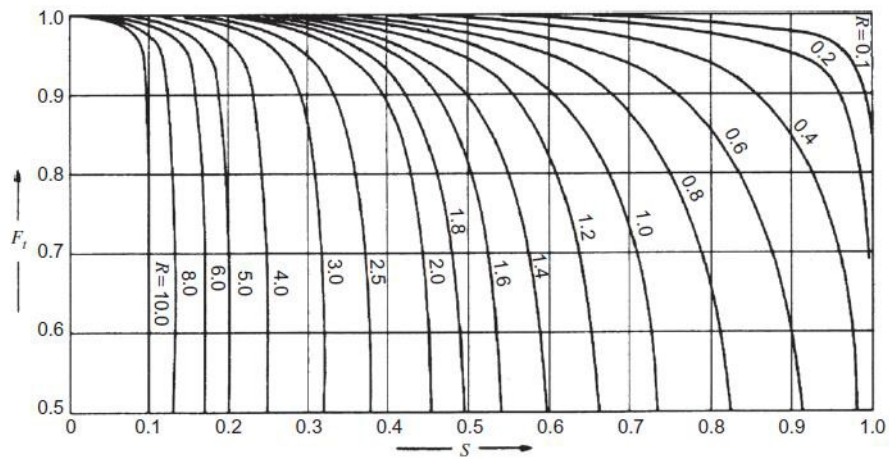
$$Q = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 835 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot (403,964 - 402,998) = 54446,175 \text{ J}$$

$$t_4 = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{54446,175 \text{ J}}{3046,46 \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 17,87 \text{ s (vidrio)}$$

$$\text{Tiempo total} = 8,52895 + 17,87 + 1,42 + 17,87 * 2 = 64 \text{ s}$$


9.2. Diagramas de factor de corrección










9.3. Componentes de la etapa del generador de aire caliente}

Componente	Especificación técnica	Imagen	
Compresor de aire	Presión máxima (bar)	13	
	Presión de trabajo (bar)	7-13	
	Caudal (Std m <sup>3</sup> /min)	19-26	
	Potencia de motor (kW)	161	
	Velocidad de motor (rpm)	1480	
Secador de aire	Potencia (kW)	3,4	
	Presión máxima (bar)	16	
	Temperatura máxima (°C)	65	
Acumulador de aire	Volumen (m <sup>3</sup> )	12	
	Presión de trabajo (bar)	13	
Bomba centrífuga	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	30	
	Potencia motor (HP)	15	
	Altura (m.c.a)	70	

Torre de refrigeración	Tipo	Tiro inducido	
	Flujo	Contra corriente	
	Capacidad (kW)	209	
	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	30	
	Evaporación máxima	1%	
	Arrastre máximo	0,002 %	
	Capacidad piscina (m <sup>3</sup> )	1	
	Temperatura de entrada	28	
	Temperatura de salida	22	
	Temperatura bulbo húmedo	17	
Generador de aire caliente	Presión máxima (bar)	16	
	Temperatura máxima (°C)	150	
	Temperatura mínima (°C)	0	
	Volumen (m <sup>3</sup> )	49	
	Diametro (m)	3,2	
Radiador principal	Tipo de intercambiador	Flujo cruzado	
	Fluidos	Aire-agua	
	Número de tubos	50	
	Diametro tubos (mm)	15,9	
	Dimensiones (m)	0,8 x 1,020	
	Caudal aire (m <sup>3</sup> /h)	4,17	
	Caudal agua (l/s)	1,65	

### 9.5. Galería de imágenes



Figura 25. Zona de Carga



Figura 26. Zona de lavado



Figura 27. Zona armado pre-laminados



Figura 28. Zona de sellado



Figura 29. Zona de armado de carros



Figura 30. Generador de aire caliente



Figura 31. Carros con vidrios laminados



Figura 32. Zona de armado de paquetes



Figura 33. Carro en Generador



Figura 34. Generador de aire caliente



Figura 35. Test de impacto



Figura 36. Pummel

