



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**AUMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD DE TABLERO MDF  
9 MM A PARTIR DE LA INYECCIÓN DE SULFATO DE  
AMONIO COMO CATALIZADOR EN EL CURADO DE  
RESINA UF**

Andrés Felipe Soto Cuellar

Universidad de Antioquia  
Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería  
química  
Medellín, Colombia  
2021



AUMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD DE TABLERO MDF 9 MM A PARTIR DE LA  
INYECCIÓN DE SULFATO DE AMONIO COMO CATALIZADOR EN EL CURADO DE  
RESINA UF

**Andrés Felipe Soto Cuellar**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Químico**

Asesores (a):

Freddy Armando Jaramillo Ramírez Ingeniero Industrial, Asesor externo  
Aída Luz Villa Holguín Ingeniera Química, Asesora interna

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería química.  
Medellín, Colombia  
2021

## Contenido

1	Introducción .....	6
2	Objetivos .....	9
2.1	Objetivo general.....	9
2.2	Objetivos específicos .....	9
3	Marco Teórico .....	9
4	Metodología .....	12
4.1	Programación .....	12
4.2	Trabajo en planta .....	13
4.3	Pruebas de calidad:.....	17
4.4	Análisis de resultados y elaboración de informes: .....	22
4.5	Análisis económico .....	22
5	Resultados y análisis .....	23
5.1	Flexión estática (MOR y MOE), EN 310 .....	23
5.2	Tracción perpendicular al plano, EN 319. ....	24
5.3	Arranque superficial, EN 311 .....	25
5.4	Distribución de densidad. ....	25
5.5	Perfil de densidad.....	26
5.6	Porcentaje de humedad según la norma, EN 322. ....	26
5.7	Porcentaje de hinchamiento según la norma, EN 317 .....	27
5.8	Porcentaje de absorción según la norma, EN 317. ....	28
5.9	Determinación del contenido de formaldehído según la norma, EN 120. ....	29
5.10	Determinación de emisión de formol según la norma japonesa JIS A 1460. ....	30
5.11	Análisis general de la implementación de dosificación de catalizador al proceso producción de MDF 9 mm AS. ....	30
6	Análisis económico .....	33
7	Conclusiones .....	36
8	Recomendaciones .....	36
9	Referencias bibliográficas.....	37
10	Anexos .....	40
10.1	Anexo 1. Curva de densidad vs concentración %p/p .....	40
10.2	Anexo 2. Plano del HIT-JET .....	41

10.3 Anexo 3. Control de proceso .....	41
10.4 Anexo 4. Perfiles de densidad .....	44



## Resumen

En el presente estudio se dosificó catalizador (sulfato de amonio), en diferentes niveles, al proceso de producción del MDF 9 mm AS para mejorar el curado de la resina UF y así elevar el ciclo de prensado a 305 mm/seg, aumentar la producción y disminuir emisiones de formaldehído al ambiente.

Se trabajó con una resina UF que tenía una relación 1.2 de urea-formol, factor de encolado 10.8 % (kg de resina/kg de fibra seca). El sulfato de amonio (en solución al 20%) se logró dosificar en 2 niveles 0.3% y 0.4% (kg catalizador/kg de resina sólida) y un nivel sin catalizador 0%. Todos los niveles se trabajaron con un ciclo de prensado de 305 mm/seg.

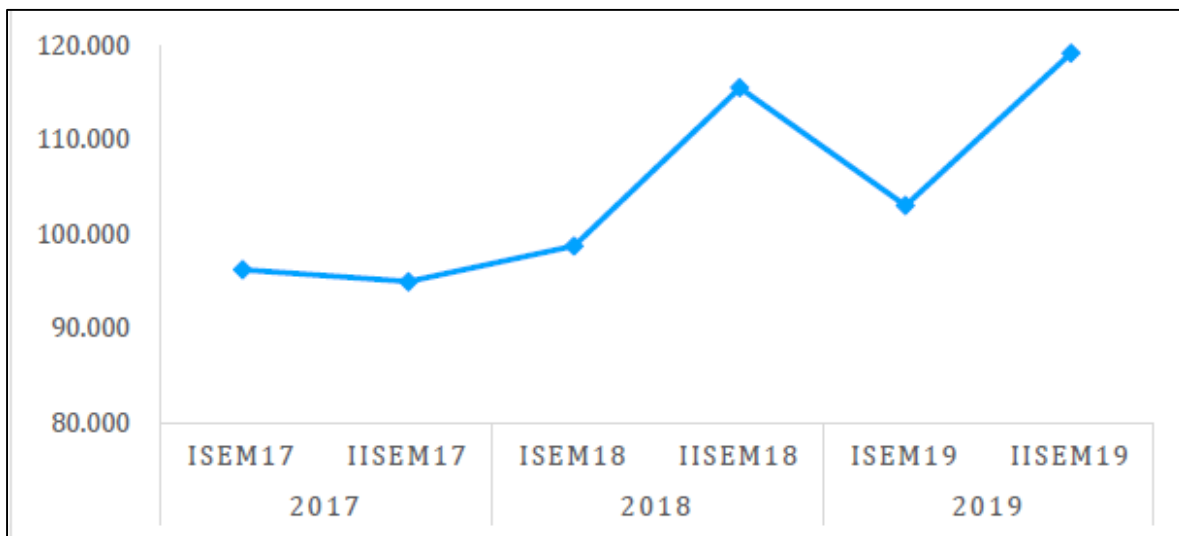
Los resultados indican que al aumentar el nivel de catalizador se reducen las propiedades de hinchamiento y absorción de agua. Paralelamente, se favorece un incremento de las resistencias mecánicas. De los niveles estudiados de dosificación de catalizador, se encontró que la más adecuada fue de 0.4%.

# 1 Introducción

Los tableros de fibra de madera-MDF (Medium Density Fibreboard) son una de las opciones más buscadas en la industria de muebles y de decoración en todo el mundo, debido a su versatilidad, alta resistencia, variedad de acabados, y a su precio competitivo frente a materias primas similares. Con el incremento de la construcción de viviendas, la población y los niveles de ingresos en todo el mundo, la demanda de muebles, como sillas, mesas, camas, sofás, estanterías y armarios, ha aumentado significativamente. Este aumento en la demanda de muebles, sumado a beneficios que ofrecen los tableros de madera, y los cambios en las preferencias de los consumidores, aumentarán la demanda y la producción de los tableros. Según las cifras más recientes publicadas por el “Anuario FAO de productos forestales”, en los últimos años la producción mundial de tableros de madera experimentó un significativo crecimiento al pasar de 82.9 millones de m<sup>3</sup> en 2013 a 95.3 millones de m<sup>3</sup> en 2017[1][2].

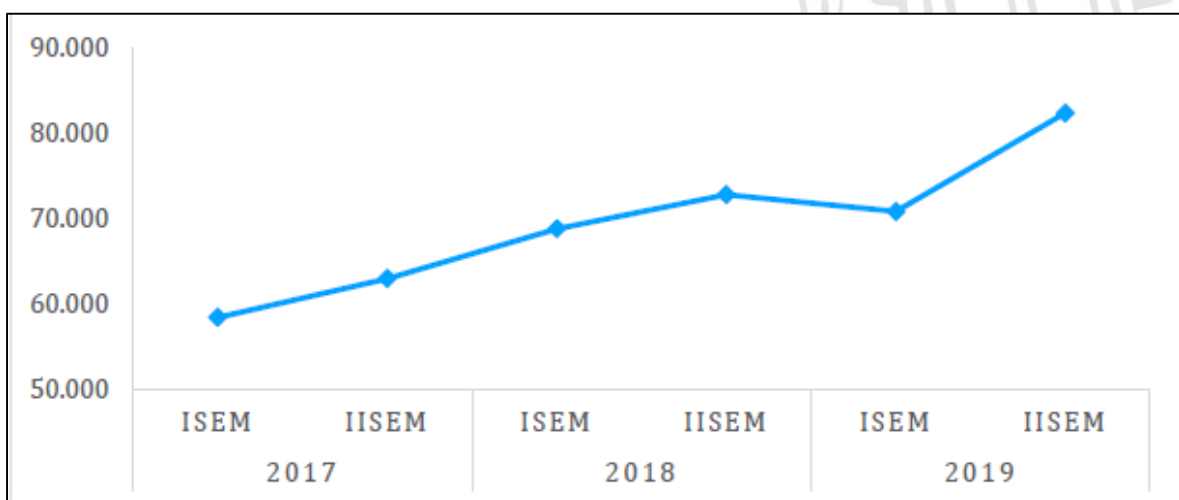
Para el mercado colombiano de productos de madera, específicamente tableros MDF, se han presentado un crecimiento constante. Para los semestres del 2019 se observó un crecimiento 6.9 % frente a los años 2017 y 2018; tal fue el crecimiento de la demanda que se tuvo la necesidad de importar de otros países. Los datos de importación revelaron que en el 2019 se importó al territorio colombiano 222,317 m<sup>3</sup>, que representa un aumento del 3.7% frente al 2018 (214,330 m<sup>3</sup>) y del 16.2% frente al 2017 (191,218 m<sup>3</sup>) [1]

A nivel semestral, en la gráfica 1 se observa que en el segundo semestre de 2019 se alcanzó el mayor volumen de importaciones. Las cifras muestran que, en este semestre, las importaciones alcanzaron los 119,257 m<sup>3</sup>, reflejando un aumento de 15.7% frente al primer semestre de 2019 (103,060 m<sup>3</sup>) [1][2].



**Gráfico 1** Importaciones de tableros de madera (m³) [1]

Los datos revelan que el principal país proveedor de estas importaciones con una participación de un 66% en promedio entre los años 2017 y 2019 es Ecuador. Tan solo en el 2019 fue de 153,275 m³. A nivel semestral, tal y como se ilustra en la gráfica 2 el segundo semestre del 2019 registró el mayor volumen de importaciones desde Ecuador. Las cifras muestran que las importaciones en este semestre alcanzaron los 82,431 m³, reflejando un aumento de 16.3% frente al primer semestre de 2019 (70,843 m³) [1][2].



**Gráfico 2** Importaciones de tableros originarios de Ecuador (m³) [1]

Según la información anterior, el mercado colombiano de tableros de madera ha presentado un crecimiento constante en el periodo 2017-2019. Sin embargo, se observa que este crecimiento del mercado ha sido impulsado en gran parte por las importaciones, especialmente aquellas

originarias de Ecuador. Esta inyección de productos de tableros extranjeros al mercado nacional ha generado perturbaciones en las producciones nacionales y ha obligado a las empresas colombianas productoras a buscar alternativas para aumentar su producción y equilibrar el mercado de tableros de madera alimentado con producto nacional.

Para lograr un aumento en la producción de tableros MDF se eligió ingresar al proceso de producción un catalizador que afectara la fase de curado de la resina. Esta resina tipo termo-estable es uno de los componentes principales en la fabricación de este tipo de paneles debido a que une las fibras o partículas de madera y su composición es frecuentemente de urea-formaldehído (UF).

Cuando la mezcla de fibras de madera y resina es prensada en caliente activa la resina y permite que se policondense y una las fibras de madera con el grosor (calibre) deseado. La junta de unión formada, parecida a un film o película, puede ser resistente a la tracción mecánica y a la agresión química, brindándole estabilidad frente a la acción atmosférica, cambios de temperaturas y al uso prolongado. Por lo tanto, inyectar catalizador a partir de un sistema de dispersión que permita una aspersión homogénea por toda la mezcla de fibra y resina, permitirá que la reactividad de la resina aumente al momento de prensarla y así se disminuya el tiempo que el colchón de fibra deba permanecer en la prensa, esto se traduce en una mayor velocidad (mm/s) de producción de tablero MDF.

Este tipo de catalizadores tienen que ser ácidos para lograr fomentar la reacción de endurecimiento o de reticulación, logrando un aumento en la velocidad de curado mediante una reducción de la energía de activación de la reacción de polimerización de la resina [3].

Inicialmente se implementó la dosificación del catalizador para mejorar la producción del MDF ambiente seco calibre 9 mm ya que este producto corresponde a más del 55% de la producción de la planta y su velocidad de prensado está entre 280 a 295 mm/seg. Se espera que con la dosificación del catalizador se logren velocidades de prensa de hasta 305 mm/seg, y aumentar la producción y el margen de ganancias en más de un 5%. Es conveniente aclarar que no es recomendable superar velocidades mayores a 310 mm/s debido a que el resto del proceso de producción no está ajustado a estas velocidades y se tendría un cuello de botella en las líneas de acabado.



## 2 Objetivos

### 2.1 *Objetivo general*

Evaluar la efectividad de la adición de sulfato de amonio en el proceso de fabricación de tableros MDF ambiente seco como catalizador.

### 2.2 *Objetivos específicos*

- Determinar la dosificación de catalizador que permita aumentar la velocidad de producción y disminuir emisiones de formaldehído provenientes de los tableros MDF ambiente seco.
- Evaluar las propiedades físico-mecánicas de los tableros MDF producidos a partir de la adición de catalizador en el proceso.
- Determinar la factibilidad económica de la adición de catalizador.

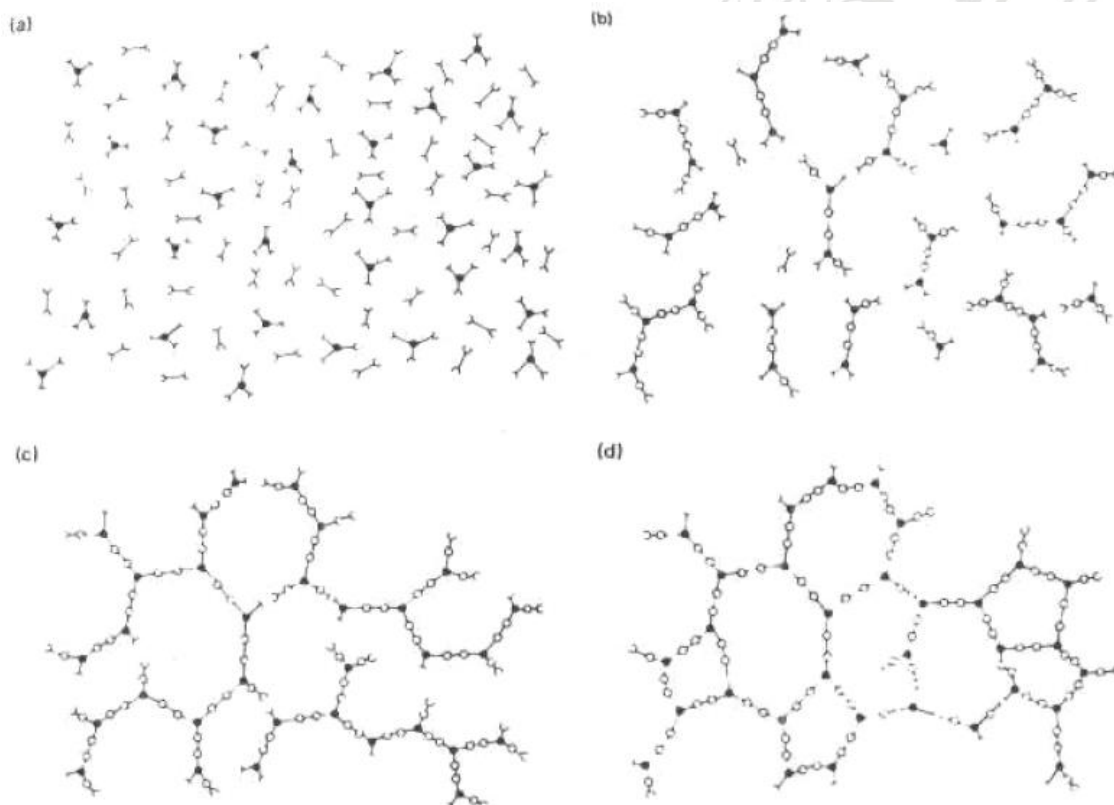
## 3 Marco Teórico

Las resinas termostables son aquellas que cambian irreversiblemente bajo la influencia del calor, de la luz, de agentes fotoquímicos, pasando de un material fusible y soluble, a otro no fusible e insoluble, por la formación de un retículo tridimensional covalente. En el proceso reactivo de entrecruzamiento o curado, las cadenas poliméricas (reactivos termoplásticos o líquidos) reaccionan entre sí y, a la vez, con un agente entrecruzado, formándose macromoléculas orientadas en todas las direcciones y con numerosos enlaces covalentes entre ellas. El retículo tridimensional formado confiere al material curado unas propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia química muy elevadas que los hacen aptos para múltiples aplicaciones [4].

Las reacciones de entrecruzamiento de sistemas adhesivos durante el proceso de curado están constituidas por un conjunto de reacciones altamente complejas donde resulta difícil establecer con certeza los mecanismos de reacción debido a la insolubilidad de productos y a la variabilidad de estas reacciones que son muy dependientes de las condiciones del proceso de curado [5].

La reacción de curado es crucial en la utilización del material termoestable. Es importante conocer perfectamente la naturaleza de la misma. El proceso de curado de las resinas termoestables es complejo e incluye

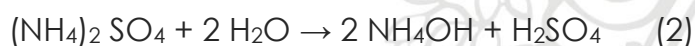
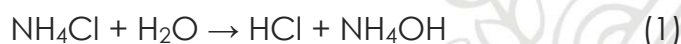
varias etapas. Inicialmente la resina se encuentra en estado líquido viscoso compuesta por monómeros, dímeros elemental tal como se ilustra en la Figura 1(a). A medida que se suministra energía los dímeros y monómeros empiezan a reaccionar entre si dando a la formación y crecimiento lineal de cadenas de al menos 4 monómeros tal como se ilustra en la Figura 1(b). El proceso de curado continúa y ocurre rápidamente y de una forma irreversible, pasando el material de un líquido viscoso hasta un estado de gel elástico que marca el inicio de la aparición del retículo; este punto suele llamarse punto de gel tal como se ilustra en la Figura 1(c). El fenómeno de gelificación ocurre en una etapa determinada del proceso reactivo y depende de la funcionalidad, reactividad y estequiometría de las especies reactivas. Después del punto de gelificación, la reacción continúa hasta la formación de un retículo infinito, con un aumento sustancia de densidad de entrecruzamientos y de propiedades físicas tal y como se ilustra en la Figura 1(d) [6].



**Figura 1** Representación en dos dimensiones del curado de un termoestable, (a) monómeros, (b) crecimiento lineal, (c) formación de un gel, reticulación incompleta, (d) termoestable, curado total [6].

Estudios indican que las reacciones químicas que ocurren durante el fraguado de los adhesivos seguirán un curso óptimo con un determinado rango de pH, y este es un rango específico para cada resina. Para el caso de la resina de urea-formaldehído se requiere de un pH entre 3 y 3.5 [7]. Son varios los investigadores que señalan que en la fabricación de tableros de

fibra se requiere de un pH específico, el que normalmente debe ser ajustado agregando al adhesivo sustancias catalizadoras [8]. La adición de catalizadores y retardantes pueden ser la solución para la mejora de la velocidad de curado, ya que estos productos reaccionan con el agua durante el prensado, liberando compuestos que determinan el ambiente de pH en que fraguará el adhesivo. Para el caso de la urea-formaldehído se utilizan como catalizadores el cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) o el sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ). El primero genera durante la reacción ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) y el segundo libera ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Ambos ácidos reducen el valor pH del ambiente en que fragua el adhesivo. Las reacciones de descomposición de los catalizadores que se generan durante el prensado en caliente se describen en las ecuaciones (1) y (2) [9].



Además, el cloruro de amonio puede reaccionar con el formaldehído, liberando ácido clorhídrico, agua y hexametenotetramina, ecuación (3).



En general, el catalizador tiene un efecto importante sobre las propiedades de los tableros esto se constata en estudios previos los cuales comprobaron que al aumentar la cantidad de cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ , catalizador) hasta un 15 % la propiedad de flexión aumentó. La tracción mejoró al aumentar la proporción del  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , para luego disminuir con cantidades mayores al 15% de catalizador [10].

Respecto a otras propiedades como el hinchamiento a las 24 horas se reduce con el incremento del nivel de catalizador. Esta tendencia fue más notoria en maderas con pH más ácido. Fue posible observar que la reducción del hinchamiento es muy fuerte en un comienzo, pero al llegar a un nivel cercano al 4 % de catalizador se estabiliza [11]. Todos estos efectos se deben a la acción que el aditivo tiene sobre el fraguado del adhesivo.

También es bueno mencionar que entre los cambios que se podría observar al momento de adicionar catalizador sería el nivel de formaldehído liberado que, aunque dependerá de algunos factores como el tipo de materia prima, tipo de adhesivo, la cantidad y el tipo de catalizador suministrado tendrá un efecto en la emisión de formaldehído. Esto se verifica en estudios donde se realiza una prueba de 5 niveles de catalizador (cloruro de amonio) desde 0.5% hasta 2.5% y se determinó que para una misma temperatura y tiempo de prensado la emanación disminuye a medida que se aumenta el nivel de

catalizador, excepto al inicio, cuando se aumenta desde 0.5% a 1%, donde la emanación aumenta. La emisión de formaldehído más baja se alcanzó con el nivel de catalizador mayor, es decir, 2.5%, el tiempo de prensado más largo (25 minutos) y con la menor temperatura de prensado (158°C) [12].

Algunas observaciones semejantes establecen que el cloruro de amonio es más efectivo que el cloruro de magnesio y el sulfato de aluminio en la reducción de la emanación de formaldehído de los tableros. Este resultado se obtuvo incrementando el nivel del catalizador, desde 0.5% hasta un máximo de 2.5%, y determinando las emanaciones a través de tres métodos. Los resultados de los diferentes métodos muestran, aunque con valores distintos, la misma tendencia, una reducción de la emanación al aumentar el nivel de catalizador [13].

## 4 Metodología

El plan de trabajo se dividió en 5 actividades fundamentales:

### 4.1 Programación

La producción de tipo de MDF y el calibre que se produjera en la planta lo comunicaba el área de mercadeo dependiendo de las exigencias del mercado. Las órdenes de producción (OP) se comunicaban por medio del sistema SIESA un software especializado para las empresas donde se montaba cada 3 días las OP que se necesitaba. Por lo tanto, cada vez que hubo OP de MDF 9mm ambiente seco (AS) se convocó una reunión con los ingenieros de proceso y líder de planta donde se analizó la viabilidad y ejecución de la prueba de dosificación de catalizador al proceso. En la Tabla 1 se presentan las fechas y hora en que se obtuvo las muestras de tableros:

**Tabla 1** Fechas y hora de dosificación de catalizador y muestreo de tablero MDF 9mm AS

Nivel (%(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Fechas de producción y hora que se obtuvo la muestra
0.0	18/02/2021 6:40
0.0	12/03/2021 6:30
0.3	19/02/2021 10:20
0.3	25/02/2021 10:20
0.4	12/03/2021 14:35
0.4	12/03/2021 18:40
0.4	12/03/2021 22:35

## 4.2 Trabajo en planta

Madera:

Para la elaboración de los tableros se utilizó una mezcla de dos tipos de madera las cuales son *Eucalipto* y *Pino Patula*, la mezcla contenía 65% Eucalipto y 35% de Patula. Los árboles utilizados tenían una edad entre los 7 y 10 años respectivamente. Además, los troncos no pueden superar los 30 cm de diámetro y 2.4 m de longitud.

Resina y catalizador:

La resina utilizada fue UF (Urea-Formaldehido) cuya relación molar fue de  $RM=1.2$  y estaba diluida a un 50% p/p en agua. Se dosificó 10.8%(10.8 kg resina sólida/100 kg fibra seca) de resina al proceso. Como catalizador se agregó  $(NH_4)_2 SO_4$  (sulfato de amonio) al 20% p/p. Se preparó 1000 kg de solución (800 kg  $H_2O$  +200 kg  $(NH_4)_2 SO_4$ ) por cada nivel de prueba. Esta solución se preparó en el Gluckichen o "Cocina" en un tanque de agitación de capacidad de 1 m<sup>3</sup> tal y como se muestra en la imagen 1.

a)



b)



**Imagen 1** Tanque de preparación del catalizador, a) fotografía parte frontal del tanque, b) interior del tanque

La solución se preparó con agua caliente a una temperatura de 50 °C debido a que la disociación de la sal es endotérmica. Si el sistema no contiene la suficiente energía las moléculas de agua no tendrán la suficiente energía cinética para romper las interacciones iónicas de la sal y poder solvatar los iones amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ). Al tener esto presente se evitó que la bomba de pistones axiales sufriese obstrucción.

Para verificar la concentración del catalizador se tomó una muestra de cada solución preparada para cada nivel y se determinó su densidad con el fin de correlacionarla con la concentración a partir de una curva de densidad vs concentración (% p/p) la cual se muestra en la gráfica 3:

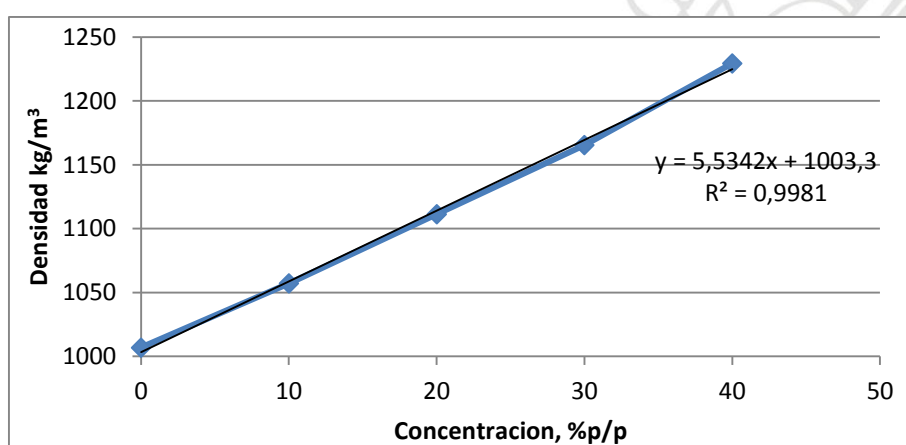


Gráfico 3. Curva de densidad vs concentración %p/p

Se encontró que para concentraciones entre 0 hasta 40% p/p de solución de sulfato de amonio se tendrá una relación lineal entre la densidad y la concentración (%p/p), lo que nos permitió determinar un valor muy próximo de la concentración real de la solución de sulfato de amonio. En la Tabla 2 se muestra la concentración de soluciones del sulfato de amonio a las que se les determinó la concentración:

Tabla 2 Ejemplos de soluciones que se les midió la concentración

Solución (% ideal)	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)	Densidad (kg/m³)	Concentración (%p/p)	Fecha
20%	5.565	5	1.113	1113	19.8	19/02/2021
20%	5.546	5	1.1092	1109.2	19.1	25/02/2021
20%	5.585	5	1.117	1117	20.5	12/03/2021

A partir de la ecuación de la recta y la densidad de la muestra se determinó la concentración de la solución tal y como se describe en la ecuación 1:

Para la muestra de densidad 1109.2 kg/m³ su concentración será de:

$$\begin{aligned} \%p/p &= (1109.2 - 1003.3)(\text{kg} / \text{m}^3) / (5.5342 ((\text{kg} / \text{m}^3) / (\%p/p))) \\ &= 19.1\%p/p \quad (1) \end{aligned}$$

Los datos experimentales que se utilizaron para obtener la curva de densidad vs concentración (%p/p) se encuentra en el Anexo 1.

El catalizador se logró aplicar en 3 niveles de dosificación: 0.0%, 0.3% y 0.4% (kg de catalizador/kg resina solididad). El plan ejecutado se resume en la Tabla 3.

**Tabla 3** Plan de dosificación del catalizador

Nivel	Dosificación		
	RM (relación molar urea-formol)	Resina, %(kg resina solida/kg fibra seca)	Catalizador sulfato de amonio, % (kg de catalizador/kg resina sólida)
Nivel 0	1.2	10.8	0.00
Nivel 1	1.2	10.8	0.30
Nivel 2	1.2	10.8	0.40
Nivel 3	1.2	10.8	0.50

Específicamente la zona que se encargó de realizar las dosificaciones de resina y catalizador en el proceso se le denomina HIT-JET, el cual se ilustra en la imagen 2:

a)



b)



**Imagen 2** Sistema de dosificación de resina y catalizador HIT-JET, a) fotografía frontal del HIT-JET, b) fotografía frontal de la boquilla de dosificación

El sistema HIT-JET no es solo un instrumento sino un conjunto de equipos tales como motobombas de alta presión, de limpieza, boquillas, válvulas y un sistema de control (PLC ubicado en el "control room") que trabajan en

conjunto con el objetivo de impregnar con las dosificaciones programadas de resina y el catalizador a las fibras de madera.

El sistema HIT-JET cuenta con 6 boquillas dosificadoras de resina accionadas por aire comprimido a 6 bar que impregnan la línea de proceso que contiene un flujo de fibra de madera constante. La resina proviene de los tanques de almacenamiento situados en la cocina (Gluckichen) y es extraída por una motobomba de alta presión y un difusor dinámico los cuales llevan el flujo de resina a un complejo de tuberías y válvulas que se encargan de distribuir a las 6 boquillas del HIT-JET la resina. El sistema también cuenta con una inyección de vapor a la línea de proceso proveniente de una línea que alimenta 1500 kg/h vapor a una presión de 18 bar, este vapor llega a la línea de proceso por medio de unas válvulas de retención situadas al lado posterior de las 6 boquillas de dosificación de resina. El objetivo del vapor es generar turbulencia dentro de la línea de proceso para una mejor impregnación de la resina. Adicionalmente el HIT-JET cuenta con una última boquilla que es la encargada de dosificar al proceso el catalizador que se almacena en la cocina en el tanque del catalizador. El catalizador se extrae del tanque por medio de una motobomba que presuriza la línea del catalizador a 30 bar y lleva el flujo del catalizador hasta la boquilla. Por último, el sistema HIT-JET contiene una línea de limpieza que atraviesa tanto boquillas como toda la línea o tubería que ha trabajado con resina. La finalidad de esta línea de mantenimiento es suministrarle al HIT-JET un flujo de agua-urea para eliminar incrustaciones de resina. El diagrama del HIT-JET y sus elementos que los conforman se encuentra en el Anexo 2.

Finalizado todo el sistema de motobombas, válvulas y flujos se controla desde el cuarto de control mediante un sistema PLC tal y como se muestra en las imágenes



**Imagen 3** Sistema de control la cocina y del HIT-JET, a) control área de cocina, b) control del HIT-JET



### *Fabricación de tableros:*

Los tableros se confeccionaron de un espesor de 9 mm AS, 2.44 m de ancho y 5.49 m de largo. El ciclo de prensado contempló una presión máxima de 3.8 N/mm<sup>2</sup> y una presión media 0.68 N/mm<sup>2</sup>. La velocidad se mantuvo 305 mm/seg. La temperatura de prensado para el plato 1, 2 y 3 en 233 °C, 232 °C y 221°C respectivamente. Todas estas variables se controlaron desde la sala de control denominada "control room".



**Imagen 4** Sala de control "Control room"

En el Anexo 3 se encontrarán imágenes de cada pantalla de control.

### **4.3 Pruebas de calidad:**

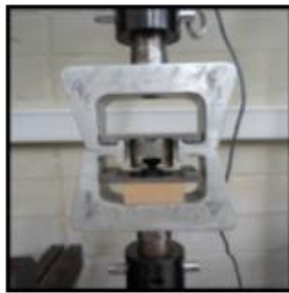
Una vez fabricados los tableros fueron climatizados según la norma DIN 50014 para luego tomar un tablero de muestra representativa del lote producido. El tablero se llevó al laboratorio de aplicaciones donde se extrajeron las probetas para los ensayos mecánicos. Los ensayos se realizaron en la maquina universal como se observa en la imagen 5



a)



b)



c)



d)

**Imagen 5** a) Prueba de MOR y MOE b) prueba de tracción, c) arranqué superficial, d) máquina de ensayos.

- Flexión estática (MOR y MOE) EN 310
- Tracción perpendicular al plano EN 319
- Arranque superficial EN 311

El módulo ruptura (MOR) se realizó con el objetivo de determinar la máxima carga que se puede aplicar a un tablero cuando la fuerza es ejercida es en el punto medio del tablero. Con esta evaluación se determinó el valor de la fuerza que puede aplicarse, con la confiabilidad de que el tablero la resistirá. Le módulo de elasticidad (MOE) se realizó con el objetivo de hallar el grado de rigidez de un tablero 9 mm MDF AS que se relaciona con su capacidad para soportar cargas y una vez ésta es eliminada retornara a su estado inicial; es decir no generar pandeos o deformaciones por acción de cargas.

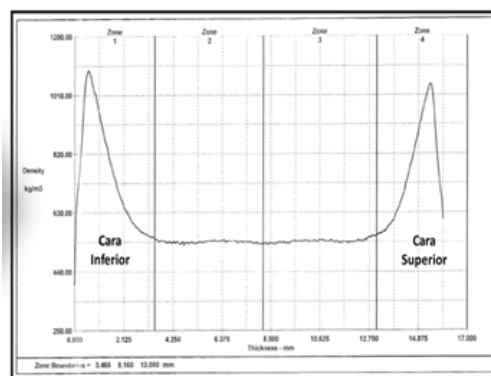
Para el caso de la tracción interna, considerada la prueba más significativa su objetivo consistió en brindar la resistencia a la tracción que está relacionada con el enlace interno de las fibras en la que se establece indirectamente el comportamiento del tablero cuando es sometido a todo tipo de trabajo por los cantos y en el proceso de prensado con calor.

La prueba de arranque superficial nos brindó el estado del enlace interno de las fibras que establece indirectamente el comportamiento del tablero en las caras.

Seguidamente de estas pruebas se realizaron los análisis de:

- Distribución de densidad.
- Perfil de densidad.

Para el caso de distribución de densidad se realizó con el objetivo de controlar una distribución uniforme del material a lo largo del espesor del tablero, de tal forma que el tablero MDF presente un comportamiento homogéneo en todas sus secciones. Para el 9 mm MDF la densidad adecuada debería estar entre 550 y 680 kg/m<sup>3</sup>. Para el perfil se obtuvo una gráfica que mostró la distribución de la densidad a lo largo del espesor del tablero, convirtiéndose en una indicación rápida del comportamiento de las propiedades. Idealmente un perfil de densidad debe ser simétrico tal y como se observa en la gráfica 4 y se obtiene del equipo denominado perfilómetro. El equipo se muestra en la imagen 6.



**Gráfico 4** Perfil de densidad de tableros MDF



Imagen 6 Perfilómetro

Seguidamente se realizaron las pruebas de:

- Porcentaje de humedad según la norma EN 322.
- Porcentaje de hinchamiento y absorción según la norma En 317.

La prueba de humedad se realizó con el objetivo de verificar la humedad con que sale el tablero al final de producción, el valor esperado para un MDF ambiente seco está entre 5% y 7%, valores menores a este rango especifican tableros muy secos lo cual llevaría que absorbiera humedad del medio y se hinchara y el tablero perdiera sus propiedades mecánicas. El hinchamiento y absorción se realizó con el objetivo de determinar la capacidad de ganar agua el tablero. Se determinó por el aumento de espesor y de peso cuando se sumergen en agua muestras de tableros durante un tiempo determinado. Mantener estas dos propiedades dentro de los parámetros definidos, garantiza dimensiones constantes cuando un tablero es almacenado en sitios húmedos o cuando es tratado superficialmente en los procesos de pintura relacionándose con mayor o menor consumo de materiales.

En la tabla 4 se encuentra las especificaciones mínimas que un tablero MDF 9 mm AS debe cumplir para considerarlo aceptable para el mercado:

Tabla 4 Especificaciones mínimas para el tablero MDF 9 mm AS

Calibre (mm)	Rango de densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción 24 h (%)	Humedad mínima (%)	Flexión (MOR) mínimo (kg/cm <sup>2</sup> )	MOE mínimo (kg/cm <sup>2</sup> )	Tracción mínima (kg/cm <sup>2</sup> )	Hinchamiento máximo 24 h %	Arranque superficial (kgf/cm <sup>2</sup> )
9	550-680	40%	5 -7	300	10000	5	16	0,8

Por último, se hicieron las pruebas químicas que determinaron emisiones de formaldehído en los tableros:

- *Determinación del contenido de formaldehído según la norma EN 120.*
- *Determinación de emisión de formol según la norma japonesa JIS A 1460.*

Las pruebas de acuerdo a la norma EN 120 consistieron en un método de extracción conocido como “método del perforador” y su finalidad fue determinar el contenido de formaldehído (mg formaldehído/g de tablero) en los tableros derivados de la madera, no recubiertos. Su fundamento se basa en extraer de las probetas del MDF el formaldehído utilizando tolueno en ebullición, transfiriéndose después en agua destilada o desmineralizada. El formaldehído contenido en la solución acuosa se determina fotométricamente mediante el método de la acetyl-acetona. La prueba se visualiza en la imagen 7.



**Imagen 7** Prueba del perforador

Las pruebas de acuerdo a la norma Japonesa JIS A 1460 consistieron en el método del desecador, donde una muestra de tablero se coloca en un desecador que en el fondo contiene un depósito de agua destilada, durante 24 horas con el fin de verificar emisión de formaldehído (emisión de formaldehído mg/L). El formaldehído contenido en la solución acuosa se determina fotométricamente mediante el método de la acetyl-acetona. La prueba se visualiza en la imagen 8.



Imagen 8 Prueba JIS

#### **4.4 Análisis de resultados y elaboración de informes:**

Este punto se desarrolla en la parte de resultados y análisis.

#### **4.5 Análisis económico**

El análisis económico se realizó con base en una comparación entre el proceso no catalizado con aquel proceso catalizado que obtuvo los resultados más satisfactorios. Para el caso donde no se dosificó catalizador, se determinó una velocidad promedio de prensado, a partir de esta velocidad se halló un volumen en  $m^3$  de MDF 9 mm AS producido al día. La utilidad del volumen producido se obtuvo restando los costos de producción y mano de obra. Las ganancias diarias se llevaron a valores mensuales para realizar la comparación.

Para el proceso con dosificación de catalizador se halló un volumen de MDF 9 mm AS producido trabajando con un ciclo de prensado de 305 mm/seg. De igual manera se obtuvo la utilidad diaria de los  $m^3$  producidos restando los costos de producción y mano de obra. El resultado se llevó a valores mensuales.

Con las utilidades tanto del proceso sin catalizar y el proceso catalizado se halló el aumento de productividad y el incremento en el margen de ganancias que la empresa generaría mensualmente si se aplicara la dosificación de catalizador.

## 5 Resultados y análisis

Inicialmente se analiza los resultados de cada prueba de calidad y al final se realiza un análisis general de la prueba a nivel de planta de la dosificación de catalizador al proceso.

### 5.1 Flexión estática (MOR y MOE), EN 310

Para evaluar la resistencia a la flexión estática de cada tablero obtenido en cada nivel se midió el módulo ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) de acuerdo a la norma señalada en la metodología. Para cada tablero se obtuvo 8 probetas a lo largo del tablero. La máquina universal da los valores del MOR y MOE al mismo tiempo por cada probeta.

Los resultados de ambos parámetros, MOR y MOE, se presenta en la Tabla 5

**Tabla 5** Resistencia a la flexión por tipo de tablero, módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE)

Nivel (% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )	Velocidad de línea (mm/s)	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )	MOE (kg/cm <sup>2</sup> )
0.0	305	285	27874
0.3	305	420.5	33935
0.4	305	446.42	39616

En relación al módulo de ruptura, la exigencia que establece la norma EN 310 para tablero MDF 9 mm AS es de 300 kg/cm<sup>2</sup> tal y como se especifica en la Tabla 4. Este requerimiento fue superado por los dos tratamientos hechos con dosificación de catalizador. El tratamiento sin catalizador estuvo por debajo de la especificación con un valor de 285 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor bajo se debe a una capa central débil y porque en este tipo de ensayos ocurre un encuentro de fuerzas (compresión y tracción) en la zona central de la probeta. Esta capa débil se genera debido a una alta velocidad en el ciclo de prensado que no permite una buena penetración de la energía térmica al interior del tablero generando que la resina no cure adecuadamente y con un mal curado la unión de las fibras será deficiente y el tablero será muy inestable [14]. Caso opuesto ocurre cuando se adiciona catalizador, a pesar de la alta velocidad el catalizador permite reducir la energía de activación de la reacción de curado de la resina disminuyendo el tiempo que deba estar el colchón en la prensa. En este caso la policondesación de la resina fue adecuada obteniendo tableros capaces de soportar mayores cargas.

Respecto al módulo de elasticidad (MOE) que se refiere a la capacidad del tablero para resistir deflexión o pandeo, los ensayos con catalizador mostraron una mayor rigidez, observando que a mayor porcentaje de catalizador dosificado el tablero tendrá un MOE más alto; esto se debe a que el catalizador mejora el entrelazamiento entre las fibras que componen el tablero [15].

## 5.2 Tracción perpendicular al plano, EN 319.

El ensayo de resistencia a la tracción se realizó de acuerdo a la norma EN 319, para cada tablero obtenido en cada nivel se sacaron 5 probetas a lo largo del tablero. Los resultados de esta propiedad mecánica se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6** Resistencia a la tracción por tipo de tablero

Nivel $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Velocidad de línea (mm/s)	Tracción (kg/cm <sup>2</sup> )
0.0	305	4.25
0.3	305	5.15
0.4	305	6.07

Existen al menos dos aspectos importantes que se debe considerar en el análisis de los resultados. Primero, debido a la forma como se distribuye las fuerzas durante este ensayo, la propiedad de tracción es el mejor indicador de la calidad de la unión entre las partículas o fibras de la zona central del tablero [16]. Por otra parte, durante el prensado la parte central del tablero es la última en recibir el máximo de temperatura, es la zona que está menos tiempo bajo el efecto de la temperatura y en ella el fraguado del adhesivo se da en las peores condiciones.

El ensayo de tracción en los tableros cuyo proceso no contenía dosificación de catalizador, muestra claramente un fraguado deficiente, producto de unas condiciones desfavorables en que se llevó a cabo la reacción química. A medida que se incrementa el porcentaje de dosificación del catalizador, el grado de acidez del ambiente en que fragua la resina cambia y es posible formar uniones más fuertes entre las fibras o partículas. Es destacable el significativo aumento de la resistencia al agregar pequeñas cantidades de catalizador.

De acuerdo con la norma EN 319, la exigencia mínima para tableros MDF 9 mm AS es de 5 kg/cm<sup>2</sup>. En este caso el tratamiento con 0% de catalizador fue el único que no logró superar el mínimo exigido por la norma. El valor más alto se alcanzó con 0.4% de dosificación de catalizador.



### 5.3 Arranque superficial, EN 311

El ensayo de resistencia a la tracción se realizó de acuerdo a la norma EN 311, para cada tablero obtenido en cada nivel se sacaron 3 probetas a lo largo del tablero. Los resultados de esta propiedad mecánica se presentan en la tabla 7.

**Tabla 7** Arranque superficial por tipo de tablero

Nivel (% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )	Velocidad de línea (mm/s)	Arranque superficial(kgf/cm <sup>2</sup> )
0.0	305	0.485
0.3	305	0.510
0.4	305	0.543

De acuerdo con la norma EN 311, la exigencia mínima para tableros MDF 9 mm AS es de 0.8 kgf/cm<sup>2</sup>. En ninguno de los niveles, ni en los que hubo una dosificación de catalizador, esta propiedad cumplió. Los tableros que se produjeron con una dosificación de catalizador tuvieron un aumento en esta propiedad de hasta 10%, lo que nos sugiere que al aumentar la dosificación se podría llegar a cumplir esta propiedad. Se aclara que esta propiedad no es de necesario cumplimiento y no es motivo de rechazo, ya que el mercado y los clientes no consideran que esta propiedad afecte las actividades a las que va a ser sometido el tablero. El ensayo se realiza para tener un seguimiento y tener un control de esta propiedad.

### 5.4 Distribución de densidad.

En la tabla 8 se presenta los valores de densidad para los tableros fabricados. Esta propiedad se midió a 23 probetas tomadas a lo largo del tablero por cada muestra.

**Tabla 8** Densidad por tipo de tablero

Nivel (% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )	Velocidad de línea (mm/s)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
0.0	305	668.0
0.3	305	683.5
0.4	305	693.72

Según las especificaciones descritas en la tabla 4 la densidad promedio de un tablero MDF 9 mm AS debería estar entre los 550 y 680 kg/m<sup>3</sup>. Como se observa los 3 niveles de prueba mostraron una densidad promedio dentro

del rango de especificación. Para el nivel de dosificación de 0.4% presentó la mayor densidad de 693.72 kg/m<sup>3</sup>. Es claro que el catalizador tiene una influencia positiva en el aumento de densidad, aunque densidades mayores a 800 kg/cm<sup>3</sup> pueden generar problemas en el proceso de laminación de los tableros, ya que una alta densidad no permite una buena penetración del pegamento de la lámina y por consiguiente se puede tener producto deslaminado.

### **5.5 Perfil de densidad.**

Como se especificó en la metodología el objetivo del perfil de densidad es verificar la densidad a lo largo del espesor del tablero a partir de una gráfica que se obtiene del perfilómetro. Para esta prueba se tomó una muestra de cada tablero obtenido en cada nivel de dosificación de catalizador. Estas graficas se encuentran en el Anexo 4.

Las gráficas A2 y A3 presentes en el anexo 4, representan tableros producidos a una velocidad de prensado de 305 mm/seg sin dosificación de catalizador en el proceso. Como se observa, caras representadas por los dos picos máximos (cara superior e inferior) tienen una densidad de más de 1000 kg/m<sup>3</sup> un valor que cumple con las exigencias. Por otra parte, se observa que en la parte central del tablero no existe una densidad homogénea, esto se debe a que la energía térmica que provee la prensa no alcanza a llegar a todas las partes del tablero generando un curado de la resina no uniforme a lo largo del espesor del tablero.

Respecto a las gráficas A4 a la A8, las cuales representan tableros producidos a una velocidad de prensados de 305 mm/seg con dosificación de 0.3% y 0.4% de catalizador, se tiene un resultado diferente y el problema de una densidad variable a lo largo del espesor del tablero se reduce significativamente. Esto se debe gracias a que el catalizador genera un curado más homogéneo de la resina a lo largo del espesor del tablero.

### **5.6 Porcentaje de humedad según la norma, EN 322.**

El ensayo de porcentaje de humedad se realizó de acuerdo a la norma EN 322, para cada tablero obtenido en cada nivel se sacaron 3 probetas a lo largo del tablero y luego se obtuvo un promedio el cual representara la humedad del tablero.

Los resultados de esta propiedad se presentan en la tabla 9:

**Tabla 9** Porcentaje de humedad para cada tipo de tablero

Nivel (% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )	Velocidad de línea (mm/s)	Porcentaje humedad, %
0.0	305	5.5
0.3	305	5.0
0.4	305	5.8

Según las especificaciones descritas en la tabla 4 el porcentaje de humedad de un tablero MDF 9 mm AS debería estar entre 5% y 7% para evitar un desequilibrio de humedad entre el tablero y el medio ambiente y evitar que el tablero absorba humedad y tienda a hincharse.

Como se observa en la tabla 9, en los 3 casos el porcentaje de humedad obtenido se encuentra dentro de la especificación y el catalizador no es un agente de cambio en esta propiedad. Esta propiedad puede ser afectada en mayor proporción por condiciones del proceso productivo y por las características con la que llegue la madera o rolliza. En condiciones de procesos tenemos las etapas 1 y 2 de secado de la fibra que puede que no cumpla o se exceda con la extracción de humedad de la fibra. También se podría tener una madera que llegue a la planta con un porcentaje de humedad muy alta o muy baja y las etapas de secado no cumplan con su propósito.

### **5.7 Porcentaje de hinchamiento según la norma, EN 317**

El ensayo de porcentaje de hinchamiento se realizó de acuerdo a la norma EN 317, para cada tablero obtenido en cada nivel se sacaron 3 probetas a lo largo del tablero y luego se obtuvo un promedio el cual representara la humedad del tablero. Los resultados después de las 24 horas de inmersión en agua a 20°C se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10** Porcentaje de hinchamiento 24 h en agua a 20°C

Nivel (% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )	Velocidad de línea (mm/s)	Hinchamiento 24 h, %
0.0	305	16.05
0.3	305	13.19
0.4	305	12.63

Se comprobó que el resultado más desfavorable se obtuvo con 0% de catalizador, la diferencia entre los tableros de 0% y 0.3%, 0.4% se debe al catalizador dosificado ya que al 0% no se produce un fraguado eficiente, se

tendrá que la unión entre las partículas o las fibras es débil, por lo que al absorber agua el hinchamiento de los tableros con 0% será mayor.

La disminución del hinchamiento producida por el incremento del porcentaje de catalizador, puede explicarse por la eficiencia del fraguado de la resina. Es decir, en presencia de un pH desfavorable de la madera, el adhesivo requiere de catalizar para policondensar adecuadamente. Este proceso de fraguado mejora al aumentar la presencia de ácido sulfúrico proveniente del catalizador, las uniones entre las fibras resultan más resistentes y el hinchamiento disminuye. De acuerdo a la norma EN 317, el hinchamiento máximo permitido a 24 horas es de 16 %. Esta propiedad podría mejorarse aún más a través de la incorporación de algún producto hidrófobo [14].

### **5.8 Porcentaje de absorción según la norma, EN 317.**

En la tabla 11 se presentan los resultados de absorción a 24 horas de inmersión en agua a 20 °C. Esta propiedad se controló en las mismas probetas con las que se realizó en hinchamiento.

**Tabla 11** Porcentaje de absorción de agua a 24 h 20 °C

Nivel (% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )	Velocidad de línea (mm/s)	Absorción 24 h, %
0.0	305	51.50
0.3	305	39.25
0.4	305	37.33

La absorción de agua disminuye al incrementarse el nivel de catalizador. Al igual que el hinchamiento, el resultado más desfavorable se obtuvo con una dosificación de 0%. Esto se explica por un fraguado deficiente lo que hace más inestables e irregulares a los tableros. Un factor que puede ser agente de cambio para esta propiedad es el tipo de madera con la cual se está produciendo el tablero MDF ya que hay algunas especies como la madera de *tepa* que tiene una baja densidad y gran permeabilidad, estas características favorecen el ingreso del agua [17]. La disminución en la absorción de agua al aumentar el porcentaje de catalizador, se explica por un mejoramiento del proceso de fraguado, lo que permite aumentar la adherencia entre las fibras, haciendo al tablero más estable y resistente al ingreso de agua.

De acuerdo a la norma EN 317, el porcentaje de absorción máximo permitido a 24 horas es de 40 %. Para los tableros realizados con dosificación del catalizador este parámetro se encuentra muy al límite de la

especificación, por lo tanto, otra forma de reducir la absorción de agua sería aumentando la densidad de los tableros [18].

### **5.9 Determinación del contenido de formaldehído según la norma, EN 120.**

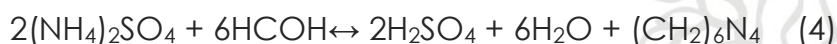
En la tabla 12 se presentan los valores promedios obtenidos para cada nivel. Estos ensayos se realizaron según la norma EN 120, para cada tablero obtenido en cada nivel se extrajo una muestra de 110 g aproximadamente a lo largo del tablero.

**Tabla 12** Cantidad de formaldehído por cada tipo de tablero

Nivel (%(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Velocidad de línea (mm/s)	Perforador (mg formaldehído/g de tablero)
0.0	305	52,85
0.3	305	51,34
0.4	305	48,02

Es notorio que el sulfato de amonio como agente catalizador afecta en cierto grado las emisiones de formaldehído. Con una dosificación de 0.4% de sulfato de amonio se logró reducir en un 9% el contenido de formaldehído libre en los tableros MDF 9 mm AS. Esto se explica ya que el catalizador mejora la reacción de curado de la resina volviendo una reacción más eficiente. Las moléculas libres de formol presentes en la resina son utilizadas en la formación de retículo infinito generando un curado total de la resina con concentraciones bajas de formol libre [19].

Existe otra posibilidad de que los catalizadores latentes como el sulfato de amonio reaccionan con el formaldehído libre formando ácido sulfúrico, agua y hexamina [20], tal y como se muestra en la ecuación 4



Un exceso de catalizador puede actuar como un agente atrapante de formaldehído, porque puede consumir el formaldehído libre sin reaccionar. Sin embargo, en condiciones ácidas y calor, la hexamina formada podría descomponerse liberando formaldehído [21]. La hexamina también puede reaccionar lentamente con el agua, formando amoniaco y formaldehído [22]. Ambos mecanismos pueden conducir a la producción de emisiones de formaldehído durante la vida útil del tablero. Pero este caso no se logra evidenciar durante los ensayos ya que la cantidad de sulfato de amonio dosificado es pequeña.

El nivel estándar de contenido de formaldehído que debe tener los tableros MDF corresponde a un límite de 8 mg formaldehído/100 g de tablero seco (norma EN 312) para considerarlos clase E1. Existe otra clase la cual es E2 que especifica que un tablero se encuentra en esta clasificación si el

resultado del ensayo del perforador da un valor de 30 mg formaldehído/100 g tablero seco. Como se observa, los tableros fabricados no entran en ninguna de las dos clases, pero implementar al proceso la dosificación de catalizador permite acercarse al objetivo de producir tableros clase E1.

### **5.10 Determinación de emisión de formol según la norma japonesa JIS A 1460.**

En la tabla 13 se presentan los valores promedios obtenidos para cada nivel. Estos ensayos se realizaron según la norma japonesa JIS A 1460, para cada tablero obtenido en cada nivel se extrajeron 10 probetas tomadas a lo largo del tablero y luego se introdujeron al desecador tal y como se ilustra la imagen 8.

**Tabla 13** Emisiones de formaldehído por cada tipo de tablero

Nivel (%(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Velocidad de línea (mm/s)	JIS (Emisión de formaldehído mg/L)
0.0	305	8.63
0.3	305	6.85
0.4	305	6.50

Tal y como sucedió con el contenido de formaldehído libre en los tableros, la emisión de formaldehído disminuye con la dosificación de catalizador. Igualmente, con la dosificación de 0.4% de catalizador se logró la mayor reducción de emisiones, reduciendo hasta en un 25% las emisiones de formaldehído provenientes de los tableros MDF 9 mm AS. La reducción en la emanación de formaldehído se debe a la dosificación de catalizador al proceso que permite que el adhesivo fragüe adecuadamente y eficientemente, dejando cada vez menos formaldehído libre sin reaccionar e impidiendo que pueda emanar al exterior [23].

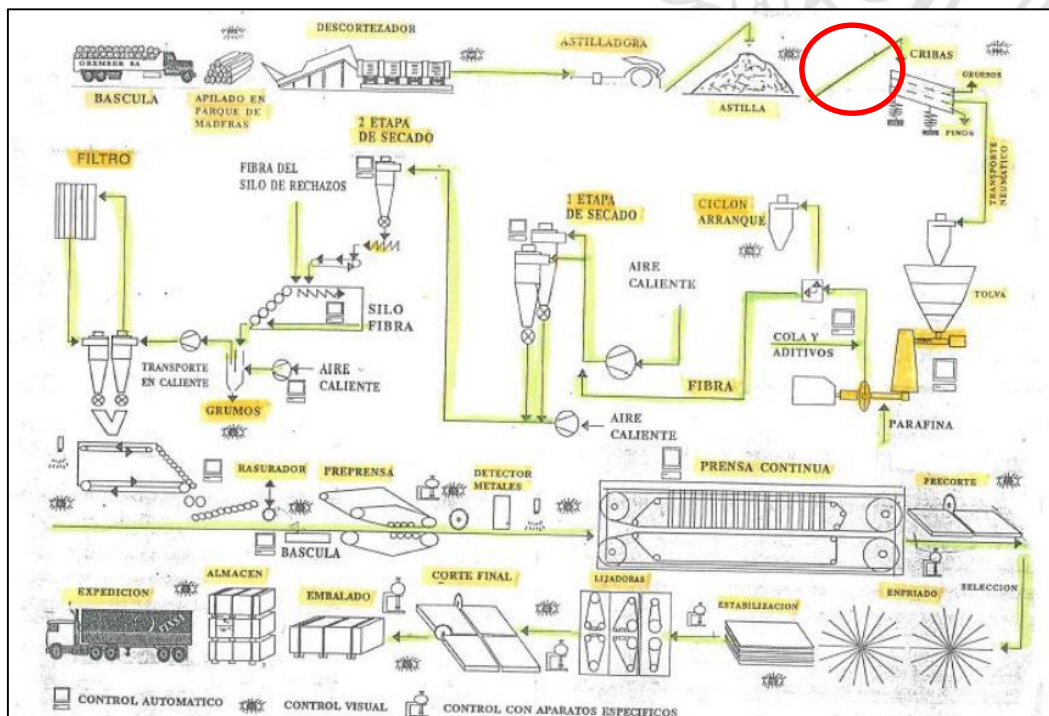
Ahora el nivel estándar de emisiones de formaldehído que debe tener los tableros MDF corresponde a un límite de 1.1 mg formaldehído/L para considerarlos clase E1. Existe otra clase la cual es E2 que especifica que un tablero se encuentra en esta clasificación si el resultado del ensayo del JIS da un valor de 3.3 mg formaldehído/L. De igual forma se observa que los tableros fabricados no entran en ninguna de las dos clases, pero implementar al proceso la dosificación de catalizador permite acercarse al objetivo de producir tableros clase E1.

### **5.11 Análisis general de la implementación de dosificación de catalizador al proceso producción de MDF 9 mm AS.**

A pesar de que la planta de Tablemac MDF posee el equipo e instrumentos de control para implementar la dosificación de catalizador aún no se había

realizado ningún ensayo a nivel de planta, todos los datos obtenidos y experimentación que se habían realizado fue a nivel de laboratorio y consistían básicamente en determinar el tiempo de gel para una resina mezclada con soluciones de sulfato de amonio a diferentes concentraciones. La conclusión que se obtuvo fue que la concentración al 20% P/P permitió un adecuado y un eficiente curado de la resina, resultado que concordaba con la literatura existente [24].

La planta de Barbosa actualmente cuenta con sistemas altamente automatizados y tiene sus procesos controlados adecuadamente desde el alimento de la astilla hasta el control y purificación de los gases generados en el proceso (ESCRUBBER), pero adicionar otra variable nueva a un proceso en continuo (imagen 9) es generar perturbaciones y estas perturbaciones las soportan los equipos mecánicos.



**Imagen 9** Diagrama simplificado del proceso de producción del MDF

Como se observa en el diagrama de la imagen 9 el proceso del MDF es continuo y la etapa que se considera cuello de botella es la fase de prensado del colchón ya que es en este tramo donde se regula la velocidad (mm/seg). Es decir, si hay una velocidad alta o baja en el ciclo de prensado las demás líneas de proceso se deben regular para que a la etapa de prensado le llegue un colchón de fibra constante. En este orden de ideas, el aumentar la velocidad del ciclo de prensado del MDF 9 mm AS a 305 mm/seg generó desequilibrio en algunas líneas del sistema específicamente en la etapa de alimentación de la astilla. Si observamos el diagrama y la

imagen A12 en el Anexo 3, vemos una banda nombrada REDLER que se encuentra entre el almacén de pisos móviles que contiene astilla de madera y la criba que se encarga de seleccionar la astilla adecuada para el proceso. La función de esta banda es transportar la astilla que proviene de los pisos móviles a la criba y así alimentar de materia prima el proceso. Se observó que esta banda es muy susceptible a los cambios de velocidad en la línea ya que a velocidades de 305 mm/seg en la prensa la banda tiene que hacer un esfuerzo mecánico aumentando su velocidad de trabajo y transportando una cantidad mayor de material (astilla) hasta el punto de llegar a un esfuerzo máximo y tener fallas mecánicas resultando en paradas de producción como se observa en la imagen 10.



**Imagen 10** Falla mecánica en la banda REDLER

Las fallas mecánicas fueron esporádicas, lo que si presentó con mucha frecuencia era una inestabilidad en mantener una velocidad 305 mm/seg en la etapa de prensado ya que el REDLER no lograba satisfacer la demanda de astilla a la línea, y sin un buen alimento de astilla los demás procesos en especial la etapa de refinación (donde la astilla se transforma en fibra) carecían de madera para trabajar y era necesario parar el proceso para que la etapa de refinación recuperar su nivel de astilla. Aunque se tuvieron programas campañas de 9 mm As, no era posible poner en marcha la dosificación de catalizador ya que no se tenía unas buenas condiciones de trabajo en la etapa de alimentación de la astilla.

Además de la limitante mencionada anteriormente se tuvieron varios días de mantenimiento en los cuales la planta estaba totalmente detenida. Sumándole que se tuvieron dos percances, uno directo y otro indirecto que afectaron la programación de los ensayos de dosificación de catalizador. El incidente directo consistió en un incendio en la etapa de prensado



generado por taponamientos de ductos de ventilación de la prensa con material lignocelulósico generando que la planta parara 5 días. El incidente indirecto consistió en una gelificación del reactor de resina en la planta de Yarumal, planta que suministra de resina a la planta Barbosa. Debido a ese incidente se debió comprar resina UF a INTERQUIM, este cambio de resina no nos permitió programar la dosificación de catalizador después de una semana y media. Los motivos expuestos anteriormente demuestran que a pesar de haber tenido programado campañas de 9 mm AS no se logró realizar por completo todos los niveles dosificación de catalizador y solo se pudo realizar los niveles de 0%, 0.3% y 0.4% de dosificación de catalizador.

Aunque no se realizaron todos los niveles, los resultados demostraron que implementar la catálisis al proceso mejora la productividad de la planta aumentando la velocidad de prensado a 305 mm/seg y sin afectar los parámetros de calidad de los tableros MDF 9 mm AS producido, parte esencial e importante para implementar definitivamente el proyecto. Respecto a los dos niveles realizados 0.3% y 0.4% se decide escoger la dosificación de 0.4%, dado que, los tableros producidos a partir de esta dosificación obtuvieron una mejora sustancial en la propiedad de resistencia a la tracción con un valor de 6.07 kg/cm<sup>2</sup>. Con el nivel de 0.3% de dosificación se cumplió con la especificación, pero muy al límite con un valor de 5.15 kg/cm<sup>2</sup> siendo la especificación de 5.0 kg/cm<sup>2</sup>. Ahora, tener una tracción de 6.07 kg/cm<sup>2</sup> puede dar gabela de aumentar en 1 segundo o máximo 2 segundos la velocidad del ciclo de prensado y así aumentar aún más la producción, pero este es un tema que se deja como alternativa ya que el tiempo no brindó la oportunidad de comprobar esta teoría.

Por otro lado, los tableros fabricados aplicando el nivel correspondiente 0.4% de dosificación de catalizador obtuvieron una cantidad menor de formaldehído libre en su interior y por consiguiente obtuvieron menores emisiones de formaldehído. Respecto a las demás pruebas la dosificación al 0.4% obtuvo mejores propiedades, un menor porcentaje de hinchamiento, un perfil de densidad más simétrico, mayor resistencia mecánica y un porcentaje de absorción menor. En este orden de ideas, la dosificación de 0.4% es la adecuada para catalizar el proceso con ciclos de prensado de 305 mm/seg.

## 6 Análisis económico

Si tomamos una velocidad media entre el rango de 280 y 295 mm/seg, velocidades las cuales se produce el tablero MDF 9 mm AS obtenemos un

valor de 287.05 mm/seg. Trabajando con un valor redondeado de 288 mm/seg podremos calcular un promedio de volumen en m<sup>3</sup> producidos por día sin catalizar a partir de la ecuación 5:

$$m^3 = \text{Velocidad de prensa} * \text{acho del tablero} * \text{espesor del tablero} * \text{tiempo disponible} \quad (5)$$

$$m^3 = 288 \text{ mm/seg} * 1 \text{ m}/1000 \text{ mm} * 2.44 \text{ m} * 0.009 * 81,000 \text{ seg}$$

$$m^3 = 512 \text{ m}^3 \text{ MDF9mm}$$

Con una velocidad de 288 mm/seg se produce 512 m<sup>3</sup> de MDF. El costo de un 1 m<sup>3</sup> para el consumidor es de aproximadamente \$ 680,000. Es decir que en una jornada ideal (22.5 horas de trabajo) sin paro alguno y trabajando en continuo la planta generaría aproximadamente \$ 348,160,000 en producto MDF.

Es necesario determinar los costos de producción para 512 m<sup>3</sup> de MDF 9 mm AS, para esto se definen 6 insumos necesarios que serían resina, catalizador, madera, parafina, agua y energía. Para cada uno de los insumos se precisa los kg necesarios para producir 1 m<sup>3</sup> de MDF. Finalmente se detalla el costo de 1 kg de insumo que debe pagar la compañía. Para el caso de la energía se precisa (kW/h) necesarios por 1 m<sup>3</sup> producido. Se aclara que para el caso del proceso sin catalizar el costo del insumo catalizador será cero. A continuación, se describe un ejemplo de cómo se halló el costo que la empresa debe pagar por un insumo al producir 512 m<sup>3</sup> de MDF 9 mm AS:

$$\text{\$ Resina/día} = 512 \text{ m}^3 \text{ MDF 9 mm/día} * 67.7 \text{ kg resina/m}^3 \text{ MDF 9 mm} * 1500 \text{ \$/kg resina} \quad (6)$$

$$\text{\$ Resina/día} = 51,993,600 \text{ \$/día}$$

Aplicando la ecuación 6 para los 6 insumos de construye la Tabla 14

**Tabla 14** Costo de producción para el proceso sin catalizar

Calibre (mm)	m <sup>3</sup> / día	Valor unidad (\\$ COP/kg)	Nivel dosificación catalizador (kg cata/ kg R.S) nivel 0
9	512		0
Descripción	Cantidad kg/m <sup>3</sup>	Valor unidad (\\$ COP/kg)	Valor total (\\$/día)
Resina	67.7	1500	\\$ 51,993,600
Catalizador	Depende del nivel	1280	\\$ -

<b>Madera</b>	1500	143.5	\$	110,208,000
<b>Parafina</b>	6.3	3050	\$	9,838,080
<b>Agua</b>	900	3.46	\$	1,593,433
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad (kW/h)/m<sup>3</sup></b>	<b>Valor unidad (\$ COP/kW/h)</b>	<b>Valor total (\$/día)</b>	
<b>Energía</b>	272	630.62	\$	87,822,664
<b>Total</b>			<b>\$</b>	<b>261,455,776</b>

Si restamos los costos de producción que tendrían un valor aproximadamente de \$261,455,776, dato obtenido de la tabla 14, se tendrían ganancias de \$ 86,704,224 al día. Es decir, con una velocidad de 288 mm/seg la planta estaría generando aproximadamente al mes \$ 2,201,126,712 libres de la nómina de los 200 empleados que trabajan en la planta.

Si aplicamos el mismo procedimiento para la velocidad de 305 mm/seg se tendría una producción diaria de 543 m<sup>3</sup> de MDF sin paro alguno durante las 22.5 horas de trabajo. Este volumen generaría aproximadamente \$ 369,240,000 en producto MDF. Los costos para el proceso catalizado se determinan de la misma manera, simplemente se ingresa el costo del catalizador. Los datos de costos se encuentran en la Tabla 15.

**Tabla 15** Costo de producción para el proceso con catalizador

<b>Calibre (mm)</b>	<b>m<sup>3</sup> / día</b>	<b>Valor unidad (\$ COP/kg)</b>	<b>Nivel dosificación catalizador (kg cata/ kg R.S) nivel 2</b>	
<b>9</b>	543		0,004	
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Valor unidad (\$ COP/kg)</b>	<b>Valor total (\$/día)</b>	
<b>Resina</b>	67.7	1500	\$	55,141,650
<b>Catalizador</b>	Depende del nivel	1280	\$	188,217
<b>Madera</b>	1500	143.5	\$	116,880,750
<b>Parafina</b>	6.3	3050	\$	10,433,745
<b>Agua</b>	900	3.46	\$	1,689,910
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad (kW/h)/m<sup>3</sup></b>	<b>Valor unidad (\$ COP/kW/h)</b>	<b>Valor total (\$/día)</b>	
<b>Energía</b>	272	630.62	\$	93,140,052
<b>Total</b>			<b>\$</b>	<b>277,474,323</b>

Si se resta los costos de producción que serían aproximadamente de \$277,474,323 de pesos, dato obtenido de la Tabla 15, las ganancias al día serían de \$ 91,765,677 pesos. Es decir, con una velocidad de 305 mm/seg la planta de Barbosa de MDF generaría aproximadamente al mes \$ 2,352,970,301.

Es evidente que catalizar el proceso aumentara la velocidad a 305 mm/seg genera un aumento de la producción de MDF 9 mm AS en un 6.1%. El aumento de producción se vería reflejado en el margen de ganancias de

la empresa aumentando en un 6.9%, es decir \$ 151,843,589 de pesos más al mes.

## 7 Conclusiones

- El incremento del nivel de catalizador, permite mejorar las propiedades físicas de hinchamiento, absorción de agua, aumenta la densidad, una mejor distribución de densidad a lo largo del espesor del tablero y las propiedades mecánicas flexión (MOR y MOE) y tracción.
- Los tableros MDF 9 mm AS fabricados con un ciclo de prensado de 305 mm/seg con resina UF y sin catalizador, no cumplen con la norma tracción y presentan los valores más bajos de MOR y MOE, además contienen una concentración mayor de formaldehído y por consiguiente mayor emisión de formaldehído al ambiente.
- En base a los valores de resistencias mecánicas y propiedades físicas obtenidas, se puede aseverar que la inclusión de un catalizador ácido es beneficioso para producir tableros MDF 9 mm AS con un ciclo de prensado de 305 mm/seg. En el proyecto realizado parece adecuado agregar la cantidad de 0.4% de sulfato de amonio como catalizador de la resina UF.
- Catalizar al 0.4% generaría aumentos de producción del 6.1 % para los tableros MDF 9 mm AS y aumentaría el margen de ganancias en 6.9% mensual pero primero la planta debe mejorar y ajustar las demás líneas de proceso que presentan fallas y no se ajustan a ciclos de prensado de 305 mm/seg.

## 8 Recomendaciones

- Se recomienda asignar una jornada laboral por cada nivel de dosificación de catalizador a implementar al proceso, con el objetivo de obtener por cada nivel 3 muestras de tablero y conseguir un mayor número de resultados de calidad y poder visualizar mejor el efecto del nivel en el proceso.
- Se sugiere incluir al área de mantenimiento mecánico durante los ensayos de dosificación de catalizador, ya que estos ensayos sobrecargarán los equipos mecánicos de la planta y es necesario tener

en consideración esta variable para que los ensayos se realicen de forma exitosa y sin interrupciones.

- Se aconseja que toda preparación de solución de catalizador al 20% p/p se realice con agua entre 40 y 50 °C para evitar problemas de obstrucción con la bomba.

## 9 Referencias bibliográficas

[1] Araújo Ibarra consultores en negocios internacionales. (2020). Solicitud para la adopción de una medida de salvaguardia andina a las importaciones de tableros de madera, con o sin recubrimiento, para uso en ambiente seco o húmedo, clasificados por las subpartidas arancelarias 4410.11.00.00 Y 4410.19.00.00 originarios de Ecuador. Bogotá. Recuperado de <http://srvcalidad.mincomercio.gov.co/Practicas-Comerciales/Mincomercio/S-999-00-78-Tableros%20de%20maderaT1-publico.PDF> [Accessed March 2021]

[2] Minicomercio. (2020). Investigación administrativa sobre una solicitud de imposición de una medida de salvaguardia a las importaciones de tableros de madera, clasificados por las subpartidas arancelarias 4410.11.00.00 y 4410.19.00.00, con base en el artículo 97 de la Decisión 563 de la Comunidad Andina. Recuperado de <http://srvcalidad.mincomercio.gov.co/Practicas-Comerciales/Mincomercio/S-999-00-78-Tableros%20de%20maderaT22-publico.PDF> [Accessed March 2021]

[3] Velázquez HEC, Galindo AS, Facio AOC. Resinas termoestables de fenol – formaldehído. 2016;17(6):266–76.

[4] Ramis Juan X. Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas de poliéster insaturado. 2013;25.

[5] Lisperguer, Justo, & Droguett, Cynthia. (2002). Caracterización del curado de resinas urea formaldehído por calorimetría diferencial de barrido (DSC). Boletín de la Sociedad Chilena de Química, 47(1), 33-38. <https://dx.doi.org/10.4067/S0366-16442002000100007>

[6] Muedra AN. influence of the cycle of curing in characteristics of sheering in composites of high gramma with resins of vinil-urethane. (Influencia del ciclo de curado en las características a cizalladura de composites de alto gramaje con resinas vinil-uretano.). 2010;

- [7] Crespo G, Rommel, Torres U, Marcos, Valenzuela H, Luis, & Poblete W, Hernán. (2013). Propiedades químicas, color y humectabilidad de partículas de *Laureliopsis philippiana* (tepa) con y sin tratamiento térmico. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 15(3), 337-348. Epub 24 de julio de 2013. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000026>
- [8] PARAMESWARAN, N. 1974. "pH and Buffering Capacity of Some Tropical Tree Barks", *J. Ind. Acad. Wood Sci.* 5(1):28-31
- [9] Roffael HPE. [Joer chemische Ver ~ nderungen in Holzsp ~ inen bei der Herstellung von Harnstoff-Formaldehydharz-gebundenen Spanplatten. 1985;43:57-62.
- [10] Plath, E. 1959. Über den Einfluß der Hartung von Harnstoff-harzen auf die Eigenschaften von Holzspanplatten. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 17 (12): 490 - 494.
- [11] Neusser. H. 1962. Über die Veränderungen des Leimes Während des Produktionsganges von Spanplatten bzw. über einige Einflußfaktoren auf deren Verleimungsqualität *Holzforstung und Holzverwertung.* 14 (516): 88 - 97.
- [12] Roffael, E., W. Rauch, C. Bismarck. 1975."Formaldehydabgabe und Festigkeitsausbildung bei der Verleimung von Eichenspänen mit Harnstoffformaldehydharzen", *Holz als Roh-und Werkstoff.* 33(72): 271-275.
- [13] Petersen H, Reuther W, Eisele W, Wittmann O. Zur Formaldehydabspaltung bei der Spanplattenerzeugung mit Harnstoff-formaldehyd-Bindemitteln. *Holz als Roh-und Werkstoff Eur J Wood Wood Ind.* 1973;31(12):463-9.
- [14] Poblete, H. Y Peredo, M. 1990. *Tableros a Base de Desechos de Contrachapados.* Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Informe de Convenio N° 182 150 p.
- [15] Kehr, E. 1962. Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und -sortimente zur Herstellung von Spanplatten *Holztechnologie.* 3 (1): 22 - 28.
- [16] Urzúa, D. Y Poblete, H. 1980. *Utilización Silvo-agropecuaria de los Terreros de Ñadis.* Informe N° 2. Factibilidad Técnica de Producción de Tableros de Partículas Utilizando las Especies que Crecen en los Terrenos de Ñadis. Informe Convenio N° 22. Convenio SERPLAC X Región - Universidad Austral de Chile. 140 p.
- [17] Juacida, R. 1980. *Algunos Factores que incluyen en la impregnación de maderas.* Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Publicación Docente N° 3. 19 p.

[18] Vital, B.; Lehmann, W. and Boone, R. 1974. How Species and Board Densities Affect Properties of Exotic Hardwood Particleboard. For. Prod. J. 24 (12): 37 - 45. Volumen

[19] Lehmann WF. Method and Composition for Reduction of Formaldehyde Emission in Wood Composite Panels. US: Weyerhaeuser Company; 1983. p. 6.

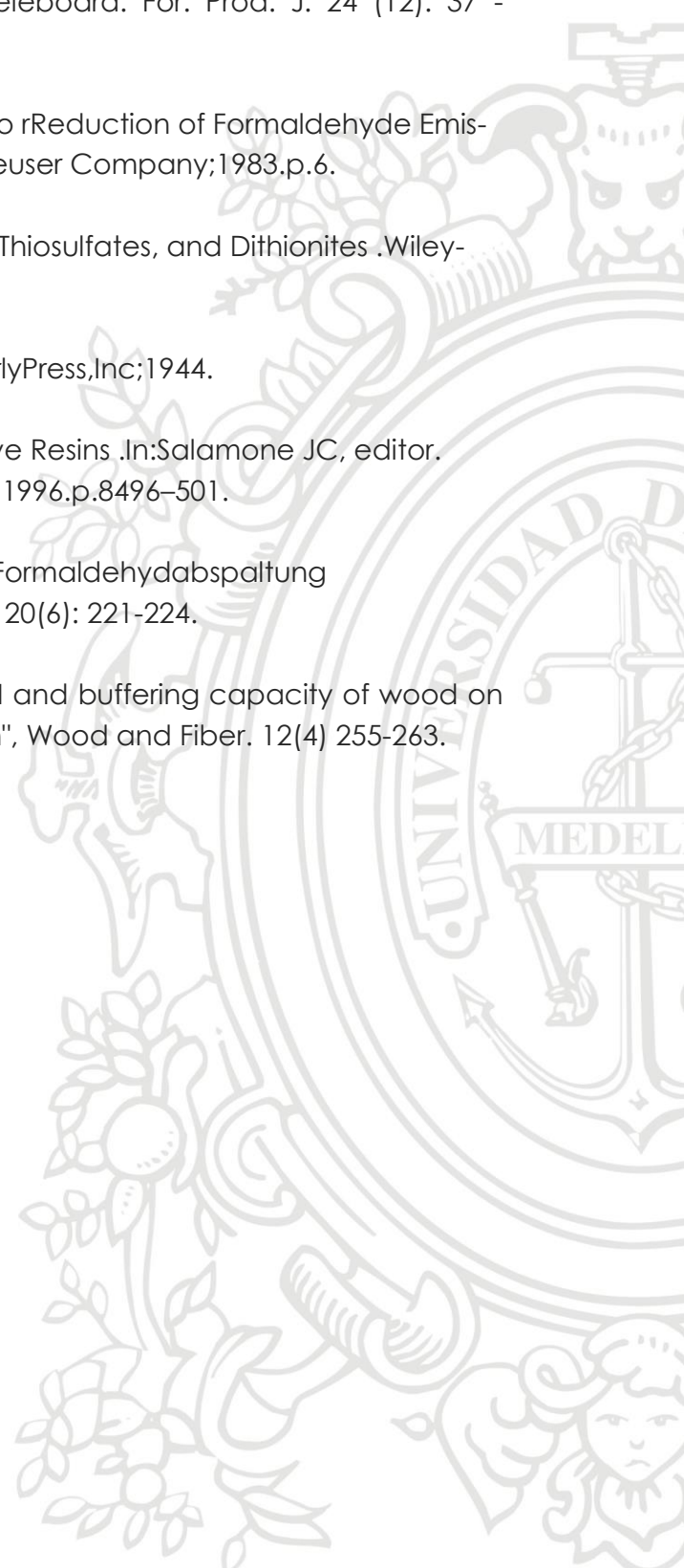
[20] Barbera J, Metzger A, Wolf M. Sulfites, Thiosulfates, and Dithionites. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2000.

[21] Walker JF. Formaldehyde. New York: Waverly Press, Inc; 1944.

[22] Conner AH. Urea-Formaldehyde Adhesive Resins. In: Salamone JC, editor. Polymeric Materials Encyclopedia. CRC Press; 1996. p. 8496-501.

[23] WITTMANN, O. 1962. "Die nachträgliche Formaldehydabspaltung bei Spanplatten", Holz als Roh- und Werkstoff. 20(6): 221-224.

[24] JOHNS, W. y NIAZI K. 1980. "Effects of pH and buffering capacity of wood on the gelation time of Urea formaldehyde resin", Wood and Fiber. 12(4) 255-263.



## 10 Anexos

### 10.1 Anexo 1. Curva de densidad vs concentración %p/p

Tabla A 1 Datos experimentales para la construcción de la curva de densidad vs concentración (%p/p)

Condición Ideal (%)	H <sub>2</sub> O (g)	Sulfato de amonio (g)	%p/p	Volumen (mL)	Peso (g)	Densidad (g/mL)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
0	100.004	0	0	5	5.0343	1.00686	1006.86
10	90.0007	10.0043	10.004	5	5.2856	1.05712	1057.12
20	80.0003	20.0276	20.022	5	5.5572	1.11144	1111.44
30	70.004	30.0022	30.000	5	5.8272	1.16544	1165.44
40	60.0058	40.0274	40.014	5	6.1474	1.22948	1229.48

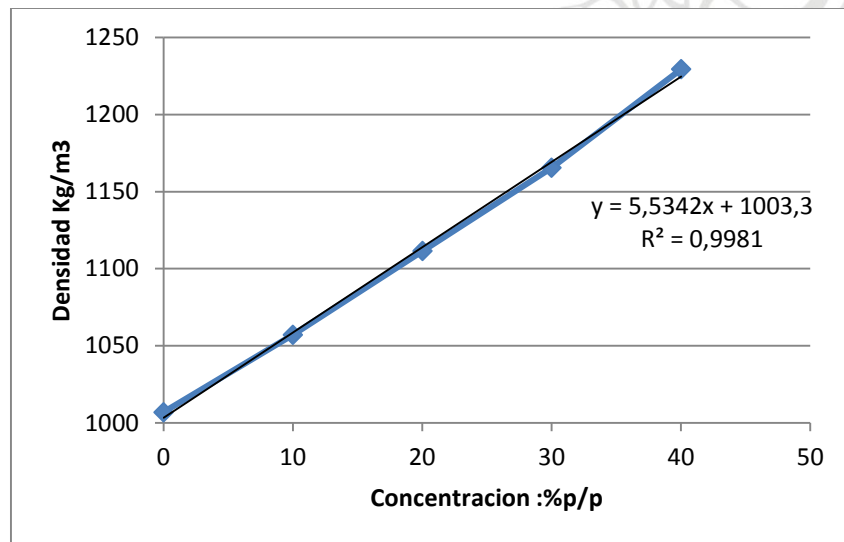


Gráfico A1. Curva de densidad vs concentración (%p/p)

Como se observa en el gráfico A1, la relación de densidad vs concentración (%p/p) tiene una tendencia lineal y su modelo explica en 99.81% la variable de concentración.



## 10.2 Anexo 2. Plano del HIT-JET

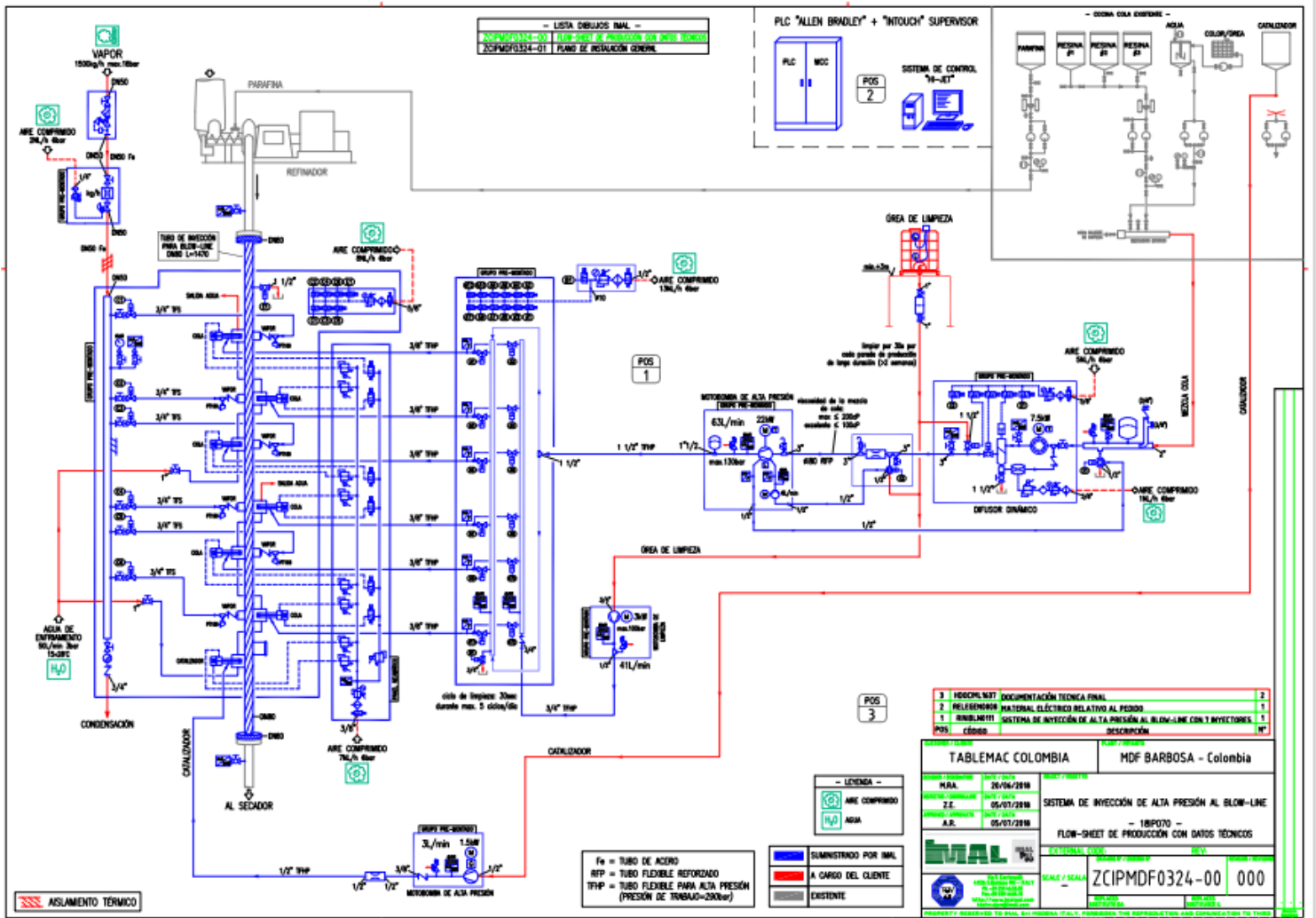


Imagen A1 Diagrama de HIT-JET

## 10.3 Anexo 3. Control de proceso

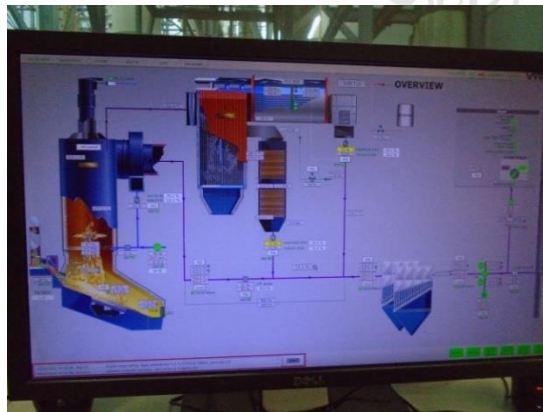


Imagen A2 Control planta térmica

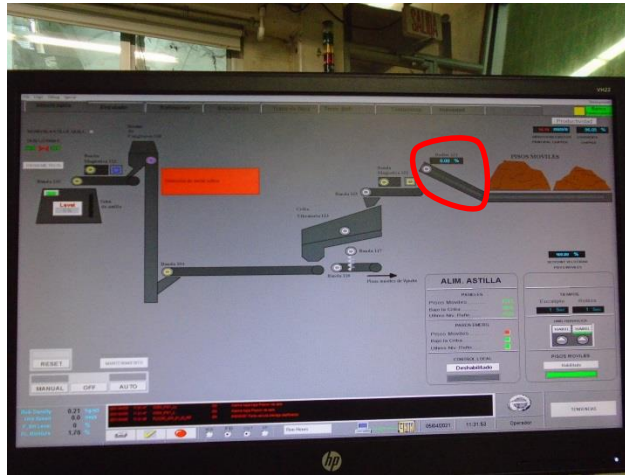


Imagen A3 Control alimento de astilla al proceso

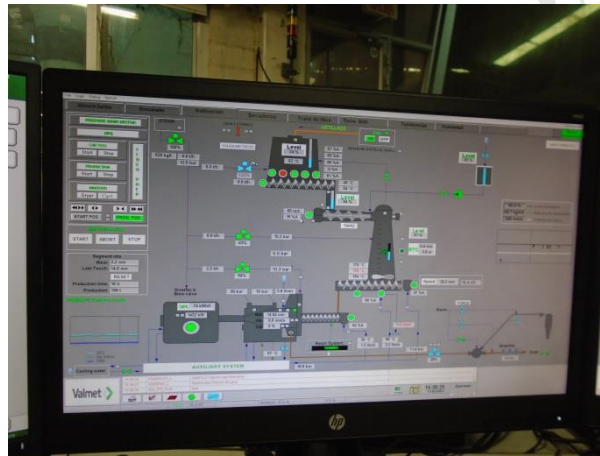


Imagen A4 Control de Etapa de refinación



Imagen A5 Control de cocina

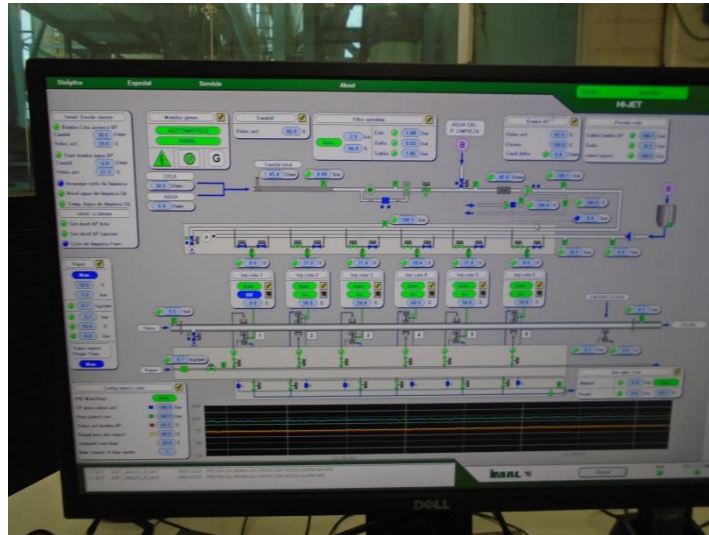


Imagen A6 Control de sistema HIT-JET

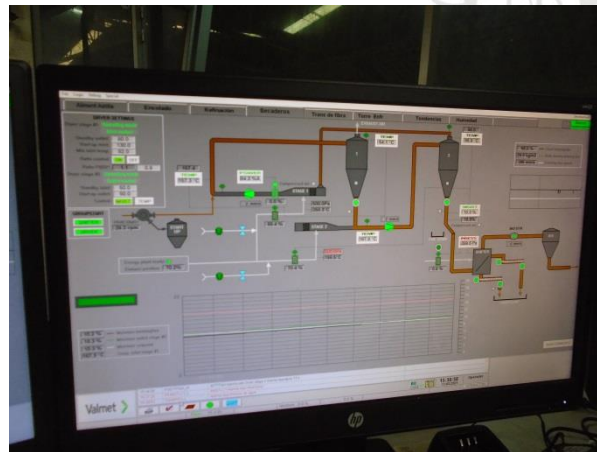


Imagen A7 Control primera y segunda etapa de secado

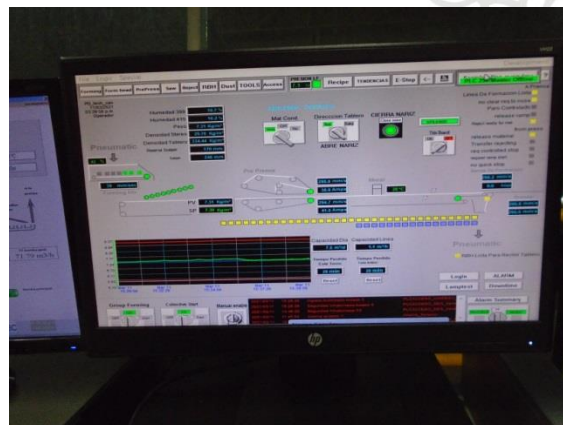


Imagen A8 Control de pre prensa



Imagen A9 Control Prensa

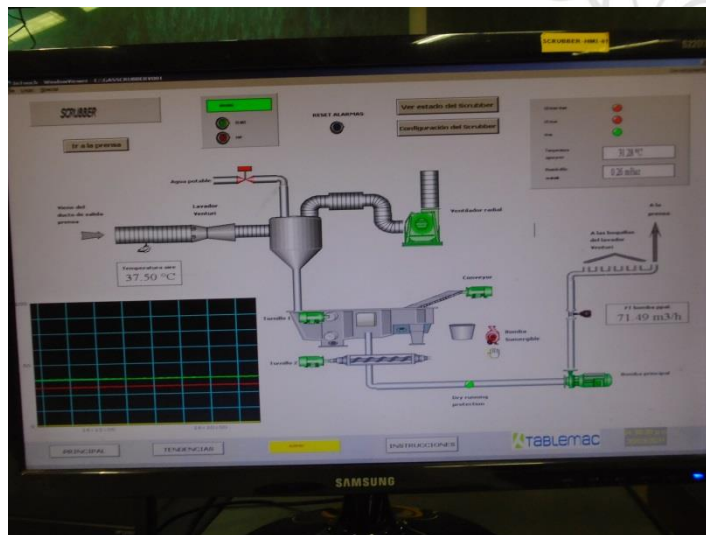
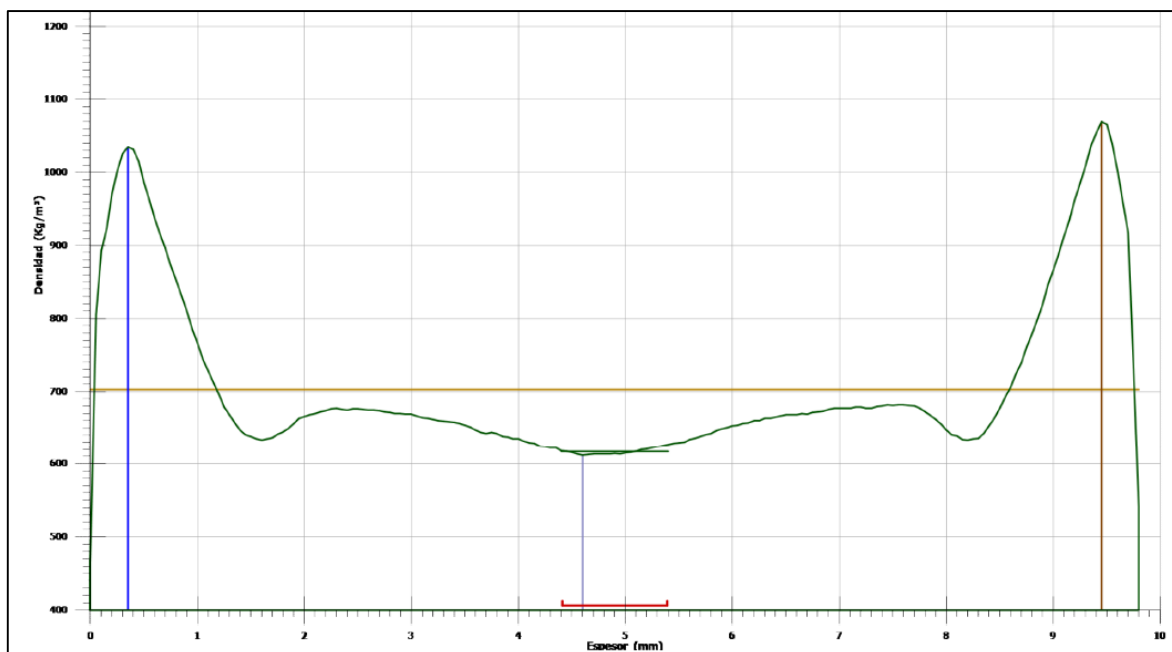


Imagen A10 Control ESCRUBBER

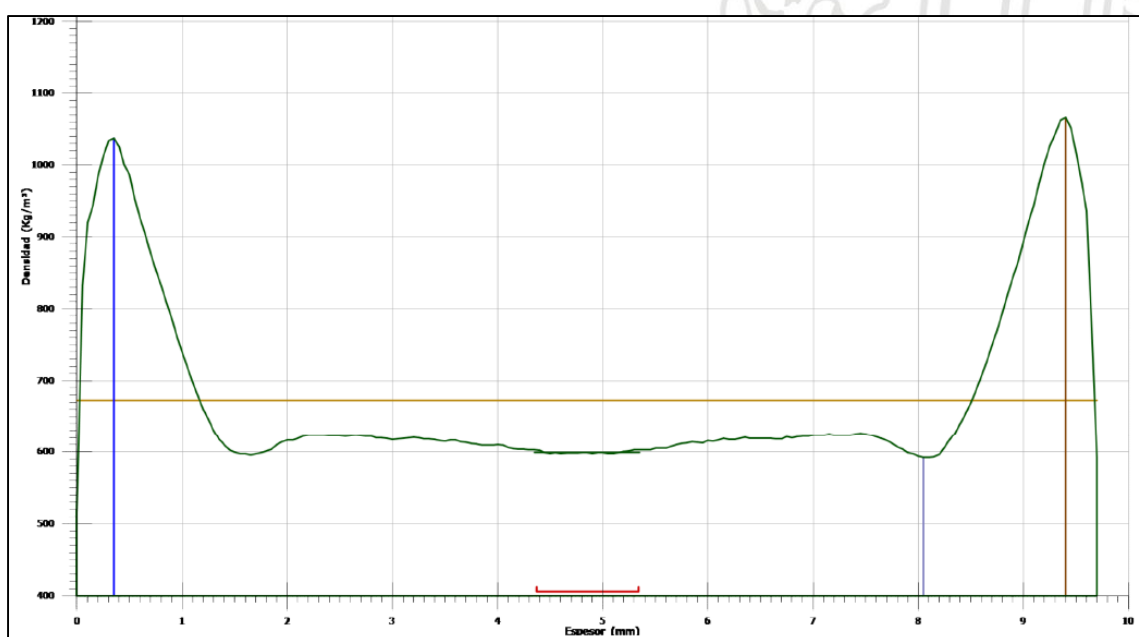
#### 10.4 Anexo 4. Perfiles de densidad

Muestra: Nivel 0 (0 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), fecha y hora de toma de muestra: 18/02/2021 6:40 am



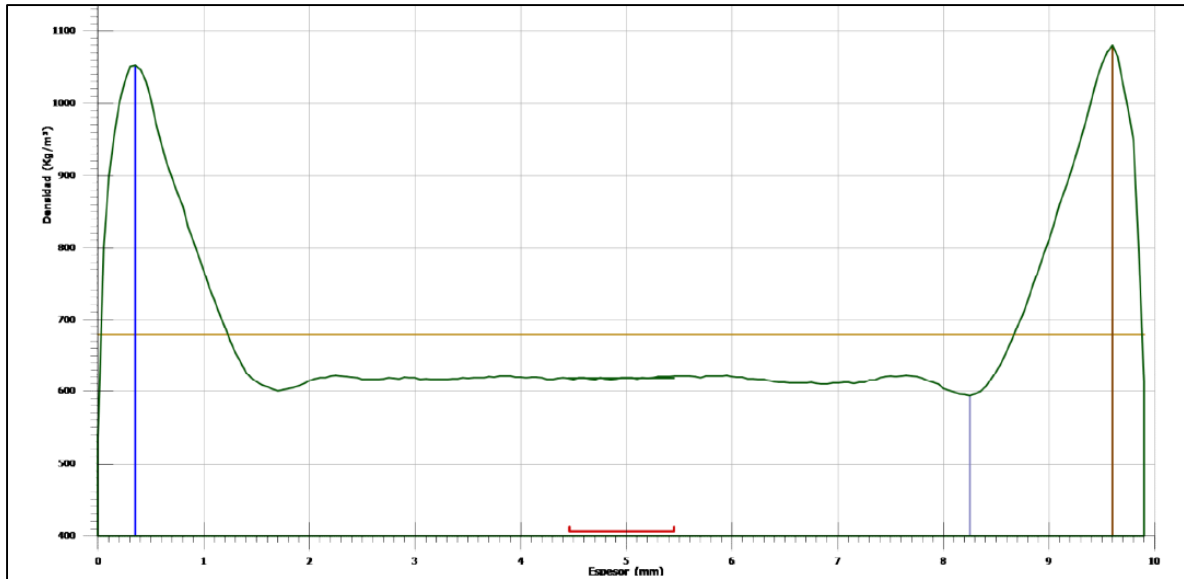
**Gráfico A1** Perfil de densidad 0% de catalizador muestra 18/02/2021 6:40 am

Muestra: Nivel 0 (0 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), fecha y hora de toma de muestra: 12/03/2021 6:30 am.



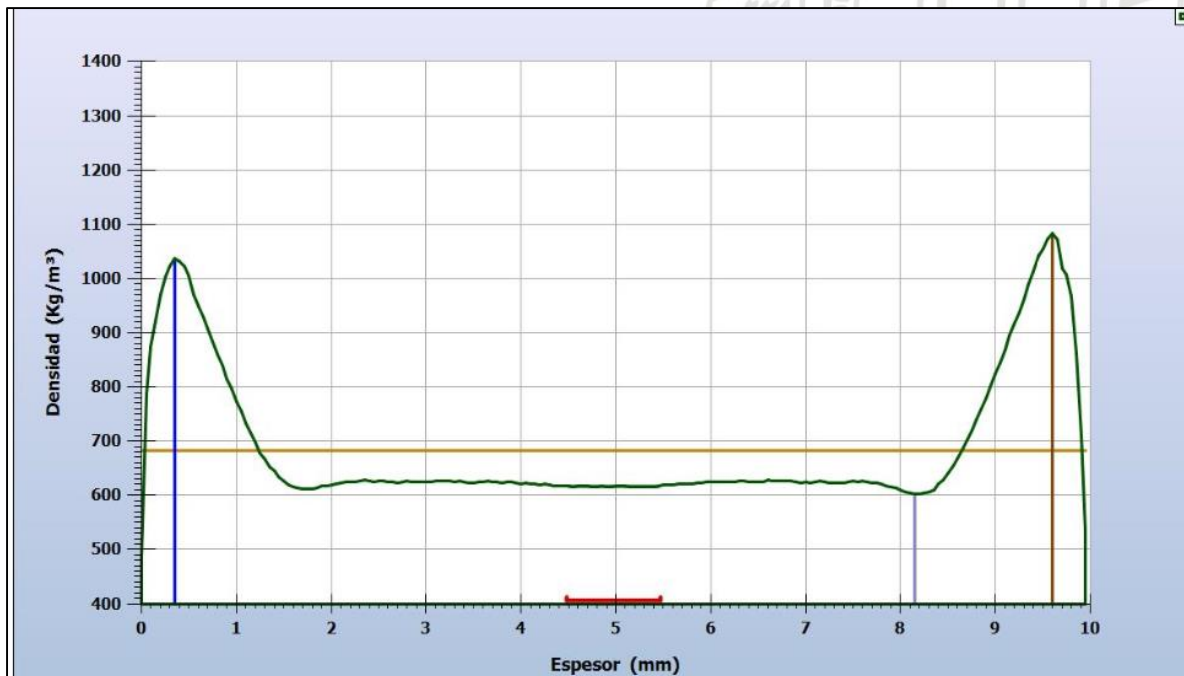
**Gráfico A2** Perfil de densidad 0% de catalizador muestra 12/03/2021 6:30 am

Muestra: Nivel 1 (0.3 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), fecha y hora de toma de muestra: 19/02/2021 10:20 am



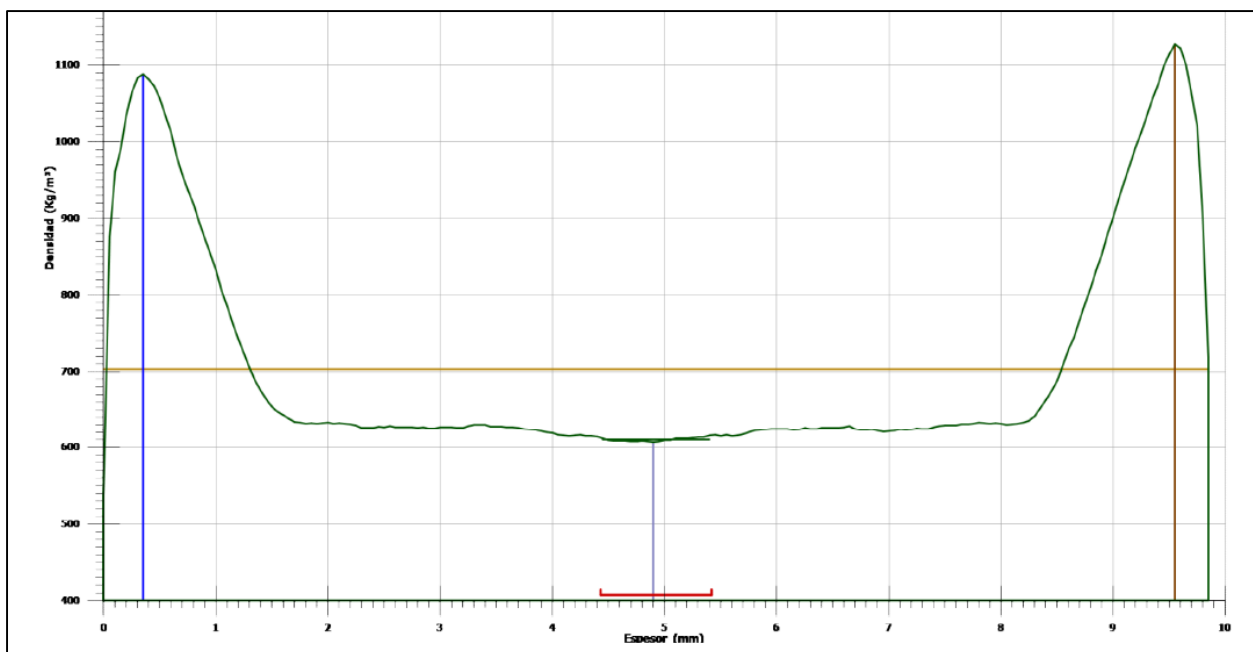
**Gráfico A3** Perfil de densidad 0.3% de catalizador muestra 19/02/2021 10:20 am

Muestra: Nivel 1(0.3 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), fecha y hora de toma de muestra: 25/02/2021 10:20 am



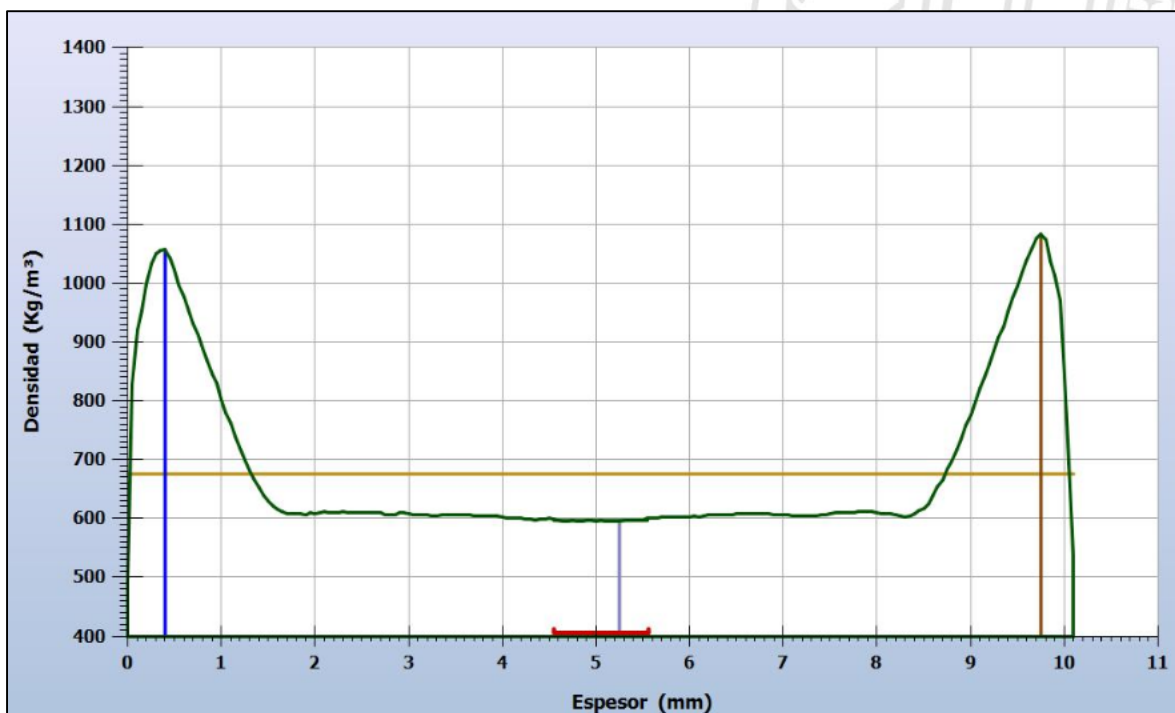
**Gráfico A4** Perfil de densidad 0.3% de catalizador muestra 25/02/2021 10:20 am

Muestra: Nivel 2 (0.4 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), fecha y hora de toma de muestra: 12/03/2021 14:35 pm



**Gráfico A5** Perfil de densidad 0.4 % de catalizador muestra 12/03/2021 14:35 pm

Muestra: Nivel 2 (0.4 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), fecha y hora de toma de muestra: 12/03/2021 18:40



**Gráfico A6** Perfil de densidad 0.4% muestra 12/03/2021 18:40 pm

Muestra: Nivel 2 (0.4 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), fecha y hora de toma de muestra: 12/03/2021 22:35 pm

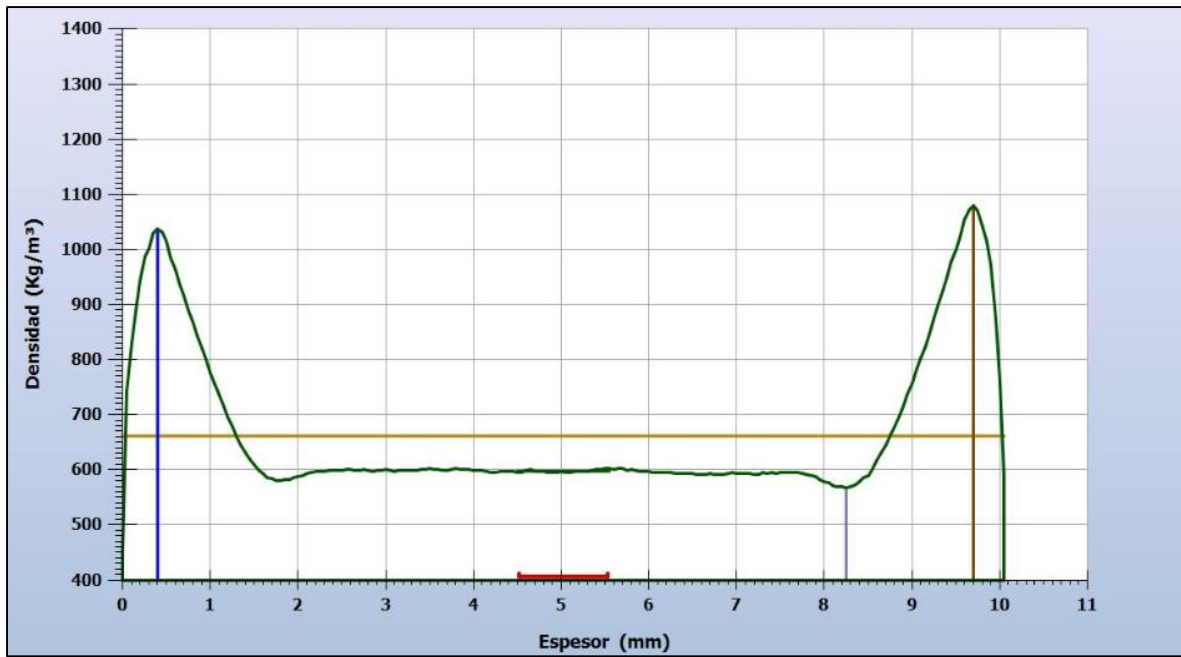


Gráfico A7 Perfil de densidad 0.4% de catalizador muestra 12/03/2021 22:35 pm