

Evaluación de un proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática para el recubrimiento de paneles de Fibra de Densidad Media (MDF).

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Procesos

DANIEL COLORADO CÁLAD

Cód. 200910029004.

MANUEL POSADA JARAMILLO.

Cód. 200910014004.

Asesor:

Jaime Andrés Gutierrez M.

Mgr. en Ingeniería

Ingeniero de procesos

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MEDELLÍN

2014

AGRADECIMIENTOS

Por la colaboración brindada durante el desarrollo del Proyecto de Grado se agradece:

A Jaime A. Gutiérrez, asesor del proyecto, por su completa disponibilidad, asesoría, paciencia y entusiasmo durante la ejecución de este proyecto investigativo.

Al laboratorio de Investigación y desarrollo de la empresa RECYA S.A.S, en cabeza del Ing. Fernando Muñoz, por la ayuda constante y la disponibilidad total de los recursos utilizados en la elaboración de este proyecto.

A nuestras familias por su motivación diaria para la consecución exitosa todos nuestros objetivos.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	10
2. INTRODUCCIÓN.	12
3. OBJETIVOS.	15
2.1 OBJETIVO GENERAL.	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	15
4. HIPÓTESIS.	16
5. MARCO TEÓRICO.....	17
5.1 PINTURA EN POLVO.....	17
5.2 MATERIALES UTILIZADOS PARA EL RECUBRIMIENTO DE PIEZAS POR MEDIO DE PINTURA EN POLVO ELECTROSTÁTICA.	18
5.3 PROCESO DE APLICACIÓN DE PINTURA EN POLVO ELECTROSTÁTICA.	20
5.4 TABLEROS DE DENSIDAD MEDIA (<i>MEDIUM DENSITY FIBERBOARD</i> (MDF)).	25
5.5 PINTURA EN POLVO PARA MDF.....	26
5.6 ANTECEDENTES DE APLICACIÓN DE PINTURA EN POLVO SOBRE MDF.	29
6. MATERIALES Y MÉTODOS.	32
6.1 PINTURA EN POLVO.....	32
6.2 MDF.	32
6.3 HORNO DE CONVECCIÓN.	33
6.4 PISTOLA ELECTROSTÁTICA.	34
6.5 EQUIPOS PARA PRUEBAS DE CALIDAD.	35
6.6 METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA.	37
6.7 METODOLOGÍA PARA EL CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO #1. DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE PRECALENTAMIENTO, EL VOLTAJE DE APLICACIÓN, Y LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE CURADO EN EL PROCESO DE RECUBRIMIENTO DE MDF UTILIZANDO PINTURA ELECTROSTÁTICA.....	39

6.8 METODOLOGÍA PARA EL CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO #2: DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO DE MDF A PARTIR DE LOS FACTORES CRÍTICOS HALLADOS CON ANTERIORIDAD.....	41
6.9 METODOLOGÍA PARA EL CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO #3. DETERMINACIÓN DE LA RENTABILIDAD DEL PROCESO A NIVEL DE PLANTA DE PRODUCCIÓN.....	44
7. RESULTADOS.....	47
7.1 FACTORES CRÍTICOS DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO DE MDF UTILIZANDO PINTURA EN POLVO ELECTROSTÁTICA.....	47
7.2 OPTIMIZACIÓN DE LOS FACTORES CRÍTICOS EN EL PROCESO DE RECUBRIMIENTO DE MDF CON PINTURA EN POLVO ELECTROSTÁTICA.....	54
7.3 DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE APLICACIÓN DE PINTURA EN POLVO ELECTROSTÁTICA SOBRE MDF.....	66
7.4 EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO: APLICACIÓN DE PINTURA EN POLVO ELECTROSTÁTICA SOBRE MDF.....	71
8. DISCUSIÓN.....	79
8.1 FACTORES CRÍTICOS DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO DE MDF UTILIZANDO PINTURA ELECTROSTÁTICA.....	79
8.2 OPTIMIZACIÓN DE LOS FACTORES CRÍTICOS EN EL PROCESO DE RECUBRIMIENTO DE MDF CON PINTURA EN POLVO ELECTROSTÁTICA.....	81
8.3 EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO: APLICACIÓN DE PINTURA EN POLVO ELECTROSTÁTICA SOBRE MDF.....	84
9. CONCLUSIONES.....	89
10. RECOMENDACIONES.....	90
11. BIBLIOGRAFÍA.....	91
12. ANEXOS.....	94

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Proceso típico en continuo de aplicación de pintura electrostática sobre piezas metálicas. Elaboración personal basado en (Technologies, 2010).....	20
Figura 2. Proceso de revestimiento por medio de inmersión en lecho fluidizado. Elaboración personal basada en (Weg, 2008).....	22
Figura 3. Proceso de revestimiento por medio de pistola electrostática. Elaboración personal basada en (Weg, 2008).....	23
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso térmico para recubrir MDF con pintura en polvo.	28
Figura 5. Proceso por radiación para recubrir MDF con pintura en polvo.	29
Figura 6. Horno de convección de la empresa RECYA S.A.S.	33
Figura 7. Pistola electrostática para aplicación manual de pintura en polvo.	34
Figura 8. Kit para la medición de adherencia en recubrimientos. (Elaboración personal).....	35
Figura 9. Equipo para la medición de dureza en recubrimientos.	36
Figura 10. Esquema para verificar el porcentaje de adherencia de un recubrimiento - Basado en la norma NTC 811.	38
Figura 11. Diagrama de Pareto para la adherencia – Diseño factorial fraccionado.	48
Figura 12. Diagrama de Pareto para la dureza – Diseño factorial fraccionado.....	50
Figura 13. Diagrama de Pareto para el curado – Diseño factorial fraccionado.....	52
Figura 14. Gráficas de efectos de los factores principales sobre las 3 variables de respuesta evaluadas – Factorial fraccionado.....	54
Figura 15. Diagramas de Pareto para las variables de respuesta – Diseño factorial multinivel.....	56
Figura 16. Gráfica de interacción para adherencia – Factorial Multinivel.....	57
Figura 17. Superficie de respuesta para las variables de respuesta adherencia, dureza y curado.	58

Figura 18. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para adherencia – Diseño de superficie de respuesta.	60
Figura 19. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para dureza – Diseño de superficie de respuesta.	61
Figura 20. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para el curado – Diseño de superficie de respuesta.	61
Figura 21. Superficie de respuesta estimada para el óptimo encontrado.	63
Figura 22. Resultados de adherencia - Ensayos previos.	64
Figura 23. Resultados pruebas de variables de respuesta - Diseño factorial fraccionado.	65
Figura 24. Resultados pruebas de variables de respuesta - Luego de optimización.	66
Figura 25. BFD del proceso de aplicación de pintura en polvo sobre MDF. (Elaboración personal).	68

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Temperaturas y tiempos de los procesos para recubrir MDF con pintura en polvo.	29
Tabla 2. Corridas experimentales objetivo específico #1.	40
Tabla 3. Corridas experimentales para acercamiento a la zona del óptimo.	42
Tabla 4. Diseño de superficie de respuesta para encontrar el óptimo.	43
Tabla 5. ANOVA para la adherencia – Diseño factorial fraccionado.	49
Tabla 6 . ANOVA para la dureza – Diseño factorial fraccionado.	51
Tabla 7. ANOVA para el curado – Diseño factorial fraccionado.	52
Tabla 8. Rangos de ubicación del posible óptimo para cada variable de respuesta.	58
Tabla 9. Valores óptimos para cada variable de respuesta por cada factor mediante camino de máximo ascenso.	60
Tabla 10. Peso de las variables de respuesta para la optimización por superficie de respuesta.	62
Tabla 11. Resultados corridas experimentales en el punto óptimo encontrado.	63
Tabla 12. Cálculo de la máxima demanda posible de MDF.	71
Tabla 13. Demanda de unidades anuales durante el tiempo del proyecto.	72
Tabla 14. Inversión inicial en equipos.	72
Tabla 15. Amortización de la deuda para la puesta en marcha de la planta.	73
Tabla 16. Costo de la pintura asociado al recubrimiento de un 1 m ²	74
Tabla 17. Costo de un metro cuadrado de MDF sin tratar.	74
Tabla 18. Costos variables mensuales.	75
Tabla 19. Costos de mano de obra.	76
Tabla 20. Gastos fijos del proyecto.	76
Tabla 21. Flujo de caja del proyecto.	77
Tabla 22. Cálculo del indicador costo/beneficio.	78

LISTA DE ANEXOS

12.1 ANEXO 1: FICHA TÉCNICA PINTURA EN POLVO.	94
12.2 ANEXO 2: ANÁLISIS DE VARIANZA POR RESIDUALES PARA LAS 3 VARIABLES DE RESPUESTA EN EL DISEÑO FACTORIAL COMPLETO.	96
12.3 ANEXO 3: TABLAS ANOVA PARA CADA VARIABLE DE RESPUESTA EN DEL DISEÑO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.	99
12.4 ANEXO 4: GRÁFICAS DE INFLUENCIA DE LOS EFECTOS PRINCIPALES EN EL DISEÑO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.	100
12.5 ANEXO 5: CAMINO DE MÁXIMO ASCENSO PARA LAS 3 VARIABLES DE RESPUESTA EN EL DISEÑO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	101

1. RESUMEN

La pintura en polvo electrostática es un recubrimiento 100% sólido utilizado ampliamente en diferentes sectores de la industria como el metalmecánico y el automotriz. Dicho recubrimiento ofrece propiedades mecánicas y de resistencia química apropiadas y además es amigable con el medio ambiente ya que no necesita de solventes para su aplicación. Buscando ampliar el portafolio de aplicaciones de la pintura en polvo en la empresa RECYA S.A.S de Medellín, en este trabajo se desarrolló un proceso de aplicación de este tipo de recubrimiento sobre paneles de fibra de densidad media (MDF), el cual consiste en un aglomerado de fibras de madera y es muy utilizado para la decoración de interiores, diseño de cocinas, mueblería, entre otros.

Con el fin de encontrar las condiciones del proceso que mejoraran la adherencia del recubrimiento sobre el MDF, la dureza y el curado o resistencia a solventes, se hizo uso de una metodología de diseño de experimentos: En primer lugar se determinó que los factores importantes del proceso fueron: el tiempo de precalentamiento, la temperatura de precalentamiento, el voltaje de aplicación, el tiempo de curado y la temperatura de curado. A partir de un diseño de factorial fraccionado 2^{5-1} se determinó que los factores más influyentes fueron la temperatura y el tiempo de curado y que al aumentar su valor se maximizaban las variables de respuesta de adherencia, dureza y curado. Con estos resultados se planteó un diseño factorial completo variando el tiempo de curado en 12, 14 y 16 minutos y la temperatura de curado en 170°C, 180°C y 190°C, encontrando que los mejores resultados se hallaban entre 13 y 14 minutos y entre 175°C y 180°C en el proceso de curado. El óptimo se encontró mediante un diseño de optimización de superficie de respuesta 3^2 exactamente en 13 minutos a 175°C en la etapa de curado.

Se calculó también la rentabilidad del proyecto a 10 años a partir de los indicadores económicos del valor presente neto (VPN), el cual fue de \$364'042.231 a una tasa de oportunidad del 15%, la tasa interna de retorno (TIR), el beneficio anual equivalente (BAUE) que fue de \$10'845.591 anual y el indicador de costo beneficio que fue de 1.35, indicando que la inversión es rentable y que el proyecto es viable para 10 años.

Palabras clave: PINTURA EN POLVO, MDF, ADHERENCIA, DUREZA, CURADO, PLANTA DE APLICACIÓN.

2. INTRODUCCIÓN.

La pintura en polvo electrostática es un revestimiento 100 % sólido que se utiliza desde hace más de 30 años para recubrir sustratos -especialmente metálicos-, otorgándoles a éstos diferentes acabados y propiedades en la superficie. Este recubrimiento industrial se compone de pigmentos, resinas, aditivos (endurecedores, agentes de flujo, ceras) y rellenos, los cuales se homogenizan mediante extrusión a temperatura, se enfría y se muele a un tamaño de partícula muy fino (30µm a 45µm). Los componentes que conforman este producto al ser expuestos al calor (etapa de curado), se funden para formar una película continua que luego de ser curada tiene alta durabilidad y resistencia química (Talbert, 2001). Esta industria ha tomado fuerza en los últimos años, consolidándose en el mercado de recubrimientos y acabados como una alternativa llamativa por su precio, su facilidad de aplicación y los beneficios que le brinda a las piezas recubiertas (Wicks Jr, Jones, Pappas, & Wicks, 2007).

En la actualidad los recubrimientos electrostáticos en polvo ganan mayor confiabilidad y aplicabilidad en la industria nacional, por ejemplo en el segmento metalmeccánico, gabinetes eléctricos, góndolas, etc. Debido a la demanda creciente de estos tipos de acabados se hace necesario el desarrollo de pintura en polvo electrostática que cure en menor tiempo y a menor temperatura con el fin de aumentar la productividad de todas las líneas de producción existentes en las empresas dedicadas a la aplicación de dicha pintura sobre diferentes piezas (Harris, 2011).

La utilización de pintura electrostática en polvo tradicional para recubrimientos tiene dos grandes características que han direccionado su uso casi exclusivamente a metales: Primero, la pieza que se desea pintar debe ser conductora de electricidad y segundo debe resistir temperaturas de hasta 250°C en el proceso de curado,

(Redshaw, 2006). Otros sustratos como vidrio, plástico y madera, que son poco conductores y no resisten altas temperaturas, han llevado a los formuladores a desarrollar pinturas que puedan ser utilizadas para estos materiales especiales.

El tablero de fibra de densidad media (MDF por sus siglas en inglés), es un aglomerado de fibras de madera mezcladas con resinas mediante un tratamiento de calor y presión (Winandy & Krzysik, 2007). El MDF es poco conductor de electricidad y puede sufrir deformaciones con la temperatura, por lo cual si se quiere utilizar pintura en polvo para recubrirlo, es necesario modificar tanto la fórmula de la pintura tradicional, como el método de aplicación y terminación de ésta (Wuzella, Kandelbauer, Mahendran, Müller, & Teischinger, 2014).

A nivel mundial la industria del MDF ha presentado un incremento notorio en su productividad, se estima que anualmente se producen cerca de 87.8 millones m³. Entre los principales productores se encuentran China y Brasil, este último con una producción de 3.6 millones de m³ al año (Mymrin et al., 2014). En Colombia el consumo de MDF a 2009 se calculó en 101.000 m³ y el principal productor es TABLEMAC, con una planta con capacidad de producción de 132.000 m³ anuales (Patiño, 2010).

Actualmente los esfuerzos del sector de recubrimientos en polvo por buscar nuevos mercados y expandir su aplicación, han llevado a enfocar los nuevos desarrollos de productos al recubrimiento de maderas y más específicamente al recubrimiento del MDF, teniendo en cuenta que este está siendo cada día más utilizado y que requiere diferentes acabados según el uso final.

El desarrollo de un proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática para MDF adquiere particular importancia, ya que en Colombia no se ha realizado ningún estudio específico acerca de las condiciones necesarias para el recubrimiento del MDF y la maximización de las propiedades críticas del recubrimiento como lo son la adherencia, la dureza y la resistencia a solventes. En el caso del MDF el proceso de recubrimiento más empleado ha sido mediante la adhesión de láminas sintéticas (Arango, 2013).

Desde noviembre de 2009 la empresa RECYA S.A.S., en Medellín, ha desarrollado y producido pintura en polvo electrostática para uso general, es decir, productos básicos, cuya aplicación se enfoca casi en su totalidad en piezas metálicas. Esta empresa, pensando en ampliar su mercado y en estar a la par de los desarrollos tecnológicos del sector, desarrolló un tipo de pintura en polvo que cumple con todas las propiedades físicas, mecánicas y químicas según las normas técnicas internacionales (ASTM), y que además, utiliza una menor temperatura para su curado, lo que la hace potencialmente utilizable para el recubrimiento de paneles de MDF. Sin embargo en RECYA S.A.S no se ha realizado ningún trabajo para establecer las condiciones de aplicación de esta nueva pintura sobre MDF.

El propósito de este trabajo consiste en evaluar si es posible modificar el proceso tradicional de recubrimiento con pintura en polvo electrostática en piezas metálicas para el recubrimiento de tableros de MDF utilizando la nueva formulación de pintura en polvo desarrollada por RECYA S.A.S. De la misma manera este trabajo se propone determinar los factores críticos en cada una de las etapas del recubrimiento así como la maximización de las propiedades de adherencia, dureza y curado del recubrimiento final mediante una metodología de optimización. Finalmente se calculó la rentabilidad del proyecto a escala de planta de aplicación utilizando las condiciones del proceso óptimas encontradas.

3. OBJETIVOS.

3.1 OBJETIVO GENERAL.

Evaluar un proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática sobre paneles de fibra de densidad media (MDF) a nivel de laboratorio.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Evaluar el efecto de la temperatura de precalentamiento, el tiempo de precalentamiento, el voltaje de aplicación de la pintura, la temperatura de curado y el tiempo de curado en el proceso de recubrimiento de MDF utilizando pintura en polvo electrostática.

- Determinar las condiciones óptimas del proceso de recubrimiento de MDF a partir de la aplicación de pintura en polvo electrostática.

- Realizar la evaluación económica del proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática a partir de un diseño conceptual a escala de producción industrial.

4. HIPÓTESIS.

“Es posible optimizar las condiciones del proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática sobre MDF a nivel de laboratorio y el diseño conceptual de este proceso será económicamente viable por un periodo de 10 años”

5. MARCO TEÓRICO.

5.1 Pintura en polvo.

La pintura en polvo, también llamada recubrimiento en polvo, es un producto utilizado ampliamente en la industria principalmente para el recubrimiento de piezas metálicas, aunque también puede ser utilizado para aplicaciones en plásticos, madera, vidrio y materiales compuestos (Rijkse, 2001). Esta pintura ofrece grandes ventajas con respecto a la pintura líquida tradicional como lo son mejores propiedades mecánicas y químicas; una mayor duración del recubrimiento en la pieza; rendimientos de hasta el 98% y reducción de las emisiones de componentes orgánicos volátiles (VOCs por sus siglas en inglés) tales como el benceno, el cloruro de metileno y acetaldehído a la atmósfera (Kim, 2011). Algunas de las principales ventajas de la pintura en polvo descritas por Crapper en el (2012) son:

- En el uso inmediato, no es necesario combinar el polvo con solventes o catalizadores.
- La pintura puede ser fácilmente lavable si entra en contacto con el personal de aplicación.
- Bajo desperdicio: posee factores de utilización de hasta 98% si se cuenta con un sistema de aplicación y recuperación eficiente.
- La pintura no utilizada es reciclable, reduciendo el impacto ambiental.

- En cuanto a las propiedades de la película, ésta tiene un mejor rendimiento usando una sola aplicación, y se pueden lograr diferentes espesores según se requiera.
- Mínima contracción durante el curado, lo que posibilita una excelente cobertura de los bordes, mayor uniformidad y grosor de la película, variedad de acabados, texturas, y niveles de brillo.

5.2 Materiales utilizados para el recubrimiento de piezas por medio de pintura en polvo electrostática.

La pintura en polvo es un material 100% sólido mezclado en seco para lograr un producto uniforme y homogéneo. Estos revestimientos termosólidos se componen básicamente de resina, pigmentos para el color, adyuvantes de flujo, un catalizador como agente curador, y cargas que le ayudan a darle volumen y consistencia al producto final. Las resinas primarias utilizadas para formular estos revestimientos son: de tipo epóxicas, poliéster, uretano y mezcla de epóxicas con poliéster. Según el tipo de resina utilizada se necesitan diferentes agentes de enlace que pueden ser, aminos, anhídridos, melaninas e isocianatos bloqueados y no bloqueados. El tipo de resina utilizado afecta directamente las propiedades de los revestimientos y limita el uso de éstos para diferentes aplicaciones. A continuación, se exponen las resinas que son utilizadas con mayor frecuencia y sus propiedades (Crapper, 2012) y (Talbert, 2001):

- **Epóxicas:** Proporcionan al recubrimiento excelente dureza, resistencia química, resistencia a la corrosión y flexibilidad. Su mayor desventaja es que esta resina se degrada ante la exposición a rayos U.V., por lo que se ha restringido su uso a interiores. Con frecuencia son utilizadas para aislamiento eléctrico y protección contra la corrosión, por lo tanto se usan en motores eléctricos, cajas para cables, y partes interiores de los automóviles. Además los recubrimientos con resina epóxica son utilizados en decoración para recubrir muebles de uso interno, electrodomésticos y juguetes.
- **Poliéster:** Existen 2 tipos de resinas de tipo poliéster: poliéster de uretano y poliéster TGIC (Triglicidilisocianurato). Ambos le proporcionan al recubrimiento excelente durabilidad en ambientes expuestos a la intemperie y resistencia a la corrosión. Es importante anotar que las resinas de poliéster TGIC tienen igual resistencia a la corrosión que las de uretano, pero brindan menor resistencia química.
- **Híbridos de Epoxi-Poliéster:** Son una combinación en diferentes proporciones de resinas epóxica y resinas poliéster, estas últimas totalmente diferentes a las mencionadas en el numeral anterior. Algunos híbridos son menos resistentes a los químicos pero poseen mayor dureza, flexibilidad, y tienen menor precio. Sus propiedades y aplicaciones industriales son muy similares a las de las epóxicas. Esta combinación de resinas es muy utilizada debido a que su costo es menor, ofreciendo acabados muy llamativos y que además son libres de TGIC, lo que los hace perfectos para aplicaciones para el sector de alimentos y de salud.

5.3 Proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática.

En la Figura 1 se muestra un esquema del proceso de aplicación típico de pintura en polvo electrostática para piezas metálicas.

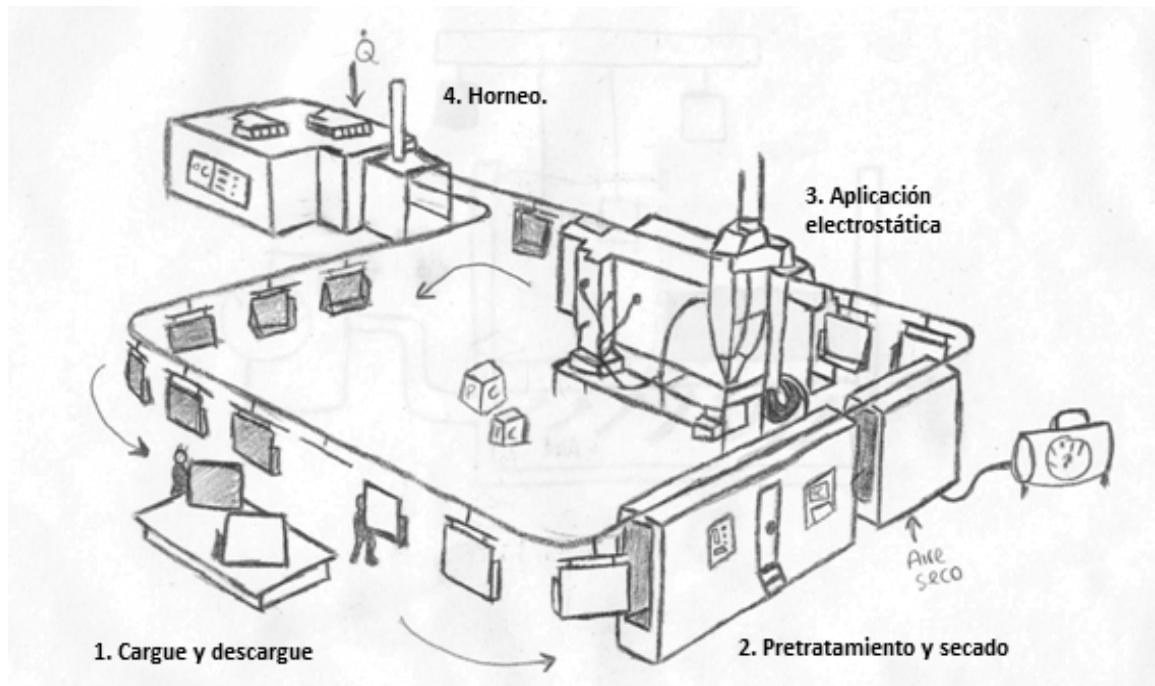


Figura 1. Proceso típico en continuo de aplicación de pintura electrostática sobre piezas metálicas. Elaboración personal basado en (Technologies, 2010).

Como se mencionó anteriormente los componentes básicos de la pintura en polvo electrostática son: pigmentos, resinas, aditivos, rellenos y catalizador, materiales que al ser expuestos al calor, se funden para formar una película continua que luego de ser curada tiene alta durabilidad y resistencia química. El proceso de revestimiento comienza con el cargue a la línea de la pieza para ser llevada a la etapa de pretratamiento (etapa 2, Figura 1) donde se desengrasa y se le aplica un fosfatizado de zinc o hierro para ayudar a la adherencia y al control de la corrosión. En el pretratamiento, la pieza que se desea recubrir (sustrato) es limpiada y

preparada para evitar que defectos en la superficie y contaminantes, como grasa, gravilla, causen mala adhesión, imperfecciones en el revestimiento, y corrosión prematura. Como se considera en Talbert (2001): *“El término tratamiento previo, se refiere al tratamiento mecánico o químico de la superficie de un producto manufacturado, conocido como el sustrato, a la limpieza y preparación del mismo para la aplicación de la capa de pintura”*. Este proceso varía en complejidad y rigurosidad según los defectos, el tipo de sustrato, la calidad de su superficie, y el tipo de acabado que se quiera lograr con el revestimiento en polvo.

Luego de las etapas de pretratamiento y secado, la pieza se dirige a la cabina de aplicación (etapa 3, Figura 1) donde la pintura se puede aplicar por medio de inmersión en lecho fluidizado o por aspersion electrostática (utilizando pistolas especiales), siendo el último el más común y el más utilizado en la industria (Schmidt, 2004). La pintura en esta etapa está adherida únicamente por la carga electrostática suministrada por la pistola, y puede ser retirada sin problema de la pieza. Por esta razón tiene que pasar a la etapa de curado u horneado (etapa 4, Figura 1), donde se expone a temperaturas, generalmente, de entre 180°C a 200°C, lo que le permite fundirse, reaccionar y obtener el acabado final. La pieza ya recubierta se va enfriando por convección libre y es descargada y empacada para su uso final.

En el proceso de inmersión, las piezas a recubrir son precalentadas y sumergidas en el revestimiento en polvo para lograr que éste se funda sobre la superficie y se forme una película. Posteriormente la pieza pasa al proceso de curado que se realiza en un horno cuya temperatura varía según el tipo de resina y el acabado que se quiera lograr (Weg, 2008). En la Figura 2 se detalla el funcionamiento de esta etapa específica del proceso.

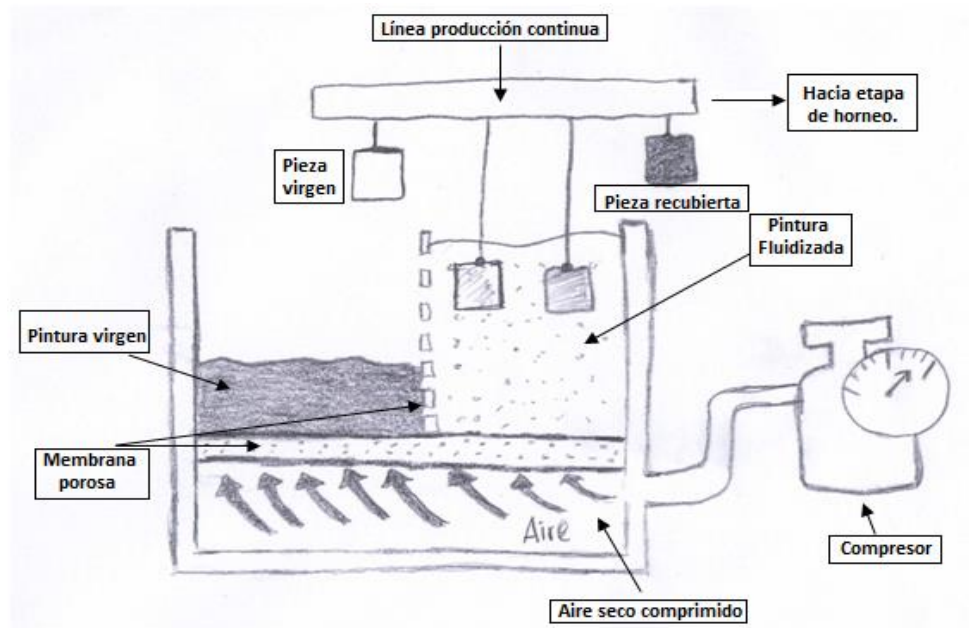


Figura 2. Proceso de revestimiento por medio de inmersión en lecho fluidizado. Elaboración personal basada en (Weg, 2008).

El proceso de aspersión, que se explica gráficamente en la Figura 3, utiliza un sistema de entrega que lleva el polvo a la pistola aspersora y un sistema de carga que imparte la carga electrostática. En un sistema común para este tipo de aplicación, una fuente de voltaje genera corriente a través del cable de voltaje y lo direcciona a la punta de la pistola, donde se encuentra el electrodo, que le imparte la carga a la pintura que va saliendo hacia la pieza. A medida que el polvo pasa a través del campo electrostático generado por el electrodo, se carga y es atraído a un sustrato conectado a tierra (Talbert, 2001). Luego de la adherencia electrostática del polvo a la pieza, ésta pasa a un horno para la etapa de curado.

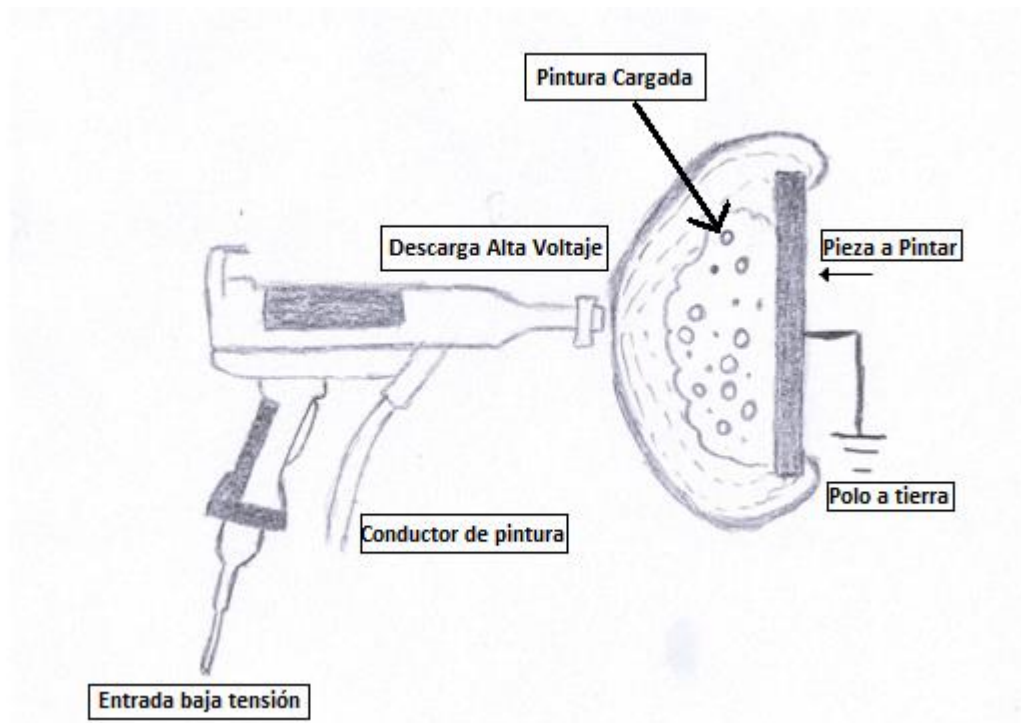


Figura 3. Proceso de revestimiento por medio de pistola electrostática. Elaboración personal basada en (Weg, 2008).

Para el proceso de aspersion electrostática es de suma importancia contar con un sistema de aplicación en una cabina especializada que, a su vez, tenga un sistema de recuperación gracias al cual se eviten desperdicios. También se requiere un horno de temperatura variable para realizar la fusión y curado de la pintura y un sistema de transporte que permita movilizar la pieza a través de las diferentes etapas del proceso.

La última etapa del proceso de revestimiento es el curado, correspondiente a la etapa 7 del proceso detallado en la Figura 1. En ella el polvo es expuesto a temperaturas elevadas y comienza a fundirse. Posteriormente se da la reacción química de polimerización en forma de red. Este proceso también llamado de

entrelazado requiere cierto grado de temperatura por un tiempo determinado hasta llegar al punto donde se establecen las propiedades finales de la película (Crapper, 2012). El curado puede darse en hornos convencionales por convección que utilizan comúnmente temperaturas en un rango de 180°C a 200°C, y el tiempo de curado depende de los materiales que componen la pintura, el grosor o espesor del recubrimiento y el calibre del sustrato (Weg, 2008).

Estos hornos generalmente utilizan quemadores de gas para calentar el aire que recircula por su interior, aunque también existen hornos eléctricos, que no son muy utilizados debido al costo que representa alcanzar y mantener altas temperaturas a través de energía eléctrica (Harris, 2008). El proceso de curado también se puede realizar con rayos infrarrojos (IR) que suministran energía directamente al recubrimiento. Esta energía hace que se realice de inmediato la reacción y comience la formación de los enlaces químicos. Los hornos de curado IR pueden ser más rápidos y eficientes pero la geometría de la pieza a recubrir puede afectar los resultados y la uniformidad del acabado. Si la geometría del sustrato es muy irregular y tiene muchas variaciones los rayos IR no tienen acceso a algunas partes de la superficie por lo que el curado no se va a dar a la misma velocidad que aquellas partes que están en contacto directo con el emisor. En este tipo de hornos es importante controlar la distancia entre el sustrato y los emisores de IR y la longitud de onda de los rayos IR (Harris, 2008).

En los dos tipos de procesos para realizar el curado del producto es de suma importancia hacer un diseño del sistema teniendo en cuenta las características del sustrato que se desea recubrir y las propiedades de la pintura considerando los acabados que se quieren lograr. Este tipo de diseño se enfoca generalmente en la velocidad a la cual las piezas atraviesan el horno y la temperatura en las diferentes zonas del mismo; lo que se busca es lograr un equilibrio entre gasto de servicio y

velocidad para lograr la mayor eficiencia en el proceso (Belder, Rutten, & Perera, 2001).

5.4 Tableros de densidad media (*Medium Density Fiberboard (MDF)*).

Los tableros de fibra de densidad media, o más comúnmente llamados MDF por sus siglas en inglés, son un tipo de tableros duros, compuestos por fibras de madera aglomeradas con pegante, mediante calor y presión. Se encuentran en la categoría de tableros de fibra que se fabrican en seco, por lo que poseen una humedad final inferior al 20% (Ángel, 2014).

EL MDF se compone esencialmente de los siguientes elementos (referencia):

- Fibras: Obtenidas calentando la madera y pasándola por los discos rotativos del desfibrador.
- Adhesivos: De acuerdo a las características y propiedades requeridas se utilizan típicamente Urea - formol, Urea - melamina - formol, Fenol - formaldehído, y de isocianato.
- Recubrimiento: Papel fenólico, chapas sintéticas y naturales, laminados, placas de acero o cobre, pinturas y barnices son los recubrimientos más usados en el MDF.
- Aditivos: De acuerdo a las propiedades que se deseen mejorar para el uso final se añaden aditivos como: ceras para repeler humedad, productos anti-incendios, insecticidas, fungicidas, etc.

Este material presenta grandes ventajas respecto a otros tableros de fibra media; Es plano, denso, y rígido y al ser fabricado a partir de partículas finas no posee una

superficie granulada que afecte su apariencia. Esta última característica le permite ser maquinado, cortado, taladrado, entre otros trabajos mecánicos, sin peligro de deteriorar la superficie. También permite ser barnizado o pintado para mejorar aún más su apariencia.

La principal desventaja que presentan estos tableros, es la presencia de úrea formaldehído que se libera al momento de cortar o lijar el material. Este compuesto químico puede crear irritación en ojos, nariz y pulmones, por lo que el uso de gafas, guantes y tapabocas son indispensables al momento de manipular el MDF. De igual manera, se debe tener cuidado al momento de atornillar o perforar la superficie ya que puede fracturarse (Design-technology). Debido a la gran capacidad de sus fibras de absorber agua, no se sugiere para su uso en intemperie ni en lugares con mucha humedad; tampoco es bueno para aislamiento sonoro. Entre sus usos más comunes se encuentra la fabricación de puertas, cocinas, divisiones interiores y molduras (Ángel, 2014).

5.5 Pintura en polvo para MDF.

El proceso de aplicación para el recubrimiento de MDF se ve limitado por el uso de hornos de convección a altas temperaturas y por la adherencia electrostática de la pintura sobre la superficie a recubrir, estos dos factores son de suma importancia en el proceso de aplicación de este tipo de recubrimiento (Lin, 2008). Sin embargo, el MDF al estar formado por fibras orgánicas, es muy sensible a la temperatura y y iertos tipos de MDF pueden comenzar a deformarse a temperaturas inferiores a las típicas usadas en el recubrimiento de metales que es de 190°C (Rijkse, 2001), adicional a ello, el MDF posee muy baja conductividad eléctrica, lo que complica en alto grado la deposición correcta del recubrimiento sobre los paneles de MDF (Harris, 2006). Sin embargo estos paneles poseen alguna humedad que le otorga cierta conductividad eléctrica (Ozdemir, Hiziroglu, & Malkocoglu, 2009), lo que ha

permitido que este tipo de material pueda ser recubierto con pintura en polvo electrostática y ha hecho que los esfuerzos se centren en desarrollar este tipo de pintura para el recubrimiento de MDF (MyM, 2011).

El MDF es uno de los materiales con mayor potencial de crecimiento y un sustrato ideal debido principalmente a su estructura homogénea, puesto que proporciona una superficie adecuada para el recubrimiento en polvo. En él se pueden obtener recubrimientos con acabados de alta calidad (Binder, 2004).

Se ha comprobado que el recubrimiento de MDF con pintura en polvo electrostática es viable y actualmente es una tecnología ampliamente utilizada en otros países productores de MDF, constructores y diseñadores de muebles para diferentes usos (Schmidt, 2004). El recubrimiento de MDF se puede realizar con un proceso térmico y con un proceso de radiaciones U.V. A continuación se describen los procesos y sus principales características (Binder, 2004):

- **Proceso térmico:** el proceso térmico para recubrir MDF es muy similar al proceso utilizado para recubrir metales, pero su diferencia radica en que se utilizan temperaturas menores y, por ende, resinas que curan a temperatura más bajas. Estas resinas de bajo curado son del mismo tipo que las resinas de curado típico, encontrándose poliéster TGIC, poliéster para híbrida, acrílicas, entre otras; siendo las primeras dos las más utilizadas a nivel industrial (Diez, 2013). Para lograr la adherencia de las partículas, las piezas se deben someter a una temperatura de 135°C, en la etapa de precalentamiento, y entre 10 y 20 minutos a una temperatura de 190°C en la etapa de curado. Para el recubrimiento de MDF se recomienda una temperatura de curado inferior a 190°C, idealmente entre 160°C y 180°C.

Después de la etapa de precalentamiento, se realiza la aplicación de la pintura en una cabina de aplicación con sistema de recuperación y las piezas pasan a un horno de convección donde se da la fusión y posterior curado de la pintura. Los tiempos y temperaturas de curado dependen de las dimensiones de la pieza de MDF y de la formulación de la pintura. Cabe anotar que por utilizar altas temperaturas las piezas recubiertas deben pasar por un sistema de enfriamiento.

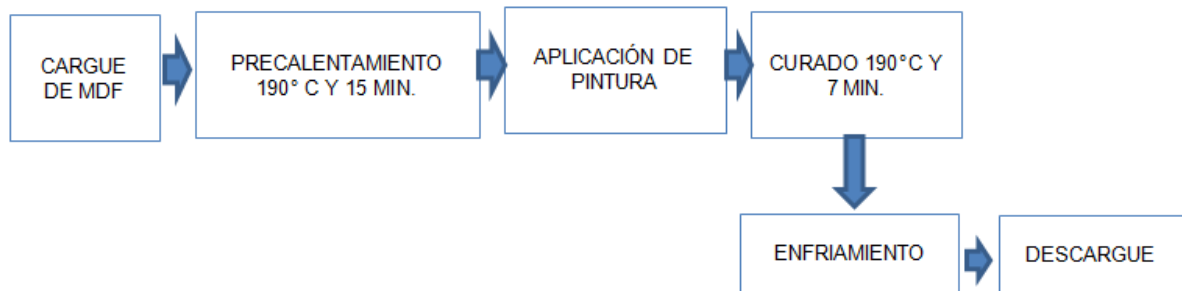


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso térmico para recubrir MDF con pintura en polvo.

- **Proceso por radiación:** Para pinturas de curado U.V., en el proceso que se explica en la Figura 5, las piezas son precalentadas en un horno híbrido eléctrico IR (800nm)/convección durante menos de 2 minutos para alcanzar una temperatura de 110°C. Luego se aplica la pintura en una cabina de aplicación con sistema de recuperación y las piezas pasan a un horno híbrido de IR/UV donde se da la fusión de la pintura con radiación IR y su posterior curado con radiación UV (Mills, 2003). Para la fusión se debe suministrar radiación IR durante 1.5 minutos y para la curado 2 minutos son suficientes. En este sistema no se requieren mecanismos para enfriar las piezas después de aplicar el recubrimiento (Belder et al., 2001).

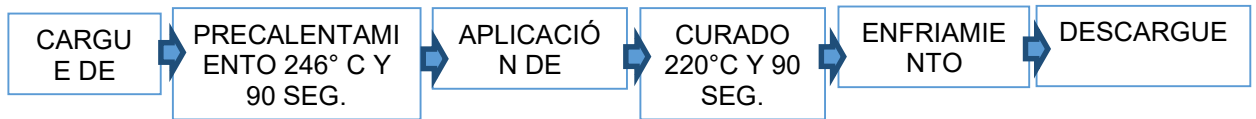


Figura 5. Proceso por radiación para recubrir MDF con pintura en polvo.

En la Tabla 1 se muestran las temperaturas y los tiempos propuestos para ambos procesos (Binder, 2004):

Tabla 1. Temperaturas y tiempos de los procesos para recubrir MDF con pintura en polvo.

		RADIACIÓN	TÉRMICO
PRECALENTAMIENTO	Tiempo del ciclo	90 segundos	15 minutos
	Temperatura Horno	220°C	190°C
	Temperatura salida	110°C	135°C
	Temperatura superficie	150°C	200°C
CURADO	Tiempo del ciclo	90 segundos	7 minutos
	Temperatura Horno	246°C	190°C
	Temperatura entrada	120°C	93°C
	Temperatura salida	93°C	148°C

5.6 Antecedentes de aplicación de pintura en polvo sobre MDF.

En el año 2002, Romer, de Wagner GmbH en Alemania, describió la primera aplicación industrial de pintura en polvo en MDF utilizando radiación U.V. Describió las etapas de precalentamiento de la pieza, posterior aplicación en caliente, horneado con una mezcla de infrarrojo y U.V. manejando una temperatura de 100°C. (Romer,

2002). Posteriormente, Binder en el 2004 propuso precalentar las piezas en un horno eléctrico IR durante menos de 2 minutos para alcanzar una temperatura de 110°C. Después de aplicar la pintura se lleva la pieza a un horno híbrido de radiación IR y U.V. donde permanece 1.5 minutos. En esta etapa la pintura se funde. Luego se le suministra radiación U.V. a la pieza para el curado. Para recubrir MDF la temperatura de la pieza debe estar alrededor de 135°C, esto se logra con un precalentamiento en un horno de convección entre 10 y 20 minutos a una temperatura de 190°C. Después de ser aplicada la pintura, la fusión y el curado se dan en un horno de convección a 190°C durante 5 a 7 minutos. Hay que recordar que la pieza de MDF no alcanza una temperatura de 190°C debido al poco tiempo de residencia de la pieza en el horno. (Binder, 2004)

En ese mismo año, Schmidt planteó que una resistencia en la superficie de 1010 Ω y 1011 Ω es suficiente para aplicar pintura en polvo. El MDF estándar tiene una resistencia de 1012 Ω , pero ésta se puede ajustar con aditivos o por precalentamiento de la pieza a recubrir permitiendo la migración de la humedad interna del MDF y lograr aumentar su conductividad eléctrica. (Schmidt, 2004).

Más recientemente, Schwarb en el 2008, planteó que el proceso de recubrimiento con pintura U.V. consta de 4 etapas: (1) Pretratamiento del MDF, (2) aplicación de la pintura, (3) fusión de la pintura, y (4) curado curado en horno U.V. Así mismo estableció que la temperatura que alcanza la pintura es de 88°C y la superficie (MDF) alcanza los 170°C en un horno IR. Luego es sometida a radiación U.V. durante 1 minuto para ser curado sin afectar el sustrato. (Schwarb, 2008).

Estos antecedentes ofrecieron los lineamientos necesarios para este trabajo, demostrando la viabilidad que existe para lograr acabados llamativos y duraderos. Sin embargo, la literatura se centra en la aplicación y curado utilizando las

condiciones de temperatura y tiempo de un horno de calentamiento infrarrojo y UV. A nivel nacional la mayoría de hornos son de calentamiento por convección, que no son muy mencionados en la literatura, por lo que este trabajo se centrará en la adaptación de esta tecnología a la consecución exitosa de paneles de MDF recubiertos con pintura en polvo electrostática mediante hornos de convección.

6. MATERIALES Y MÉTODOS.

6.1 Pintura en polvo.

La pintura en polvo electrostática fue suministrada por la empresa Recya S.A.S desde su departamento de Investigación y Desarrollo. Esta pintura está fabricada con los siguientes componentes: Resina poliéster para pintura híbrida de baja temperatura de curado; resina epóxica para catalizar con la pintura poliéster; pigmentos inorgánicos como dióxido de titanio y óxidos de hierro rojo y amarillo; aditivos de dureza y apariencia y rellenos como carbonatos de calcio. La pintura está certificada por Recya S.A.S para su utilización en piezas metálicas que serán curadas a temperaturas de alrededor de 150°C durante 15 minutos, ésta característica la hizo promisoría para su aplicación sobre MDF. El producto es de color gris oscuro, de tipo híbrido y de acabado microtexturizado simulando la apariencia de los paneles sintéticos actualmente utilizados. La ficha técnica del producto que se produce en Recya S.A.S en la marca ELECTROCOAT, se encuentra en el Anexo 1.

6.2 MDF.

Para el desarrollo de este proyecto los paneles de MDF utilizados fueron suministrados por la empresa Tablemac S.A., ubicada en el municipio de Barbosa, Antioquia, Colombia. El proceso se evaluó sobre paneles de MDF de 0.12 m de ancho, 0.25 m de largo y 0.02 m de calibre, con un porcentaje de humedad total de entre 15% y el 20%, y una densidad aproximada de 620 kg/m³, el cual es el más utilizado a nivel comercial (Arango, 2013). Para este producto en específico se realizó el diseño del proceso de aplicación.

6.3 Horno de convección.

Para las pruebas y estandarización del proceso se utilizó el horno eléctrico de convección forzada del laboratorio de control de calidad e investigación y desarrollo de la empresa Recya S.A.S. Este es de la marca SIFAP tecnologías, de 2,5 m de largo por 2,0 m de ancho y 1,8 m de altura y funciona a una temperatura máxima de 250°C. En la figura 6 se muestra una fotografía del horno utilizado:



Figura 6. Horno de convección de la empresa RECYA S.A.S.

6.4 Pistola electrostática.

Para la aplicación de la pintura en polvo en las diferentes pruebas que se llevaron a cabo, se utilizó la pistola electrostática del laboratorio de control de calidad e investigación y desarrollo de la empresa RECYA S.A.S. A continuación se presentan las características técnicas de este instrumento:

Marca	NORDSON
Modelo	Vantage
Año	2010
Presión aire	5 - 7 bares (800 - 100 psi)
Flujo aire	2 bares (30 psi)
Atomización	0.7 bares (10 psi)
Voltaje salida	33-80 kV, 0.6A
Req. Eléctrico	85-250 Vac, 50-60 Hz, 40 VA.



Figura 7. Pistola electrostática para aplicación manual de pintura en polvo.

6.5 Equipos para pruebas de calidad.

Los equipos para el control de calidad de la aplicación de la pintura sobre MDF, fueron dispuestos por el laboratorio de control de calidad de la empresa Recya S.A.S. Los equipos a utilizados fueron los siguientes:

6.5.1 Equipo de rayado o de medición de adherencia.

El kit para la prueba de adherencia, consiste en una galga con varias cuchillas en su extremo para ejecutar el rayado, una cinta estandarizada para verificar el grado de adherencia y una lupa para observar con mayor detalle los resultados de la prueba sobre el recubrimiento. El equipo, que se detalla en la Figura 8, es del modelo de corte cruzado de 6 ejes de 1.5 mm de la marca BYK. La norma que detalla el procedimiento de esta prueba es la norma técnica NTC 5252.



Figura 8. Kit para la medición de adherencia en recubrimientos. (Elaboración personal).

6.5.2 Equipo de medición de dureza.

El equipo para medir el nivel de dureza en un recubrimiento, consiste en una base con un peso ya estandarizado en la cual se coloca un lápiz con mina de dureza conocida y se procede a rayar el recubrimiento. Se verifica el nivel de rayado sobre el recubrimiento. El equipo a utilizar es del modelo Wolff-Wilborn de la marca BYK. En la Figura 9 se detalla el equipo. La norma técnica que describe el procedimiento para esta prueba es la NTC 5252.

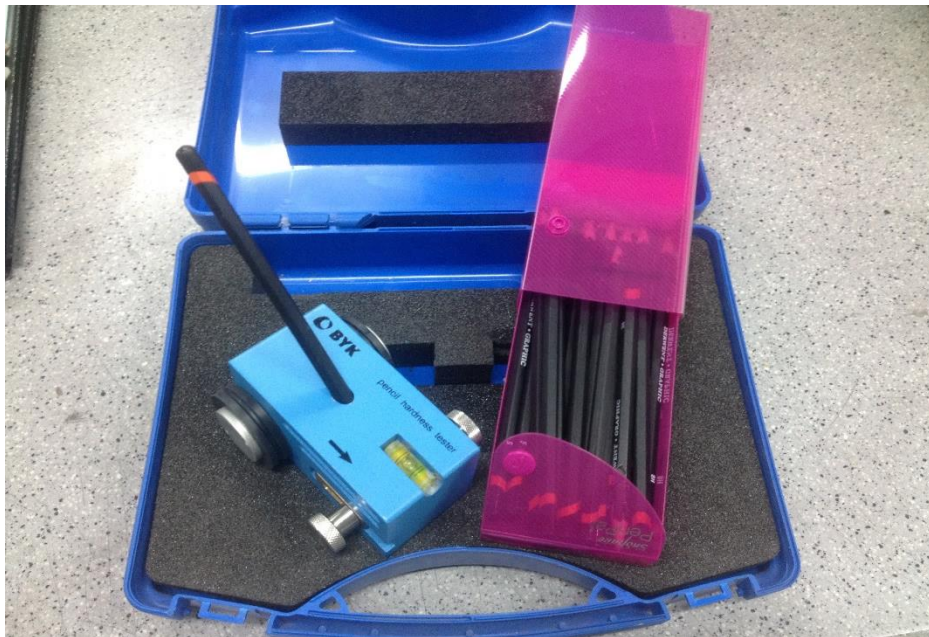


Figura 9. Equipo para la medición de dureza en recubrimientos.

6.5.3 Kit para prueba de curado.

La prueba de curado o prueba de solvente, es una prueba industrial muy eficiente para conocer el nivel de curado de un recubrimiento al finalizar el proceso. Para esta

prueba se utilizó solvente Metiletilcetona (MEK) que es el producto sugerido en la norma ASTM D-4752.

6.6 Metodología para la medición de las variables de respuesta.

Para cada una de las corridas de los diseños de experimentos desarrollados, luego de estar las piezas ya recubiertas, se les realizó las pruebas mecánicas correspondientes para la evaluación de las variables de respuesta planteadas (Adherencia, dureza y curado) como se muestra a continuación:

6.6.1 Medición de la adherencia.

Para verificar la adherencia del recubrimiento se siguió el procedimiento descrito en la norma NTC 811 utilizando el equipo descrito en los materiales (Figura 8): Para esto se realizó el corte en cuadrícula en 2 zonas distintas del panel para evaluar en una zona más amplia de la pieza. Posteriormente se adhirió la cinta durante 45 segundos sobre ambas cuadrículas para, luego de finalizado el tiempo, desprenderla con fuerza en el ángulo más cercano a 180°C sobre la superficie. Se verificó el nivel de adherencia de acuerdo al esquema presentado en la norma que se muestra en la Figura 10.

6.6.2 Medición de la dureza.

Se prosiguió a realizar la prueba de dureza utilizando el equipo descrito en los materiales (Figura 9) y siguiendo la metodología descrita en la norma NTC 5252:

Para esto se comenzó rayando la superficie en un ángulo de 45 con el lápiz de mina de mayor dureza (6H en este caso), verificando el rayado hasta el de menor dureza que no raye el recubrimiento. Se registra el nivel de dureza del lápiz que no afectó el recubrimiento.







Calificación.	Porcentaje de área retirada.	Superficie de área desde la cual ha ocurrido el desprendimiento, para 6 cortes paralelos y rango de adhesión por porcentaje
5B	0 % Ninguna	
4B	Menos 5 %	
3B	5 % a 15 %	
2B	15 % a 35 %	
1B	35 % a 65 %	
0B	Más de 65 %	

Figura 10. Esquema para verificar el porcentaje de adherencia de un recubrimiento - Basado en la norma NTC 811.

6.6.3 Medición del nivel de curado.

Para la medición del nivel de curado utilizando el solvente MEK se procedió de la siguiente manera: Se humedeció un pedazo pequeño de tela con 3 gotas del

solvente e inmediatamente se realizaron los 10 frotos en un longitud de aproximadamente 0.1 m. Luego de los 10 frotos se verificó si el brillo sobre el área tratada no tuvo una reducción mayor al 10% y el trapo no poseía rastros del color del recubrimiento. El mismo procedimiento se empleó para 20 y 30 frotos, registrando el número de frotos máximos a los cuales el producto seguía cumpliendo las especificaciones según la norma ASTM D-4752.

6.6.4 Análisis estadístico.

Todos los resultados obtenidos se procesaron en el software Statgraphics Centurion XVI®, se realizaron análisis de varianza simples ANOVA con un nivel de confianza del 95%. Los supuestos de normalidad de los residuales, igualdad de varianza se comprobaron a partir del análisis de residuales. Se utilizó la prueba de LSD con un 95% de confianza para determinar diferencias estadísticas entre los tratamiento planteados.

6.7 Metodología para el cumplimiento del objetivo #1. Determinación de la influencia de la temperatura y el tiempo de precalentamiento, el voltaje de aplicación, y la temperatura y el tiempo de curado en el proceso de recubrimiento de MDF utilizando pintura electrostática.

Con el fin de determinar los factores críticos del proceso de recubrimiento de MDF con pintura en polvo electrostática se planteó un diseño de tipo factorial fraccionado 2^{5-1} de resolución V con 2 puntos al centro, siendo 18 corridas en total. Se realizaron dos puntos al centro con el fin de validar el ensayo aumentando los grados de libertad y disminuyendo la incertidumbre del experimento al realizar 3 corridas en un punto específico.

Los factores experimentales evaluados y sus niveles fueron:

- Temperatura de precalentamiento (°C): 170 – 190.
- Tiempo de precalentamiento (minutos): 5 – 10.
- Voltaje de aplicación (kV): 60 – 80.
- Temperatura de curado (°C): 150 – 170.
- Tiempo de curado (minutos): 8 – 12.

Las corridas completas se muestran en la Tabla 2. Dichos factores y sus niveles fueron seleccionados de acuerdo al proceso de pintura en polvo electrostática para piezas metálicas, desarrollado por la empresa RECYA S.A.S. y adaptada para el recubrimiento de paneles de MDF. Como variables de respuestas se evaluaron la adherencia, el curado y la dureza por medio de los equipos mencionados anteriormente y siguiendo las normativas de las NTC referenciadas para cada prueba.

Tabla 2. Corridas experimentales objetivo específico #1.

BLOQUE	tprec	Temp prec	Vp	t cur	Temp cur
	min	°C	kV	min	°C
1	5	190	60	12	170
1	5	170	80	8	150
1	7.5	180	70	10	160
1	10	170	80	12	150
1	5	170	80	12	170
1	5	170	60	12	150
1	10	170	80	8	170
1	7.5	180	70	10	160
1	5	190	60	8	150
1	5	170	60	8	170
1	10	190	60	8	170

1	10	170	60	12	170
1	10	190	60	12	150
1	10	170	60	8	150
1	10	190	80	8	150
1	5	190	80	8	170
1	5	190	80	12	150
1	10	190	80	12	170

6.8 Metodología para el cumplimiento del objetivo #2: Determinación de las condiciones óptimas del proceso de recubrimiento de MDF a partir de los factores críticos hallados con anterioridad.

6.8.1 Acercamiento a la zona de optimización.

Luego de conocidos los factores y niveles que influyen significativamente en el recubrimiento de pintura en polvo electrostática sobre MDF, se planteó un diseño de experimentos factorial completo multinivel 3^2 con el fin de lograr un acercamiento a la zona de optimización. A partir de los resultados obtenidos en el diseño experimental anterior se evaluaron 2 factores en tres nuevos niveles: El primer factor, tiempo de curado, fue evaluado en 12, 14 y 16 minutos; mientras que el segundo denominado temperatura de curado, en 170°C, 180°C y 190°C. Los factores que no fueron significativos se fijaron en los siguientes niveles: 8 minutos para el tiempo de precalentamiento; 190°C para la temperatura de precalentamiento y el voltaje se fijó en 70kV. Estos últimos niveles se fijaron de acuerdo al criterio y la experiencia del personal de Recya S.A.S.

Las variables de respuesta evaluadas fueron: Adherencia, dureza y nivel de curado. Las corridas del diseño se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Corridas experimentales para acercamiento a la zona del óptimo.

BLOQUE	t curado	T curado	Adherencia	Dureza	Curado
	Min	°C	b	H	Frotes
1	12	190	4	5	20
1	14	180	5	6	20
1	12	180	5	6	30
1	12	170	4	5	20
1	16	190	3	4	10
1	16	170	5	6	30
1	16	180	4	5	20
1	14	190	4	5	20
1	14	170	5	6	30
2	12	170	4	5	20
2	16	180	4	4	20
2	16	170	4	6	30
2	12	190	4	4	20
2	16	190	3	4	20
2	12	180	5	6	30
2	14	180	5	6	30
2	14	170	4	6	20
2	14	190	4	4	20

6.8.2 Superficie de respuesta para encontrar el óptimo.

Luego de haber explorado con mayor detalle la región de optimización con el diseño multinivel 3^2 , se planteó un diseño de experimentos de superficie de respuesta del tipo central compuesto 2^2 + estrella; las características del diseño se establecieron

como rotatable y ortogonal con el objetivo de aumentar los grados de libertad del diseño y observar con mayor detalle los puntos externos de la zona de optimización.

Con base en el resultado anterior se evaluaron los factores tiempo de curado en los niveles 12, 13 y 14 minutos, mientras que para la temperatura de curado se establecieron los niveles de 170°C, 175°C y 180°C.

La evaluación de las variables de respuesta (adherencia, dureza y curado) se hizo con la metodología descrita en el numeral 5.6. Luego de encontrar el óptimo se hicieron 2 corridas más para corroborar que el modelo de optimización se ajusta a la realidad del proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática sobre MDF. En la Tabla 4 se muestra cada una de las corridas experimentales planteadas.

Tabla 4. Diseño de superficie de respuesta para encontrar el óptimo.

BLOQUE	t curado	T curado
	Min	°C
1	13	175
1	13	175
1	14	170
1	13	175
1	13	175
1	13	175
1	13	175
1	12	180
1	12	170
1	11.6	175
1	14	180
1	14.4	175
1	13	167.9
1	13	175
1	13	182.1
1	13	175

6.9 Metodología para el cumplimiento del objetivo #3. Determinación de la rentabilidad del proceso a nivel de planta de producción.

Para la evaluación económica del proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática a nivel de planta de producción, se definió un horizonte de 10 años para la evaluación del proyecto ya que se estima que después de este tiempo los equipos empleados en el proceso serán obsoletos. Se tuvo en cuenta una tasa interna de oportunidad de 15% efectivo anual que corresponde al doble de lo ofrecido en promedio por diferentes entidades financieras de fondos de inversión como Protección, Old Mutual y Bancolombia. El análisis económico se realizó para un calibre de MDF de 2 cm, debido a que es el calibre más utilizado en el mercado (Arango, 2013).

La capacidad anual de la planta de producción de MDF de la empresa TABLEMAC es de en 132.000 m³ (MyM, 2011). Debido a que la evaluación del proceso se realiza para un calibre fijo, se decidió tomar como base de cálculo el recubrimiento de 1 m² de MDF. Para estimar la capacidad requerida de la planta de aplicación, se estimó que la captura de la demanda inicial será del 1% de la producción de MDF por parte de TABLEMAC, considerando que es una alternativa nueva en el país. Se proyectó que cada 3 años la demanda incrementará en 1% con respecto a la capacidad de producción TABLEMAC.

Para éste análisis se utilizaron dos hornos de convección. Un horno será utilizado para la etapa de precalentamiento y el otro será utilizado en la etapa de curado. Ambos hornos tendrán las mismas dimensiones y especificaciones aunque serán operados a condiciones diferentes. Para la aplicación de la pintura se dispuso de una cabina de aplicación con 4 pistolas, lo que permitirá la aplicación simultánea de

la pintura a dos tablones por ambos lados. Para mover el MDF durante el proceso se utilizará un sistema automático de transporte con velocidad variable. El valor estimado de los anteriores equipos así como el de las mejoras locativas y las instalaciones eléctricas e hidráulicas se determinó según cotizaciones de fabricantes locales.

Para el manejo del proceso se calculó el requerimiento de 6 operarios, de los cuales 2 estarán encargados de la aplicación de la pintura, y 1 de ellos serán encargados del cargue y descargue de material en un turno de 8 horas. La planta de aplicación trabajará 16 horas diarias 6 días a la semana. Como líder del proceso se requiere un jefe de producción, encargado de administrar, gestionar, y garantizar que se cumpla con la producción diaria. Para la promoción y comercialización se requieren 4 asesores comerciales. Finalmente se debe tener un gerente general que se encargará de administrar el negocio. El valor de la mano de obra fue calculado según el salario mínimo mensual vigente y el mercado laboral colombiano.

El costo total del producto terminado tiene como principales componentes el costo por m² de MDF y el costo de recubrir un m² de MDF con pintura en polvo. El costo de m² de MDF utilizado en el estudio se tomó directamente del precio de venta al público de un tablón entero de MDF sin recubrir, en el calibre con el cual se realizó el diseño de experimentos. El costo de la pintura fue calculado según la ficha técnica del producto y el consumo promedio de pintura por m² de MDF, según los resultados obtenidos en este trabajo de investigación. Para el análisis económico se tomaron estos dos costos como costos variables ya que su costo total anual depende de la cantidad de m² recubiertos mediante el proceso.

Otros costos inherentes al proceso son el consumo energético y el canon mensual del arrendamiento de la bodega. El consumo energético del horno se calculó en base a datos suministrados por la empresa SIFAP la cual es productora de hornos. El canon de arrendamiento mensual se calculó en base al promedio por m² en el sector de Barbosa donde se espera instalar la planta de producción.

Debido al considerable costo de la inversión inicial en el proyecto, se realizó el estudio partiendo de un préstamo bancario que deberá ser pagado en cuotas anuales y constantes durante el periodo de evaluación del proyecto a una tasa de interés del 13% E.A. Para realizar la evaluación económica del proyecto se tuvo en cuenta el impuesto a la renta (25%) y el impuesto sobre la renta para la equidad (CREE) (8%). El análisis se realiza despreciando la inflación.

El valor presente neto (VPN) fue calculado llevando a valor presente todos los valores del flujo de caja con la tasa interna de oportunidad (TIO), la tasa interna de retorno es la rentabilidad del proyecto y se determina como la tasa que hace el VPN cero. El beneficio anual equivalente (BAUE) es el resultado de calcular la anualidad del VPN en el horizonte del proyecto y La relación costo beneficio es el resultado de dividir el VPN de los ingresos sobre el VPN de los egresos.

7. RESULTADOS.

7.1 Factores críticos del proceso de recubrimiento de MDF utilizando pintura en polvo electrostática.

Para determinar la influencia de los factores críticos del proceso de aplicación de pintura en polvo sobre MDF se hizo uso de un diseño experimental del tipo factorial fraccionado 2^{5-1} con 2 puntos al centro, esto con el fin de verificar la estabilidad del proceso de aplicación de pintura en polvo y establecer el error inherente a la evaluación de dos corridas en el mismo punto de experimentación (Montgomery, 2008). Los factores evaluados fueron: temperatura de precalentamiento (170°C – 190°C), tiempo de precalentamiento (5 – 10 minutos), voltaje de aplicación (60kV – 80kV), temperatura de curado (150 - 170 °C) y tiempo de curado (8 min – 12 min). Las variables de respuestas utilizadas fueron adherencia calculada como el porcentaje de desprendimiento de la pintura en la zona de la cuadrícula como se describe en el numeral 6.6.1, curado calculado como el número máximo de frotos sin desprender pintura (numeral 6.6.3) y la dureza calculada como la mina más dura que no raye ni perfore el recubrimiento, en una escala de 1H a 6H siendo esta última la más dura (numeral 6.6.2). Los análisis estadísticos para cada una de las variables de respuesta se muestran a continuación:

7.1.1 Adherencia.

En la Figura 11 se muestra el diagrama de Pareto para la variable de respuesta de adherencia. En dicha Figura se observa que el único factor que afecta significativamente la adherencia es la temperatura de curado (Valor P = 0.0256). De esta manera se espera que un aumento en la temperatura de curado, aumente la

adherencia de la pintura a la superficie. Ni las interacciones dobles ni los demás factores evaluados afectaron significativamente la adherencia.

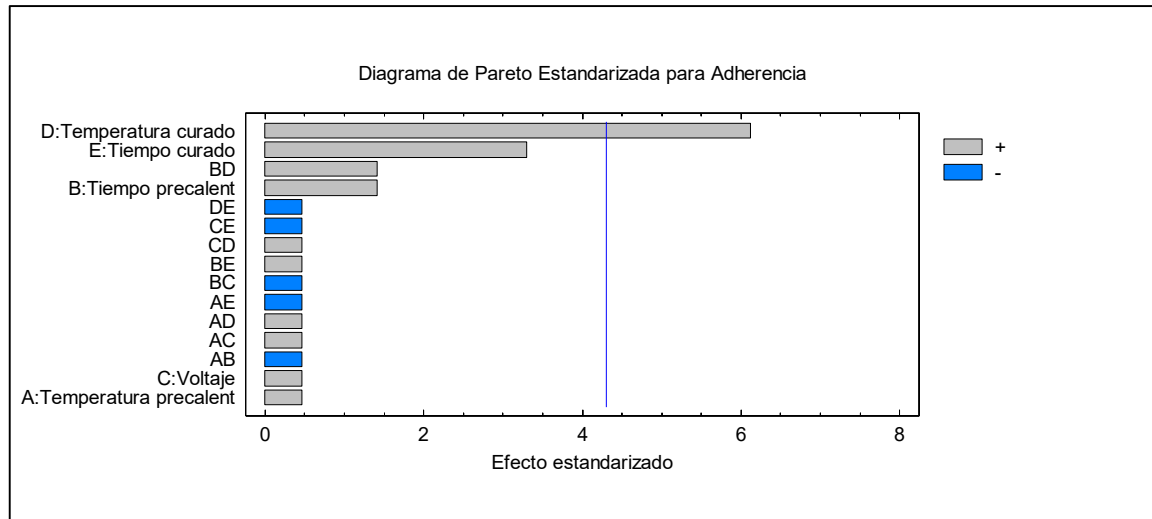


Figura 11. Diagrama de Pareto para la adherencia – Diseño factorial fraccionado.

En la Tabla 5, se presenta la tabla ANOVA, en ella se observa que el valor $R^2 = 96,4848 \%$ y un R^2 ajustado = $70,1172 \%$. Esto quiere decir que la variable independiente de la adherencia es explicada en un $96,5\%$ por las variaciones en los factores dependientes evaluados (temperatura y tiempo de curado, tiempo y temperatura de precalentamiento y voltaje de la pistola). En cuanto al R^2 ajustado el modelo es capaz de explicar en un $70,12\%$ los errores encontrados en la experimentación, debido a que este diseño experimental contiene muy pocas corridas, estos valores son significativamente importantes por lo que el modelo predice la adherencia y explica la variación como función de la temperatura y el tiempo de curado de manera adecuada (De La Vara Salazar & Gutierrez Pulido, 2008).

Tabla 5. ANOVA para la adherencia – Diseño factorial fraccionado.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura precalent	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
B: Tiempo precalent	0,5625	1	0,5625	2,00	0,2929
C: Voltaje	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
D: Temperatura curado	10,5625	1	10,5625	37,56	0,0256
E: Tiempo curado	3,0625	1	3,0625	10,89	0,0809
AB	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
AC	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
AD	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
AE	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
BC	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
BD	0,5625	1	0,5625	2,00	0,2929
BE	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
CD	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
CE	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
DE	0,0625	1	0,0625	0,22	0,6838
Error total	0,5625	2	0,28125		
Total (corr.)	16,0	17			

R-cuadrada = 96,4844 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 70,1172 por ciento
Error estándar del est. = 0,53033
Error absoluto medio = 0,0740741
Estadístico Durbin-Watson = 2,02778 (P=0,1360)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,0146605

7.1.2 Dureza.

En la Figura 12 se muestra el diagrama de Pareto correspondiente a la dureza. En este caso ninguna de las interacciones dobles entre los factores tuvo efecto significativo sobre la variable de respuesta. De los factores principales únicamente la temperatura de curado (Valor P = 0.0048) y el tiempo de curado (Valor P = 0.0167) mostraron efectos significativos, de esta manera entre mayor sea la temperatura y el tiempo de curado, se espera una mayor dureza del recubrimiento (Figura 14). Según el análisis ANOVA (Tabla 6) ni el voltaje de la pistola (Valor P = 0.4855), ni la temperatura de precalentamiento (Valor P = 0.4855), ni el tiempo de precalentamiento (Valor P = 0.0513) fueron factores significativos en la dureza.

De igual manera, este diseño experimental presentó un ajuste con un R^2 de 99.3712 % osea que la variación en la dureza es explicada en un 99,37% por los valores evaluados de temperatura y tiempo de curado; y un R^2 ajustado de 94.6554 %, osea que el modelo es capaz de explicar en un 94,7% las variaciones realizadas o los errores, esto con un intervalo de confianza del 95%.

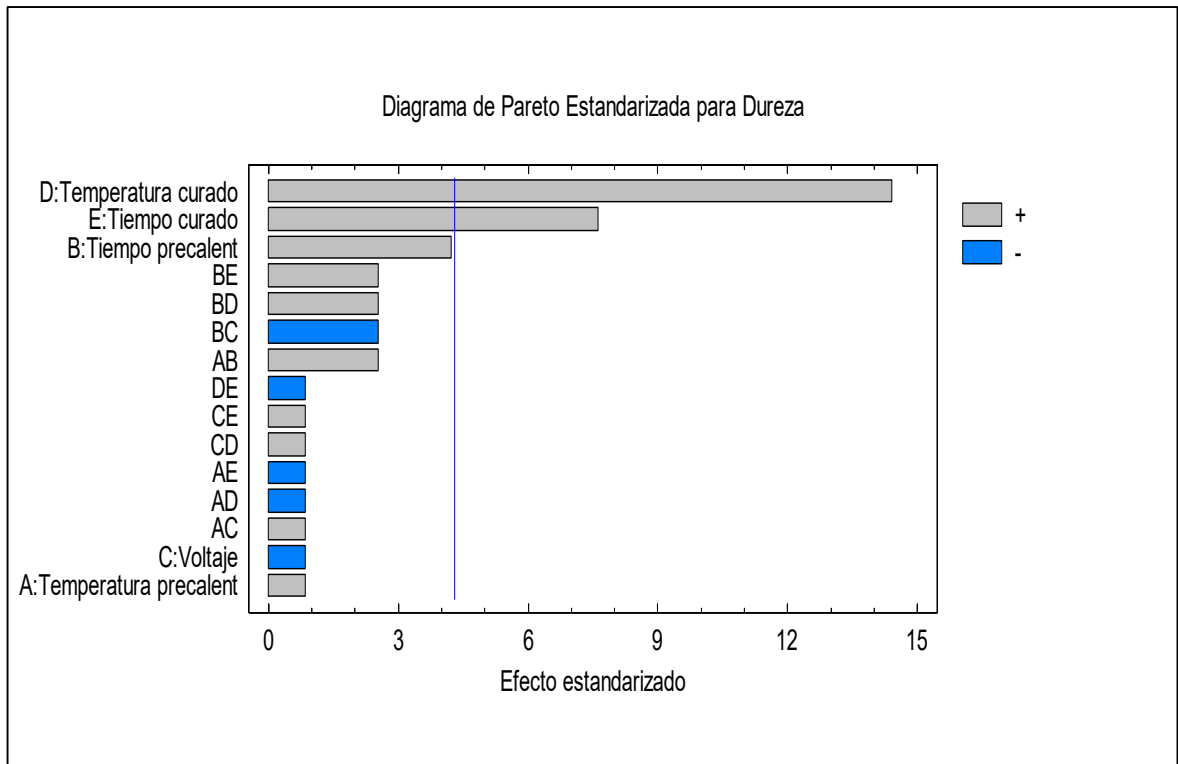


Figura 12. Diagrama de Pareto para la dureza – Diseño factorial fraccionado.

Tabla 6 . ANOVA para la dureza – Diseño factorial fraccionado.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Temperatura precalent	0,0625	1	0,0625	0,72	0,4855
B:Tiempo precalent	1,5625	1	1,5625	18,00	0,0513
C:Voltaje	0,0625	1	0,0625	0,72	0,4855
D:Temperatura curado	18,0625	1	18,0625	208,08	0,0048
E:Tiempo curado	5,0625	1	5,0625	58,32	0,0167
AB	0,5625	1	0,5625	6,48	0,1258
AC	0,0625	1	0,0625	0,72	0,4855
AD	0,0625	1	0,0625	0,72	0,4855
AE	0,0625	1	0,0625	0,72	0,4855
BC	0,5625	1	0,5625	6,48	0,1258
BD	0,5625	1	0,5625	6,48	0,1258
BE	0,5625	1	0,5625	6,48	0,1258
CD	0,0625	1	0,0625	0,72	0,4855
CE	0,0625	1	0,0625	0,72	0,4855
DE	0,0625	1	0,0625	0,72	0,4855
Error total	0,173611	2	0,0868056		
Total (corr.)	27,6111	17			

R-cuadrada = 99,3712 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94,6554 por ciento
Error estándar del est. = 0,294628
Error absoluto medio = 0,0617284
Estadístico Durbin-Watson = 2,25 (P=0,9215)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,131944

7.1.3 Curado.

Tanto el Pareto (Figura 13) como el análisis de varianza ANOVA (Tabla 7) no mostraron efectos significativos de las interacciones entre los factores principales (Temperatura de precalentamiento, tiempo de precalentamiento, voltaje, temperatura de curado y tiempo de curado) sobre el curado medido como el número máximo de frotos en los que no se desprendía el recubrimiento. Al igual que para la dureza ni el voltaje, ni el tiempo de precalentamiento, ni la temperatura de precalentamiento mostraron efectos significativos sobre la variable de respuesta. En contraste la temperatura de curado con un valor P = 0.0007 y el tiempo de curado

con un valor $P = 0.0011$ fueron los únicos factores que influyeron significativamente en el nivel de curado del recubrimiento. En dicha Figura se observa que al aumentar la temperatura y el tiempo de curado se maximiza la variable de respuesta curado.

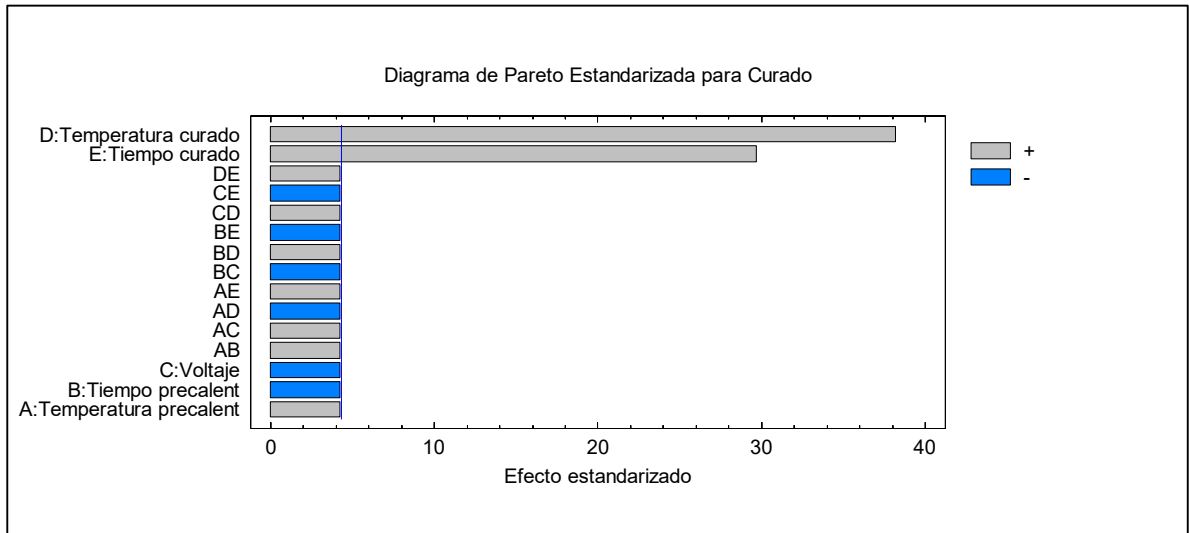


Figura 13. Diagrama de Pareto para el curado – Diseño factorial fraccionado.

Tabla 7. ANOVA para el curado – Diseño factorial fraccionado.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura precalent	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
B:Tiempo precalent	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
C:Voltaje	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
D:Temperatura curado	506,25	1	506,25	1458,00	0,0007
E:Tiempo curado	306,25	1	306,25	882,00	0,0011
AB	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
AC	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
AD	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
AE	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
BC	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
BD	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
BE	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
CD	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
CE	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
DE	6,25	1	6,25	18,00	0,0513
Error total	0,694444	2	0,347222		
Total (corr.)	894,444	17			

R-cuadrada = **99,9224** por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = **99,3401** por ciento
Error estándar del est. = **0,589256**
Error absoluto medio = **0,123457**
Estadístico Durbin-Watson = 2,25 (P=0,9215)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,131944

A modo de conclusión, los resultados obtenidos muestran que los factores más críticos del proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática son únicamente el tiempo de curado y la temperatura de curado, los cuales, al aumentar su valor maximizan todas las variables de respuesta evaluadas (adherencia, dureza y curado).

En la Figura 14, se muestra el efecto de los factores principales para las 3 variables de respuesta (Gráfica A para dureza, Gráfica B para curado y Gráfica C para adherencia). En dicha Figura se evidencia que para los dos factores críticos determinados, su efecto sobre las 3 variables de respuesta se maximiza con el aumento de su valor, por lo cual se decidió aumentar el valor de los niveles de dichos factores partiendo de los máximos valores evaluados en este experimento (Temperatura curado = 170°C, tiempo de curado = 12 minutos). Los factores que no fueron significativos en el proceso, se fijaron para las siguientes corridas de la siguiente manera: el máximo valor (190°C) para la temperatura de precalentamiento, 70 kV para el voltaje en la pistola de aplicación y 8 minutos para el tiempo de precalentamiento.

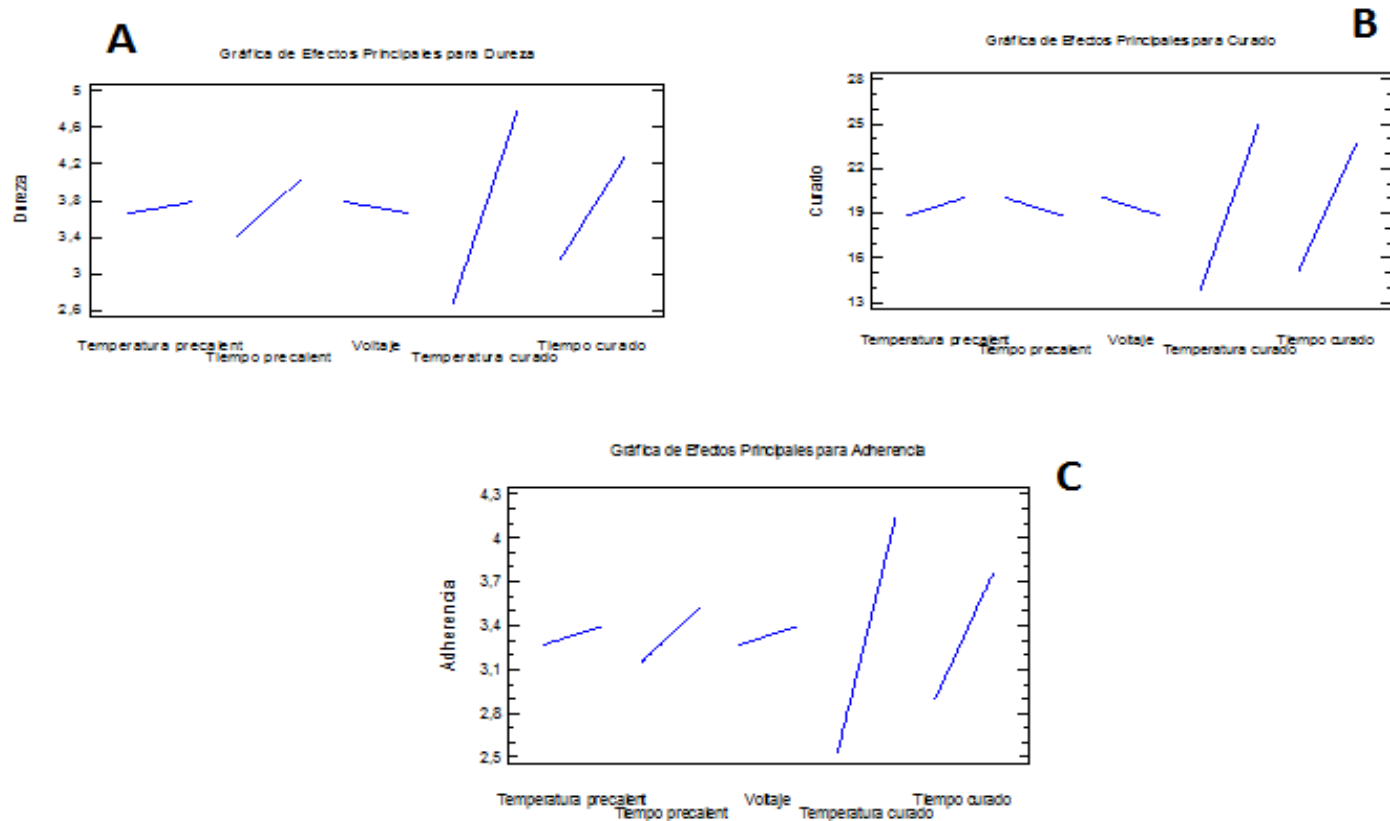


Figura 14. Gráficas de efectos de los factores principales sobre las 3 variables de respuesta evaluadas – Factorial fraccionado.

7.2 Optimización de los factores críticos en el proceso de recubrimiento de MDF con pintura en polvo electrostática.

7.2.1 Acercamiento a la zona de optimización.

Para determinar los niveles de los factores críticos que maximicen la adherencia, la dureza y el curado, se empleó un diseño factorial completo multinivel 3^2 replicado por una vez. Para este diseño se dejaron fijos los factores no significativos del

proceso de aplicación de pintura en polvo sobre MDF (Temperatura de precalentamiento = 190°C, tiempo de precalentamiento = 8 minutos y voltaje = 70kV) y los factores significativos temperatura de curado y tiempo de curado se fijaron en los niveles iniciales 170°C y 12 minutos respectivamente.

El diseño constó de 18 corridas experimentales por dos réplicas en los cuáles el factor temperatura de curado se varió en 170°C, 180°C y 190°C mientras que el tiempo de curado varió en 12, 14 y 16 minutos. Se utilizaron tres niveles por factor con el fin de poder observar presencia de curvatura en los niveles evaluados.

Como se muestra en la Figura 15, para la adherencia (Pareto A) tanto las interacciones entre los factores principales así como los factores principales tienen efectos significativos sobre esta variable de respuesta. En este caso, como se evidencia en la Figura 16, el mejor efecto observado para la adherencia se encontró cuando el tiempo de curado fue cercano a 14.49 minutos y la temperatura de curado fue cercana a 170°C.

Por su parte para las variables de respuesta de dureza y curado, el único factor que tuvo efectos significativos sobre estas fue la temperatura de curado con un valor $P = 0.0013$ para la dureza y un valor $P = 0.0351$ para el curado. En la Figura 15 (Paretos B y C) se observa que tanto para la dureza como para el curado un aumento en el tiempo de curado disminuye el comportamiento de las variables de respuesta.

Para verificar el ajuste de los datos al modelo, la adherencia arrojó un valor $R^2 = 83,0079\%$ y un R^2 ajustado = 75,9277 %, la dureza $R^2 = 74,3333\%$ y un R^2 ajustado = 63,6389 % y el curado $R^2 = 54,203\%$ y un R^2 ajustado = 35,8292 %. Para la

dureza y la adherencia, sus modelos se explica en alto grado por los datos obtenidos por lo que la replicabilidad de estos datos usando este modelo es altamente confiable. Para el curado, los datos obtenidos no se relacionan altamente con el modelo, se presenta mucha variabilidad en los mismos.

Para verificar la validez del análisis ANOVA se confirmó el cumplimiento de los supuestos de independencia de los residuales (método gráfico), normalidad de los residuales (método gráfico y test de Shapiro Wilks) e igualdad de varianza (método gráfico) para cada una de los factores y variables de respuesta evaluados según se muestra en el Anexo 2.

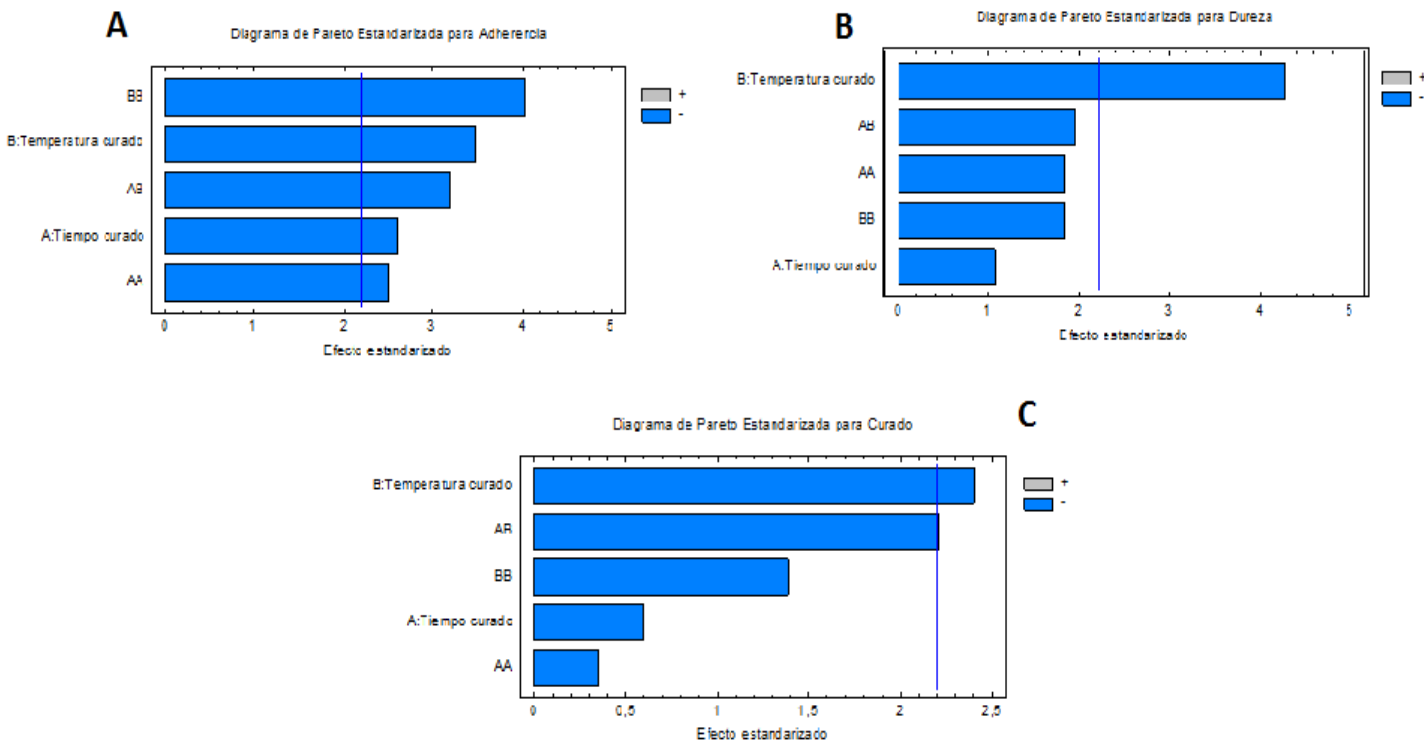


Figura 15. Diagramas de Pareto para las variables de respuesta – Diseño factorial multinivel.

Adicionalmente se evaluó la interacción de los factores en la adherencia, tal cual se muestra en la Figura 16. La interacción de los factores aquí fue significativa porque, como se muestra claramente en la Figura 15, a 12 minutos es indiferente si se utiliza a 170°C o a 190°C, sin embargo es preferible a mantenerse en 170°C al aumentar el tiempo porque se sigue maximizando la adherencia hasta alrededor de los 14.5 minutos, mientras que manejando la temperatura de curado a 190°C, el aumento del tiempo de curado disminuye notoriamente el desempeño del recubrimiento frente a la adherencia.

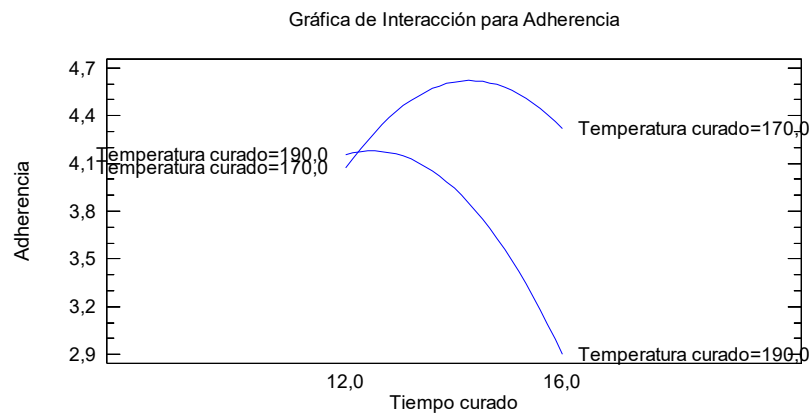


Figura 16. Gráfica de interacción para adherencia – Factorial Multinivel.

En este experimento, luego de la comprobación de los supuestos y la significancia de los factores, se evaluaron las gráficas de contornos obtenidas para cada una de las variables. El objetivo de evaluar estas gráficas es observar en que parte de la zona experimental es posible encontrar el valor óptimo para cada variable de respuesta y con ello delimitar aún más el área experimental para el diseño de superficie de respuesta. Las gráficas de superficie de respuesta contorneadas para éste diseño multifactorial se muestran en la Figura 17 (A para adherencia, B para dureza y C para curado). La optimización de la deseabilidad para las tres variables

de respuesta arrojaron una aproximación al óptimo. Estos valores aproximados se muestran en la Tabla 8:

Tabla 8. Rangos de ubicación del posible óptimo para cada variable de respuesta.

Variable	Temperatura curado (°C)	Tiempo curado (min)	R ²	R ² ajustado
Adherencia	175 – 180	13 - 14	83.0078	75.9277
Dureza	174 – 178	13 - 14.5	74.3333	63.6389
Curado	170 – 175	15 – 16	54.703	35,8292

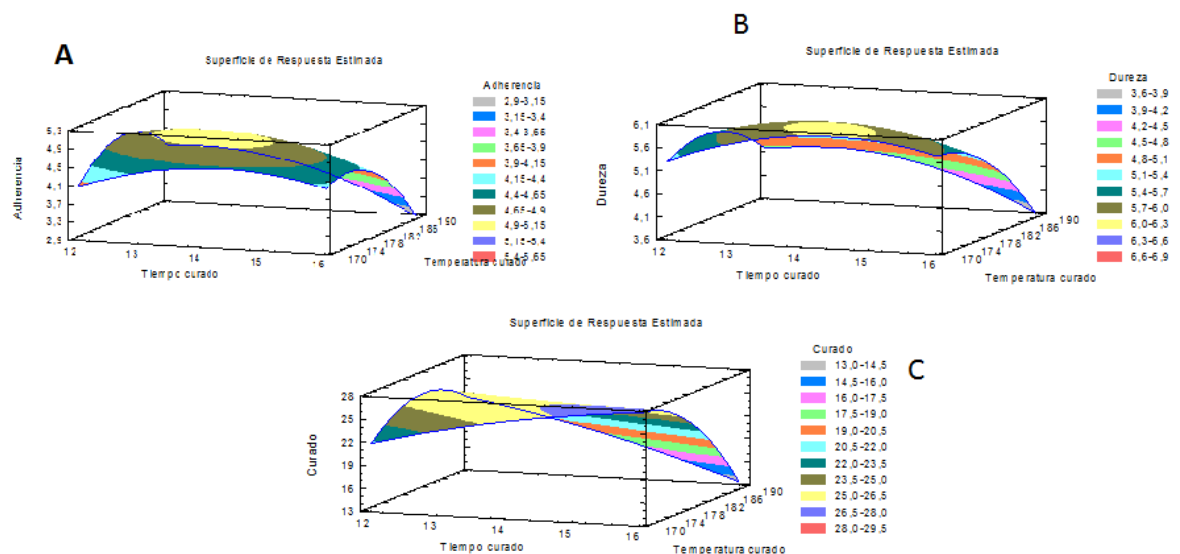


Figura 17. Superficie de respuesta para las variables de respuesta adherencia, dureza y curado.

La Tabla 8 evidencia que la adherencia es la variable de respuesta cuyos datos se ajustan mejor al modelo lo que representa una influencia menor del error en dichos resultados. Por su parte, el curado fue la variable que más influencia tuvo del error, por lo que los datos no se ajustan muy bien al modelo predicho.

7.2.2 Optimización del proceso de recubrimiento de MDF con pintura en polvo electrostática.

Para la optimización del proceso de recubrimiento de MDF con pintura en polvo electrostática se planteó un diseño de experimentos de superficie de respuesta del tipo central compuesto 2^2 + estrella, rotatable y ortogonal con el fin de aumentar los grados de libertad del error del experimento y disminuir la incertidumbre de los resultados obtenidos. Los niveles evaluados de los dos factores críticos fueron: tiempo de curado en los niveles 12, 13 y 14 minutos, mientras que para la temperatura se establecieron en 170°C, 175°C y 180°C, de acuerdo a los resultados obtenidos en el numeral anterior (Tabla 8). El diseño constó de 16 corridas.

A partir del análisis de varianza ANOVA, se encontró que la temperatura de curado fue el único factor que afectó significativamente a todas las variables de respuesta para los niveles evaluados de cada factor (Ver Anexo 3). La gráfica de la influencia de los efectos principales se muestra en el Anexo 4. Con el fin de hallar el óptimo utilizando el modelo calculado para cada variable de respuesta se utilizó la metodología del camino de máximo ascenso para cada uno de los factores. Esta metodología permitió observar cambios de las variables de respuestas al realizar pequeños en los factores evaluados utilizando para ello el modelo calculado por el diseño experimental. De esta manera se determinó un punto que en el cuál se maximizó la adherencia, la dureza y el curado. Los valores óptimos obtenidos para cada variable de respuesta se muestran en la Tabla 9. El camino de máximo ascenso para cada una de las variables de respuesta se encuentra en el Anexo 5.

Tabla 9. Valores óptimos para cada variable de respuesta por cada factor mediante camino de máximo ascenso.

Variable	Temperatura curado (°C)	Valor Óptimo
Adherencia	175	5,00039
Dureza	175	6,00077
Curado	178	31,6325

Variable	Tiempo curado (min)	Valor Óptimo
Adherencia	13	5,00039
Dureza	12,7	6,04157
Curado	10,9	31,6325

Las Figuras 18, 19 y 20 muestran las gráficas de contorno que evidencian gráficamente los resultados obtenidos por el camino de máximo ascenso.

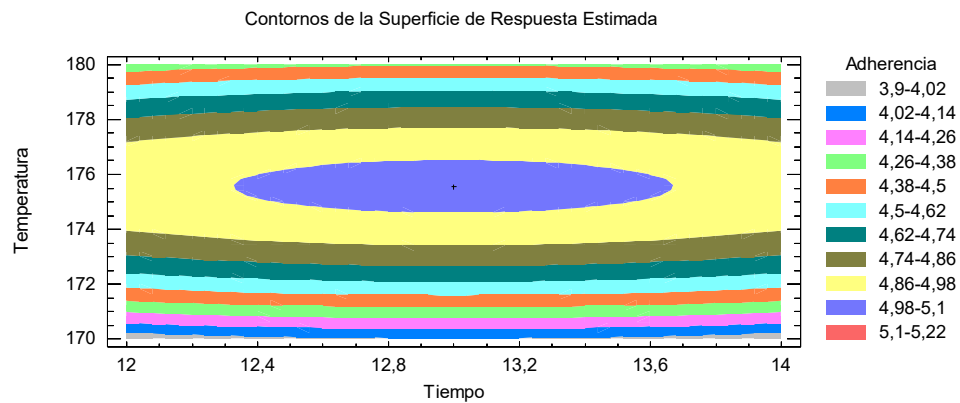


Figura 18. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para adherencia – Diseño de superficie de respuesta.

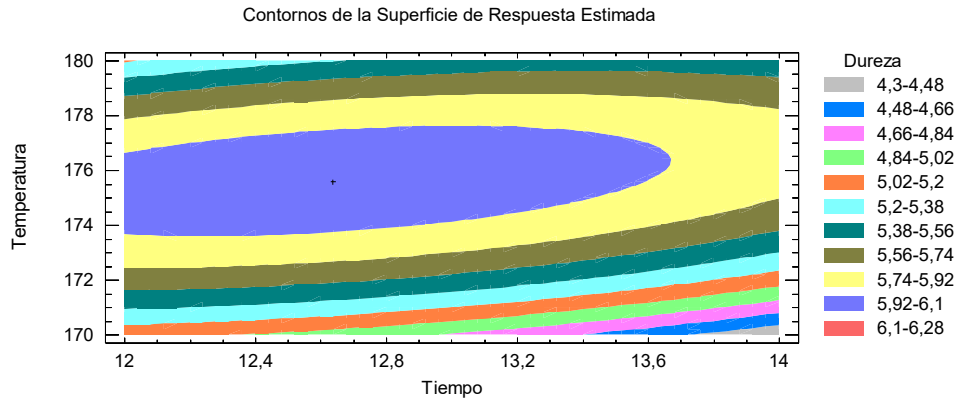


Figura 19. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para dureza – Diseño de superficie de respuesta.

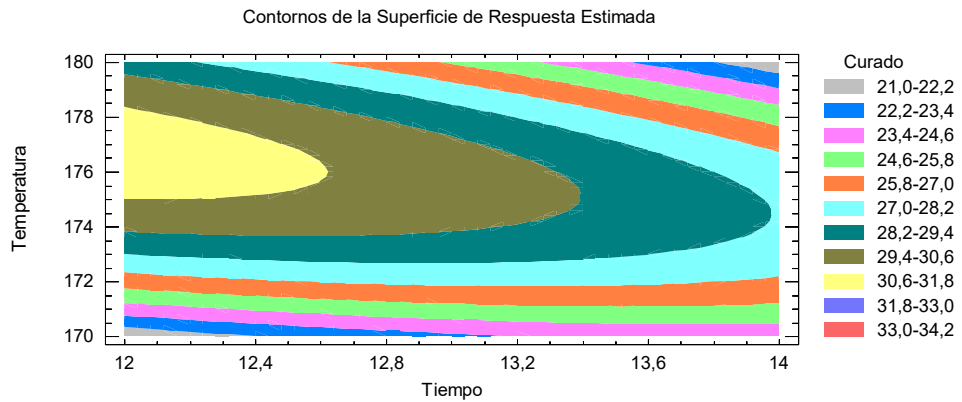


Figura 20. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para el curado – Diseño de superficie de respuesta.

Luego de obtener estos valores se realizó la optimización de múltiples respuestas para corroborar el óptimo de todo el proceso a partir de los resultados obtenidos por las superficies de respuesta.

Según la experiencia del grupo de trabajo de la empresa RECYA S.A.S se le dio un peso de 3 a la adherencia ya que se considera que un valor alto en esta variable prevé buen rendimiento; el impacto para la dureza se fijó en 2 y para el curado en 1. Estos resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Peso de las variables de respuesta para la optimización por superficie de respuesta.

	<i>Deseabilidad</i>	<i>Deseabilidad</i>		<i>Pesos</i>	<i>Pesos</i>	
<i>Respuesta</i>	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>	<i>Meta</i>	<i>Primero</i>	<i>Segundo</i>	<i>Impacto</i>
Adherencia	3,0	5,0	Maximizar	3,0		3,0
Dureza	4,0	6,0	Maximizar	2,0		3,0
Curado	20,0	30,0	Maximizar	1,0		3,0

El óptimo arrojado por el diseño de superficie de respuesta fue el siguiente:

Tabla 11. Valores óptimos para los factores críticos.

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Tiempo	11,6	14,4	13,0
Temperatura	167,9	182,1	175,0

Tabla 12. Valores óptimos para las variables de respuesta.

<i>Respuesta</i>	<i>Óptimo</i>
Adherencia	5,00039
Dureza	6,00077
Curado	30,0039

La Figura 21 corresponde a la superficie de respuesta obtenida para el óptimo del proceso, donde se puede verificar la región donde el óptimo se encontró.

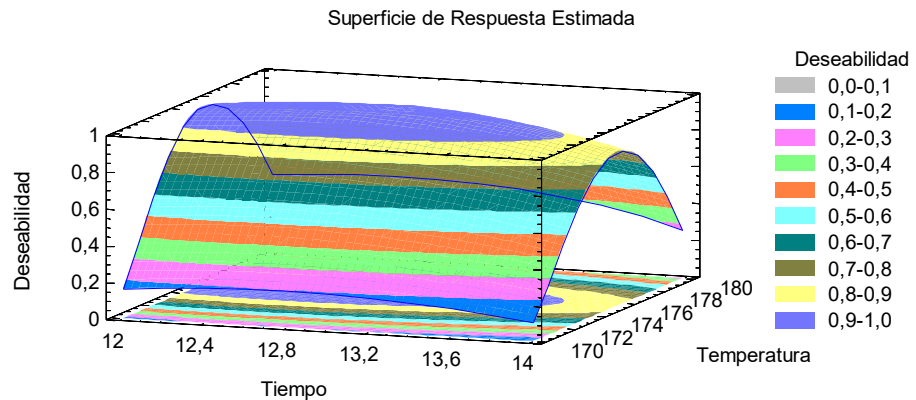


Figura 21. Superficie de respuesta estimada para el óptimo encontrado.

Para corroborar el óptimo encontrado (Tablas 11 y 12), se realizaron dos corridas más con las condiciones óptimas obtenidas (Tiempo de curado 13 minutos y temperatura de curado 175°C). Los resultados, que corroboran el óptimo, se muestran en la Tabla 13:

Tabla 13. Resultados corridas experimentales en el punto óptimo encontrado.

Variable	Corrida 1	Corrida 2
	Valor obtenido	Valor obtenido
Adherencia	5a	5a
Dureza	6H	6H
Curado	30 frotos	30 frotos

7.2.3 Evidencia fotográfica del resultado de la optimización.

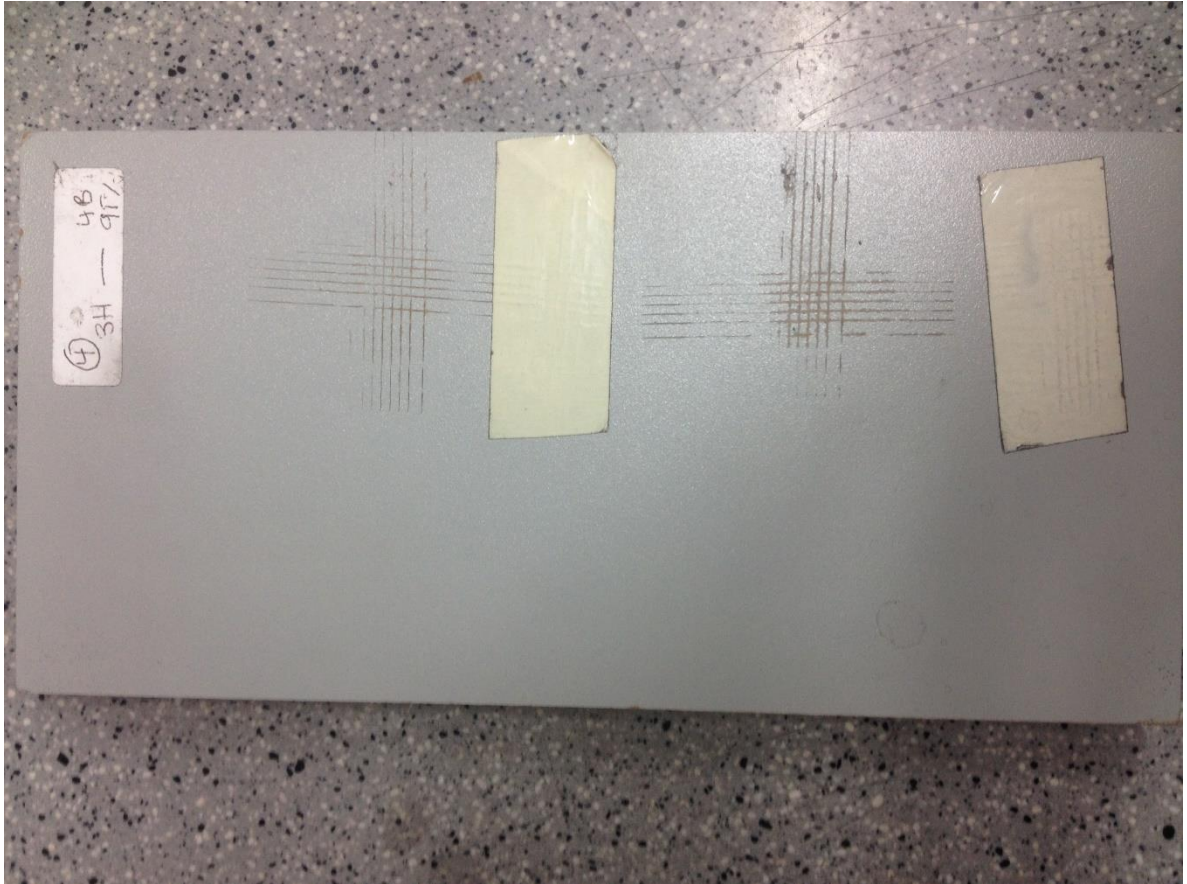


Figura 22. Resultados de adherencia - Ensayos previos.

En la Figura 22 se observan los resultados de la prueba de adherencia en pruebas preliminares al desarrollo del proyecto. Como se observa claramente, y refiriéndose al esquema de adherencia (Figura 10), se obtuvo un resultado de 3a que se considera malo para esta aplicación. La Figura 23 evidencia los resultados sobre un tablón recubierto en el diseño factorial fraccionado, el cual mejora con respecto a los ensayos previos, pero que es inferior al rendimiento obtenido en el óptimo mostrado en la Figura 24 donde se obtuvieron los resultados máximos esperados. Las Figuras referenciadas aclaran sobre el hecho de los distintos colores que se pueden usar para esta aplicación.



Figura 23. Resultados pruebas de variables de respuesta - Diseño factorial fraccionado.

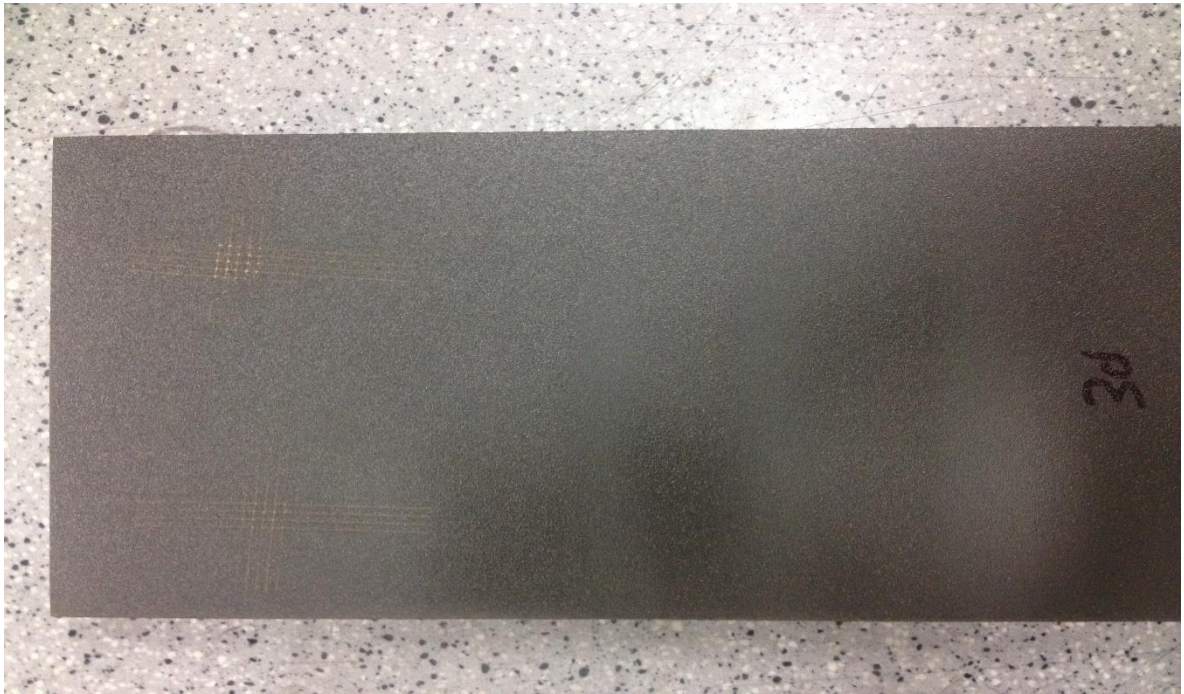


Figura 24. Resultados pruebas de variables de respuesta - Luego de optimización.

7.3 Diseño conceptual del proceso de aplicación de pintura en polvo electrostática sobre MDF.

7.3.1 Ubicación.

La planta de aplicación de pintura en polvo sobre MDF será ubicada en el municipio de Barbosa cerca de la planta de MDF de la empresa TABLEMAC que se encuentra en el mismo municipio. Por ser una ubicación cercana se reducen los costos de transporte de la materia prima y por lo tanto se puede lograr una mejor negociación y aumentar el margen del producto terminado. Además este municipio cuenta con mayor espacio disponible y mayor oferta de bodegas con las características requeridas para el desarrollo del proceso.

7.3.2 Equipos requeridos.

- **Horno de precalentamiento:** Horno de convección con 2 quemadores de gas ubicados en la parte de abajo equidistantes a lo largo del horno sobre ambas paredes, con capacidad para 2 tableros simultáneos de MDF. Cada tablero tiene 2,44 m de alto y 2,14 m de ancho, por lo tanto, las dimensiones del horno deberán ser: 5 m de largo, 3 m de alto, y 1.5 m de ancho. Este horno tendrá una temperatura de precalentamiento de 190°C y los tableros permanecerán 8 min por lote.
- **Cabina de aplicación:** La cabina de aplicación tendrá capacidad para recubrir 2 tableros simultáneos por ambos lados. La cabina tendrá 4 pistolas operadas por 4 operarios que se encargarán de recubrir el MDF simultáneamente y por ambos lados. Teniendo en cuenta las dimensiones del tablero de MDF, las dimensiones de la cabina serán: 5 m de largo, 3 m de alto, y 1.5 m de ancho. La cabina de pintura contará con el sistema de recuperación adecuado que permita una alta recuperación del producto y disminuya el desperdicio del mismo. Se utilizarán pistolas manuales marca NORDSON® que operan a 70 kV.
- **Horno de curado:** Horno de convección con 2 quemadores de gas ubicados en la parte de abajo equidistantes a lo largo del horno sobre ambas paredes, con capacidad para 2 tableros simultáneos de MDF las dimensiones del horno deberán ser: 5 m de largo, 3 m de alto, y 1.5 m de ancho según las medidas de los tableros de MDF. Este horno tendrá una temperatura de curado de 175°C y los tableros permanecerán 13 min por lote.

- **Sistema de transporte automático:** Los tableros de MDF a recubrir serán cargados a un sistema automático de transporte con velocidad variable, que será programado para que los tableros hagan un recorrido completo a lo largo de la línea de producción. La programación se realizará teniendo en cuenta los tiempos definidos para cada etapa del proceso.

7.3.3 Block flow diagram (BFD).

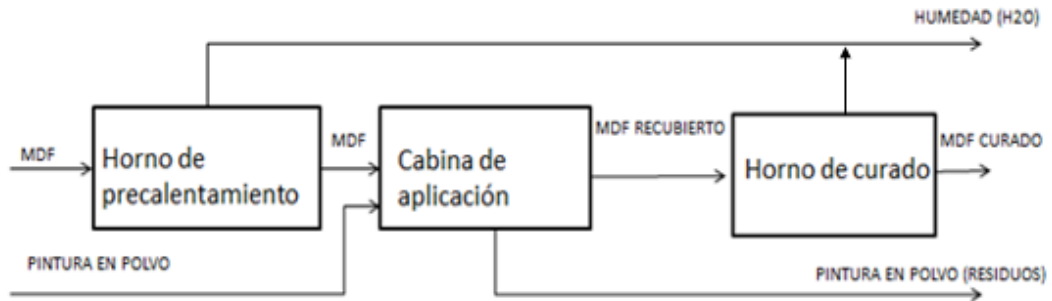


Figura 25. BFD del proceso de aplicación de pintura en polvo sobre MDF. (Elaboración personal).

7.3.4 Balance de material.

- **Horno de precalentamiento:**

Entrada: MDF (8462 Kg/día)

Salida: MDF (7954 kg/día)+ H2O (508 kg/día)

- **Cabina de aplicación:**

Entrada: Pintura en Polvo (124 Kg/día) + MDF (7954 Kg/día)

Salida: MDF recubierto (8075 Kg/día) + Pintura (residuos) (3 kg/día)

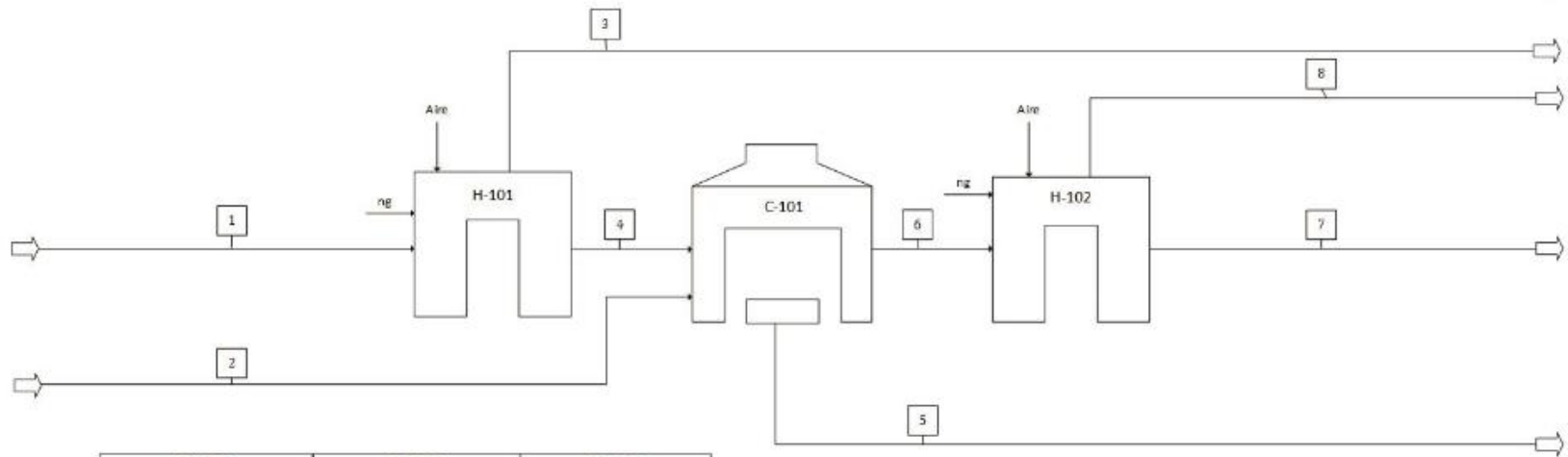
- **Horno de curado:**

Entrada: MDF recubierto (8075 Kg/día)

Salida: MDF curado (7985 Kg/día) + H₂O (90 kg/día)

7.3.5 Process Flow Diagram (PFD)

CORRIENTE No.	1	2	3	4	5	6	7	8
PRODUCTO	MDF	PINTURA EN POLVO	VAPOR DE AGUA	MDF CALIENTE	PINTURA EN POLVO	MDF RECUBIERTO	MDF RECUBIERTO Y CURADO	VAPOR DE AGUA
FLUJO MÁSSICO (Kg/día)	8462	124	508	7954	3	8075	7985	90
TEMPERATURA (°C)	25	25	N/D	140	25	100	160	N/D



H-101	C-101	H-102
Horno de precalentamiento	Cabina de aplicación	Horno de curado

Gas Natural 1	Gas Natural 2
100 m3	190 m3

"Proceso de aplicación de pintura en polvo sobre MDF" 3.8 ton/año
 Process Flow Diagram
 Dibujo No. 1
 Daniel Colorado | Manuel Posada

7.4 Evaluación financiera del proyecto: Aplicación de pintura en polvo electrostática sobre MDF.

Como se mencionó anteriormente, se evaluó el proyecto en un horizonte de 10 años y una tasa de oportunidad del 15% efectivo anual. El análisis realizado en este trabajo se hizo en base a las definiciones presentadas en (Tobar, 2011)

7.4.1 Captura de la demanda.

La planta de producción de TABLEMAC tiene una capacidad reportada de 132.000 m³ anuales. Basados en esta capacidad y teniendo en cuenta el calibre utilizado en el diseño de experimentos se calculó la posible demanda total anual:

Tabla 14. Cálculo de la máxima demanda posible de MDF.

MÁXIMA DEMANDA POSIBLE	132.000	m ³ ANUAL
	0,02	m (CALIBRE)
	6.600.000	m ² ANUAL

Por tratarse de una alternativa novedosa en el país y según la capacidad que se desea tener en la planta de aplicación de pintura en polvo sobre MDF, la captura de la demanda inicial será de 1% de la producción de TABLEMAC, con incremento de 1% sobre dicha producción cada 3 años. A continuación el cambio de la demanda durante el horizonte del proyecto (Tabla 15):

Tabla 15. Demanda de unidades anuales durante el tiempo del proyecto.

PERIODO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POSIBLE DEMANDA (unidades)	6.600.000	6.600.000	6.600.000	6.600.000	6.600.000	6.600.000	6.600.000	6.600.000	6.600.000	6.600.000	6.600.000
CAPTURA DEMANDA (%)	1%	1%	1%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	4%	4%
CAPTURA DEMANDA (unidades)		66.000	66.000	132.000	132.000	132.000	198.000	198.000	198.000	264.000	264.000

7.4.2 Inversión inicial.

La inversión inicial del proyecto fue calculada según cotizaciones de proveedores locales como SIPAF y PREMAC, ambos fabricantes de hornos. A continuación el detalle de la inversión inicial:

Tabla 16. Inversión inicial en equipos.

INVERSION INICIAL				
EQUIPO	DIMENSIONES	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
HORNO DE CONVECCIÓN	5m x 3m x 1.5m	\$ 350.000.000	2	\$ 700.000.000
CABINA DE APLICACIÓN	5m x 3m x 1.5m	\$ 200.000.000	1	\$ 200.000.000
PISTOLA DE APLICACIÓN	NA	\$ 12.500.000	4	\$ 50.000.000
INSTALACIÓN ELECTRICA	NA	\$ 50.000.000	1	\$ 50.000.000
ADECUACIONES FISICAS	NA	\$ 100.000.000	1	\$ 100.000.000
TOTAL				\$ 1.100.000.000

Los recursos requeridos para la inversión inicial serán prestados por una entidad financiera con una tasa de interés del 13% efectivo anual, para ser amortizados en un plazo de 10 años. Al realizar la amortización de la deuda, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 17. Amortización de la deuda para la puesta en marcha de la planta.

TASA	13%	E.A									
PRESTAMO CUOTAS FIJAS											
PERIODO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SALDO	\$ 1.100.000.000	\$ 1.040.281.489	\$ 972.799.571	\$ 896.545.003	\$ 810.377.343	\$ 713.007.886	\$ 602.980.399	\$ 478.649.340	\$ 338.155.243	\$ 179.396.913	\$ 0
CUOTA		\$ 202.718.511	\$ 202.718.511	\$ 202.718.511	\$ 202.718.511	\$ 202.718.511	\$ 202.718.511	\$ 202.718.511	\$ 202.718.511	\$ 202.718.511	\$ 202.718.511
INTERES		143000000	135236593,5	126463944,2	116550850,5	105349054,5	92691025,13	78387451,92	62224414,18	43960181,54	23321598,66
AMORK		\$ 59.718.511	\$ 67.481.918	\$ 76.254.567	\$ 86.167.661	\$ 97.369.457	\$ 110.027.486	\$ 124.331.059	\$ 140.494.097	\$ 158.758.330	\$ 179.396.913

El valor de la cuota será pagado anual vencido.

7.4.3 Ingresos.

Los ingresos del proyecto se encuentran divididos en ingresos operacionales e ingresos no operacionales. Los ingresos operacionales son los ingresos derivados de la comercialización del producto terminado y dependen directamente de la cantidad de m² recubiertos y el precio del producto terminado por m². El precio de 1 m² fue determinado según el costo de 1m² y un margen del 23% de margen bruto a la venta. El precio que se definió es de \$30.000 COP/m². Los ingresos no operacionales son los ingresos que se obtienen de la venta de los equipos al finalizar el proyecto. Para este caso, el valor del salvamento es de 20% en el último periodo evaluado.

Según este precio y la captura de la demanda los ingresos operacionales y no operacionales para el proyecto durante su vigencia son:

7.4.4 Costos variables.

Como costos variables se tomó el costo de recubrir 1 m² de MDF con pintura en polvo y el costo de 1 m² de MDF del calibre que se ha utilizado a lo largo del proyecto. El costo de la pintura se calculó según lo siguiente:

Tabla 18. Costo de la pintura asociado al recubrimiento de un 1 m².

COSTO PINTURA / m ²	
7 m ²	1 kg
1 kg	\$ 9.500 COP
\$ 1.357 COP/m ²	

El costo del MDF se calculó dividiendo el precio de una tabla de MDF por su área según la siguiente información:

Tabla 19. Costo de un metro cuadrado de MDF sin tratar.

COSTO MDF	
Largo	2,14 m
Alto	2,44 m
5,22 m ² /TABLERO	\$ 114.000
1	\$ 21.839

Según lo anterior el costo variable mensual es de \$23.196. El valor total del costo variable para el proyecto es el resultado de multiplicar los m² recubiertos al año por el costo unitario de recubrir 1 m².

Tabla 20. Costos variables mensuales.

COSTOS VARIABLES MENSUALES/m²	
CONCEPTO	VALOR
MDF	\$ 21.839
PINTURA	\$ 1.357
TOTAL	\$ 23.196

7.4.5 Costos fijos mensuales.

Los costos fijos mensuales del proyecto corresponden al costo del canon de arrendamiento, el valor de la mano de obra y el personal encargado de manejar el proceso, y el gasto energético del proceso.

El canon de arrendamiento mensual fue calculado teniendo en cuenta que se requiere una bodega de 400 m² para instalar el proceso. El valor del arrendamiento por m² en una bodega industrial es de \$15.000COP/m². Por lo tanto, el costo por arrendamiento es de \$6.000.000 mensual. Adicionalmente se debe pagar administración de la bodega por un valor de \$1.000.000. El costo de mano de obra y personal encargado del proceso, se calculó considerando que el salario mínimo legal vigente en Colombia es de \$660.000, subsidio de transporte por \$70.000 y prestaciones sociales por un valor de \$277.400 correspondiente al 38%. En base a este valor se obtuvo el costo de los operarios. El consumo energético de la planta se estimó en \$10'000.000, de los cuáles \$7'000.000 corresponden al consumo de

gas en ambos hornos, que según el costo de Empresas Públicas de Medellín, se estimó un consumo por día de 290,8m³ de gas natural. Para el personal administrativo se tomó un valor en referencia al comportamiento del mercado laboral colombiano, y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 21. Costos de mano de obra.

COSTO M.O			
CLASIFICACION	CANTIDAD	COSTO MENSUAL C/U	VALOR TOTAL
OPERARIO	6	\$ 1.007.400	\$ 6.044.400
COMERCIALES	4	\$ 2.500.000	\$ 10.000.000
ADMINISTRATIVO	2	\$ 5.000.000	\$ 10.000.000
TOTAL			\$ 26.044.000

Los costos fijos anuales se obtuvieron multiplicando los costos fijos mensuales y se determinó que su valor es de \$516.532.800:

Tabla 22. Gastos fijos del proyecto.

GASTOS FIJOS		
CONCEPTO	VALOR MES	VALOR AÑO
ARRENDAMIENTO	\$ 7.000.000	\$ 84.000.000
M.O	\$ 32.088.800	\$ 385.065.600
CONSUMO ENERGÉTICO	\$ 10.000.000	\$ 120.000.000
GASTOS FIJOS TOTALES	\$ 49.088.800	\$ 589.065.600

7.4.6 Flujo de caja del proyecto.

El flujo de caja del proyecto, se estimó considerando impuestos del 33%, depreciación de 10% anual de los equipos, y el préstamo requerido para llevar a cabo la inversión inicial.

Tabla 23. Flujo de caja del proyecto.

PERIODO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DEMANDA	6600000	6600000	6600000	6600000	6600000	6600000	6600000	6600000	6600000	6600000	6600000
CAPTURA DEMANDA %	1%	1%	1%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	4%	4%
CAPTURA DEMANDA (VENTAS)		66000	66000	132000	132000	132000	198000	198000	198000	264000	264000
PRECIO (COP/m2)		\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 30.000
INGRESOS OPERACIONALES		\$ 1.980.000.000	\$ 1.980.000.000	\$ 3.960.000.000	\$ 3.960.000.000	\$ 3.960.000.000	\$ 5.940.000.000	\$ 5.940.000.000	\$ 5.940.000.000	\$ 7.920.000.000	\$ 7.920.000.000
INGRESOS NO OPERACIONALES											\$ 220.000.000
TOTAL INGRESOS		\$ 1.980.000.000	\$ 1.980.000.000	\$ 3.960.000.000	\$ 3.960.000.000	\$ 3.960.000.000	\$ 5.940.000.000	\$ 5.940.000.000	\$ 5.940.000.000	\$ 7.920.000.000	\$ 8.140.000.000
COSTOS VARIABLES/m2		\$ 23.196	\$ 23.196	\$ 23.196	\$ 23.196	\$ 23.196	\$ 23.196	\$ 23.196	\$ 23.196	\$ 23.196	\$ 23.196
COSTOS VARIABLES		\$ 1.530.950.739	\$ 1.530.950.739	\$ 3.061.901.478	\$ 3.061.901.478	\$ 3.061.901.478	\$ 4.592.852.217	\$ 4.592.852.217	\$ 4.592.852.217	\$ 6.123.802.956	\$ 6.123.802.956
COSTOS FIJOS		\$ 589.065.600	\$ 589.065.600	\$ 589.065.600	\$ 589.065.600	\$ 589.065.600	\$ 589.065.600	\$ 589.065.600	\$ 589.065.600	\$ 589.065.600	\$ 589.065.600
TOTAL EGRESOS	\$ -	\$ 2.120.016.339	\$ 2.120.016.339	\$ 3.650.967.078	\$ 3.650.967.078	\$ 3.650.967.078	\$ 5.181.917.817	\$ 5.181.917.817	\$ 5.181.917.817	\$ 6.712.868.556	\$ 6.712.868.556
DEPRECIACIÓN MAQUINARIA		\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000
TOTAL DEPRECIACIÓN	\$ -	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000
VALOR EN LIBROS											\$ -
UAI	-	(235.016.338,92)	(235.016.338,92)	214.032.922,17	214.032.922,17	214.032.922,17	663.082.183,25	663.082.183,25	663.082.183,25	1.112.131.444,33	1.332.131.444,33
INTERESES PRÉSTAMO		\$ 143.000.000	\$ 135.236.594	\$ 126.463.944	\$ 116.550.850	\$ 105.349.055	\$ 92.691.025	\$ 78.387.452	\$ 62.224.414	\$ 43.960.182	\$ 23.321.599
UAI	-	(378.016.338,92)	(370.252.932,43)	87.568.977,98	97.482.071,72	108.683.867,64	570.391.158,12	584.694.731,34	600.857.769,07	1.068.171.262,79	1.308.809.845,68
IMPUESTOS	\$ -			\$ 28.897.763	\$ 32.169.084	\$ 35.865.676	\$ 188.229.082	\$ 192.949.261	\$ 198.283.064	\$ 352.496.517	\$ 431.907.249
U NETA	-	(378.016.338,92)	(370.252.932,43)	58.671.215,24	65.312.988,05	72.818.191,32	382.162.075,94	391.745.469,99	402.574.705,28	715.674.746,07	876.902.596,60
TOTAL DEPRECIACIÓN	\$ -	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000	\$ 95.000.000
VALOR EN LIBROS	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
PRESTAMO	\$ 1.100.000.000										
AMORK	\$ -	\$ 59.718.511	\$ 67.481.918	\$ 76.254.567	\$ 86.167.661	\$ 97.369.457	\$ 110.027.486	\$ 124.331.059	\$ 140.494.097	\$ 158.758.330	\$ 179.396.913
INVERSION	\$ 1.100.000.000										
FLUJO DE FONDOS	-	(342.734.850,33)	(342.734.850,33)	77.416.648,02	74.145.327,09	70.448.734,43	367.134.589,66	362.414.410,50	357.080.608,05	651.916.416,20	792.505.683,85

7.4.7 Indicadores de rentabilidad del proyecto.

Para evaluar la rentabilidad del proyecto se analizaron los siguientes indicadores financieros teniendo en cuenta una tasa interna de oportunidad (TIO) de 15%:

- **Valor presente neto (VPN):** El valor presente neto para el proyecto fue de \$364.042.231. El VPN es positivo, lo que indica que el proyecto está entregando al inversionista \$364.042.231 por encima de lo que le otorgaría una inversión con una rentabilidad igual a la TIO.
- **Tasa interna de retorno (TIR):** la tasa interna de retorno del proyecto, según el flujo de caja presentado anteriormente es de 25% La TIR es mayor que la TIO, lo que indica que la rentabilidad del proyecto es mayor que la rentabilidad entregada por entidades financieras.
- **Beneficio anual equivalente (BAUE):** el beneficio anual equivalente del proyecto es de \$ 10.845.591, lo que quiere decir que el proyecto entregará al inversionista \$ 10.845.591 anuales considerando tasa interna de retorno del 25%.
- **Relación costo - beneficio:** La relación costo beneficio del proyecto es de 1.35 lo que indica que este proyecto tiene 1,35 más ingresos que costos, por lo cual se considera rentable la implementación de este proceso.

Tabla 24. Cálculo del indicador costo/beneficio.

VPN INGRESOS	\$ 13.433.381.722,61
VPN EGRESOS	\$ 9.953.012.425,88
RELACIÓN COSTO/BENEFICIO	1,35

8. DISCUSIÓN.

8.1 Factores críticos del proceso de recubrimiento de MDF utilizando pintura electrostática.

Para la evaluación del proceso de recubrimiento de MDF con pintura en polvo electrostática, se partió de una zona experimental amplia a partir de los niveles de los factores de referencias encontrados en la literatura y del conocimiento de la empresa RECYA S.A.S., éstos fueron : Temperatura de precalentamiento (170°C – 190°C), tiempo de precalentamiento (5 minutos – 10 minutos), voltaje de aplicación (60kV – 80kV), temperatura de curado (150°C – 170°C) y tiempo de curado (8 minutos – 12 minutos) (Binder, 2004) (Schmidt, 2004) (Harris, 2008)

A partir de estos factores y sus respectivos niveles se planteó un diseño factorial fraccionado 2^{5-1} de resolución V con dos puntos al centro, diseño que permitió observar la influencia de todos los factores en las variables de respuesta establecidas (Adherencia, dureza y curado). A partir de este diseño se encontró que los únicos factores significativos fueron el tiempo de curado y la temperatura de curado, y que a su vez valores por encima de 12 minutos y 170°C de curado maximizaban la adherencia, la dureza y el nivel de curado del recubrimiento sobre el MDF. Estos resultados fueron similares a los encontrados por Binder en el 2004, quien planteó que en hornos de convección de gas, las piezas deben curarse alrededor de 10 a minutos a 190°C para obtener muy buena propiedades y apariencia (Binder, 2004). De igual manera estos resultados pueden explicarse de la siguiente manera:

- La etapa de curado en los procesos de aplicación de pintura en polvo electrostática es la más crítica, ya que es allí donde el recubrimiento

reacciona, se adhiere al sustrato, y se obtienen los acabados finales de brillo y textura (físicas) y de dureza y adherencia (mecánicas) (Cunliffe, 2000). Esto explica el resultado obtenido, ya que se observó un aumento de la adherencia, de la dureza y del curado con cambios en el proceso de curado. El tiempo y la temperatura de precalentamiento no tuvieron efectos significativos, esto puede deberse a que las variables de respuesta (adherencia, dureza y curado) evaluadas en el presente trabajo, van más ligadas a la etapa de curado del recubrimiento. La etapa de precalentamiento únicamente le brinda a la pieza la temperatura necesaria para que la pintura se adhiera pero sin curarla totalmente, adicional a ello permite que aumente la conductividad del MDF (Ozdemir et al., 2009).

- En cuanto al voltaje de aplicación, al ser la madera muy poco conductora de la electricidad no se observó influencia del voltaje de la pistola en la dureza, la adherencia y el curado. Sin embargo la no presencia de voltaje y conductividad en el MDF hace inviable el proceso de recubrimiento de pintura en polvo electrostática. Se recomienda para este proceso evaluar voltajes inferiores a los experimentados en este trabajo.

En la literatura no se han encontrado estudios en los cuales se especifique la influencia de estos factores sobre las variables de respuesta específicas de adherencia, dureza y curado, sin embargo, bajo las condiciones propuestas como exitosas en varias investigaciones especificadas en el numeral 5.6, y con el conocimiento de los expertos de la empresa RECYA S.AS, los resultados se apoyan en la noción de que la etapa de curado es la más importante en cualquier proceso con pintura en polvo.

De igual manera la pintura utilizada debe ser preferiblemente del tipo epóxi/poliéster BTC (Bajo Tiempo/Temperatura de Curado) ya que ofrece mejor resistencia a

químicos como limpiadores de superficie y al ser más reactiva potencializa la eficiencia del proceso. Se sugiere que debe ser microtexturizada o texturizada para evitar que se evidencien las fibras de la superficie del MDF, además de que puede ser más dura y menos sensible a los golpes, rayones y demás.

8.2 Optimización de los factores críticos en el proceso de recubrimiento de MDF con pintura en polvo electrostática.

En este trabajo se utilizó una metodología de optimización para lograr obtener valores óptimos del proceso de recubrimiento de MDF con pintura en polvo electrostática. Se partió de un diseño factorial fraccionado, descrito en la sección anterior, donde se comprobó que los factores críticos del proceso eran la temperatura de curado y el tiempo de curado. Luego de depurados los factores críticos se planteó un diseño factorial completo para conocer más a fondo la zona de experimentación y optimización; por último, al haber encontrado curvatura en el diseño factorial completo, se desarrolló un diseño de optimización de superficie de respuesta mediante el cual se encontraron los valores óptimos de los factores críticos que maximizaron las variables de respuesta de adherencia, dureza y curado por una metodología de camino de ascenso escalonado. Finalmente se corroboró el óptimo con dos corridas experimentales. Esta metodología se realizó de acuerdo a lo expuesto por La-vara y Gutierrez Pulido, (2008) que argumentan el uso de un diseño compuesto central como una excelente opción a partir de un diseño completo y que al evaluar puntos en el centro como en la periferia del diseño se mejora la certeza del resultado.

8.2.1 Acercamiento a la zona de optimización.

Como se explicó anteriormente, luego de haber depurado los factores críticos mediante el factorial fraccionado, se planteó un diseño factorial completo 3^2 con réplica. Mediante el conocimiento de la formulación de la pintura utilizada para este trabajo y los resultados obtenidos con anterioridad, se estableció que con los nuevos niveles escogidos (Temperatura de curado = 170°C, 180°C y 190°C y tiempo de curado = 12 minutos, 14 minutos y 16 minutos) la zona del óptimo se encontraba cerca de dichos valores, por lo que, este diseño, ofrecía la posibilidad de encontrar curvatura, lo que indicaría la presencia de un posible óptimo (De La Vara Salazar & Gutierrez Pulido, 2008)

Como se determinó desde el factorial fraccionado, y al evaluar las mismas variables de respuesta (Adherencia, dureza y curado), se confirmó que la etapa de curado es fundamental en la maximización de las variables analizadas. El hecho de haber encontrado curvatura da razón de que a temperaturas superiores a 180°C el recubrimiento va perdiendo propiedades. Esto es similar a lo observado en el proceso de aplicación de pintura electrostática para metales, en donde a temperaturas de curado de más de 250°C por tanto tiempo afectan las propiedades de adherencia, dureza y curado final (Thomas, Saleh, Guigon, & Czechowski, 2009). Esto es debido a un fenómeno conocido como “sobrehorneo” en el cual se puede presentar cristalización del recubrimiento lo que lo hace frágil y deficiente respecto a sus propiedades mecánicas. Este fenómeno ha sido reportado por diversas compañías como (Weg, 2008) y evidenciado en años de experiencia por el personal de la empresa RECYA S.A.S

Desde el punto de vista del sustrato es importante señalar que en el momento del curado el MDF aún tiene humedad en su interior, este hecho puede permitir que el recubrimiento reaccione en su totalidad, el sustrato sigue ganando energía y por consiguiente la humedad residual al evaporarse puede generar deficiencias en las

propiedades finales del recubrimiento, especialmente en la adherencia, la cual es la propiedad más importante, haciendo el recubrimiento vulnerable a desprendimiento, poca resistencia a impactos, rayones, entre otros. (Entrevista experto RECYA S.A.S elaborada el día 15 de septiembre de 2014)

8.2.2 Optimización del proceso de recubrimiento de MDF con pintura en polvo electrostática.

Conociendo la curvatura ofrecida por el diseño factorial completo, se determinó la utilización de un diseño de optimización del tipo de superficie de respuesta central compuesto 2^2 + estrella, rotable y ortogonal. Al haber obtenido curvatura con el factorial 3^2 , se estrechó aún más el rango de experimentación en una zona donde se preveía el óptimo. Se utilizó este diseño debido a que ofrecía la posibilidad de construirse a partir de los valores obtenidos en el factorial completo, dando la posibilidad de evaluar la zona donde se encontraba el óptimo; además con los puntos estrella se verificó el comportamiento del modelo establecido en la periferia del diseño, aumentando la certeza del experimento.

La superficie de respuesta obtenida mediante este experimento tiene forma de cilindro alargado, lo que da razón de que cambios en el tiempo de curado no afectan notoriamente el desempeño del recubrimiento por lo que trabajar a 12 o a 13.6 minutos puede ser indiferente ya que los valores óptimos no se moverán notoriamente. Este comportamiento se explica en los resultados obtenidos para la variable de respuesta de curado, que como se explica en De La Vara Salazar y Gutierrez Pulido (2008), lo cuales se representan en la gráfica de contornos como una cresta descendente, es decir, el óptimo se encuentra por fuera de la zona de experimentación planteada en la optimización, alargando la superficie de respuesta del óptimo hacia esta zona. El óptimo sin embargo se mantiene en un valor de temperatura y tiempo muy adecuados para maximizar las variables estudiadas

sobre cualquier recubrimiento, independiente del color, al evadir el problema de amarillamiento o pérdida de propiedades por sobrehorneo, que constituyen limitaciones técnicas no explicables por las variables de respuesta evaluadas en este trabajo de investigación.

8.3 Evaluación financiera del proyecto: Aplicación de pintura en polvo electrostática sobre MDF

El análisis económico para el proyecto se realizó para un horizonte de 10 años, teniendo en cuenta que el sector de recubrimientos es muy dinámico, y que los desarrollos en este campo son muy amplios. En el diseño de la planta de aplicación se consideraron hornos de convección operados a gas. Si bien estos hornos cumplen perfectamente la función requerida para el recubrimiento de MDF con pintura en polvo, existen otros equipos de mayor eficiencia y con los cuales se pueden lograr mejores acabados, como lo son los hornos Infra Rojo (IR) o los hornos Ultra Violeta (UV). Estos equipos no fueron considerados en este proyecto, ya que actualmente tienen un costo muy alto en Colombia, y no son comunes.

Los indicadores económicos como la tasa interna de retorno y el valor presente neto, fueron analizados y comparados utilizando una tasa interna de oportunidad del 15% E.A.V. Se tomó esta tasa teniendo en cuenta lo ofrecido en promedio por fondos de inversión tales como PROTECCIÓN, OLD MUTUAL y BANCOLOMBIA, La rentabilidad promedio para esta modalidad de inversión es de 7.5%, y se espera obtener el doble. El VPN que se obtuvo en el análisis económico es de \$364.042.231 por lo que se concluye que el proyecto está entregando como valor presente \$364.042.231 por encima de lo obtenido si se entregaran los mismos recursos a una entidad financiera. La TIR obtenida en el proyecto es de 25%, que es 10 puntos mayor que la TIO, lo que indica que la rentabilidad del proyecto es muy superior a la rentabilidad ofrecida por la entidad financiera. Además la relación costo

beneficio del proyecto es de 1.35, lo que indica que el proyecto recibe mayores beneficios que sus costos.

Considerando que la capacidad calculada de la planta de producción de TABLEMAC es de 6.600.000 m², y que el recubrimiento de este producto con MDF es una alternativa nueva en el país, se estimó que la demanda de MDF recubierto con pintura en polvo será inicialmente el 1% de la producción total de la planta de TABLEMAC. A medida que el recubrimiento se posiciona en el mercado, este tendrá un incremento en la demanda del 1% cada 3 años. Al finalizar el proyecto, la demanda de este producto será del 4% de la producción anual de TABLEMAC, un estimado de 264.000 m². Los principales clientes de este producto serán los fabricantes de muebles y enseres ya que como se menciona anteriormente este producto tiene amplias aplicaciones en este sector y puede ser utilizado para muebles de oficina, muebles de cocina, y escritorios escolares. Un atractivo importante de este producto es que tiene una alta gama de colores, a diferencia del recubrimiento en melanina cuyo colorido es muy limitado. En base a la demanda calculada, se establecieron las condiciones de operación del proceso, las dimensiones de los equipos, el recurso humano necesario y el espacio físico requerido para llevar a cabo el proceso.

Para el diseño del proceso se utilizaron dos hornos de convección que operan a gas. Como se menciona anteriormente se consideran estos equipos teniendo en cuenta que son el tipo de horno más común en Colombia, y que su consumo energético es considerablemente menor al consumo de un horno eléctrico. El diseño de experimentos, mediante el cual se definieron las condiciones de operación del proceso se realizó utilizando un horno de convección, por lo tanto para que estas condiciones apliquen a un proceso industrial, se debe utilizar un horno del mismo tipo y su escalamiento debe ser realizado conservando las mismas condiciones de operación del horno evaluado. Se recomienda utilizar hornos que tengan una distribución de calor lo más homogénea posible para asegurar que el curado de la

pintura sea uniforme a lo largo de la placa de MDF a recubrir. Además los hornos deben ser de tipo túnel para que la planta sea continua. Como se menciona anteriormente la cabina de pintura debe tener 4 pistolas de aplicación para que cada operario aplique la pintura en polvo sobre una cara del tablón de MDF. En la cabina deben estar 2 tablonés simultáneamente al igual que en los hornos de precalentamiento y curado. Es de suma importancia que la aplicación de la pintura se realice de manera uniforme para que se logre un buen acabado. Buscando garantizar un buen acabado en el recubrimiento, se tendrá un operario aplicando cada lado del tablón de MDF, con el mayor cuidado posible. El MDF será transportado a lo largo del proceso en un sistema automático de velocidad variable. Este sistema es de gran importancia teniendo en cuenta que las piezas de MDF son de tamaño considerable. Para El cargue del MDF al sistema se realizará un orificio en la parte superior y se colgará de un gancho metálico. El sistema automático será programado de manera tal que se cumplan los tiempos establecidos anteriormente para cada etapa del proceso. la planta tendrá capacidad para producir 264.000 m² anuales de MDF recubierto.

La inversión inicial requerida para la puesta en marcha del proyecto es de \$ 1.100.000 COP. Estos recursos serán solicitados a una entidad financiera que para este tipo de proyectos donde se involucran activos de considerable valor, la tasa es del 13% Efectivo Anual. El pago de las cuotas será anual vencido, y la amortización se realizó considerando cuotas constantes. El análisis económico se realiza recurriendo a un préstamo para el caso de que no se tenga un inversionista interesado en el proyecto, y que ninguna de las dos empresas involucradas en la presente investigación (RECYA S.A.S y TABLEMAC S.A.S.) estén interesadas o tengan recursos para realizar dicho proyecto. Realizar un préstamo implica el pago de intereses a la entidad financiera, lo que afecta negativamente el flujo de caja del proyecto. Se recomienda, en caso de realizar el proyecto, y si es posible, que no se recurra a realizar el préstamo para maximizar las ganancias.

Los ingresos del proyecto provienen principalmente de la venta del producto terminado. El precio del producto que se definió para el análisis es de \$30.000 COP/m², este precio se definió teniendo en cuenta que el costo bruto del producto es de 23.196 COP/m², y se obtiene un margen bruto del 23%. Este precio hace que el producto sea muy competitivo ya que el precio actual de 1m² de MDF recubierto con melanina es de \$ 42.000. El precio del producto recubierto con MDF debe ser menor considerando que con el recubrimiento de melanina se obtienen mejores propiedades y su uso es más amplio ya que este recubrimiento tiene mejor resistencia y propiedades químicas según un análisis realizado por la empresa TABLEMAC (Arango, 2013). El margen que se obtiene con el precio establecido es un margen bajo comparado con lo que se observa en el mercado, pero hace más competitivo el producto en su lanzamiento y se mantiene una buena rentabilidad. Otros ingresos del proyecto son los obtenidos por el salvamento de los equipos. Por dicho concepto se obtienen \$220.000.000 que corresponden al 20% del valor de la inversión inicial.

Los costos variables del proyecto son de \$ 23.196/m². Estos costos dependen de la cantidad real de m² de MDF que se recubran y corresponden al costo de la pintura necesaria para recubrir un m², y el costo de MDF al público. Es importante tener presente que estos costos influyen considerablemente en el flujo de caja ya que son determinantes en el margen de ganancia del producto. Se toma el precio de venta al público de ambos productos, siendo este un escenario pesimista, ya que de realizarse el proyecto, y por tratarse de compras de alto volumen se podría lograr una mejor negociación con los proveedores de ambos productos.

Los costos fijos del proyecto corresponden a \$ 516.523.800 COP anuales y se encuentran determinados por la mano de obra, el valor del arrendamiento de la bodega y el consumo energético. Estos costos son los costos de operación del proyecto y no varían de un periodo a otro. El consumo energético se asume constante ya que el sistema debe estar en continua operación para evitar

sobrecostos por arranques. Independientemente de que se esté produciendo a una eficiencia del 100%. El costo de arrendamiento se estimó en \$7.000.000 COP mensuales considerando que el espacio físico necesario es de 400 m² en el municipio de Barbosa. Esta ubicación es importante por su cercanía a la planta de producción de MDF de TABLEMAC que está ubicada en este municipio. La distancia a la planta de pintura en polvo no es tan importante considerando que el volumen y el peso de esta materia prima es mucho menor que el del MDF. La planta de aplicación de pintura en polvo trabajará 16 horas diarias divididas en 2 turnos de 8 horas. Para el correcto funcionamiento del proceso, y considerando que la aplicación de la pintura en la cabina y el cargue y descargue de material es un proceso manual, se requieren 6 operarios por turno. El costo de mano de obra mensual correspondiente a los operarios de la planta es de \$12.088.800. Es importante contar con personal administrativo calificado ya que estos serán los encargados de comercializar, promocionar, optimizar y administrar el proceso. El costo mensual del personal calificado será de \$20.000.000, que comprenden 4 asesores comerciales con un costo de 2.500.000 c/u, un gerente de producción con un costo de 4.000.000, y un gerente general con un costo de \$6.000.000. El costo total de mano de obra es de \$32.088.800 mensual, lo que corresponde a \$385.065.600.

Para el flujo de caja del proyecto, se consideraron los impuestos vigentes en Colombia, un total de 33% (impuesto a la renta del 25% y el impuesto CREE 8% sobre los ingresos). Para efectos del análisis se despreció la inflación. Con los resultados obtenidos, y los indicadores financieros analizados, se concluye que el proyecto es rentable para el plazo y las demás condiciones presentadas en el análisis económico.

9. CONCLUSIONES

Mediante un diseño de experimentos factorial fraccionado 2^{5-1} de resolución V con 2 puntos al centro fue posible determinar que los factores más importantes en las propiedades de adherencia, dureza y curado de un proceso de aplicación de pintura en polvo sobre MDF son el tiempo curado y la temperatura de curado.

A partir de un diseño factorial completo multinivel 3^2 duplicado fue posible determinar los niveles de los factores críticos donde se encontraba un óptimo para las variables de respuesta. Dicho óptimo se encontró en los niveles de 12 minutos y 14 minutos para el tiempo de curado y 175°C a 180°C para la temperatura de curado. Luego mediante un diseño de experimentos de optimización por superficie de respuesta del tipo central compuesto 2^2 + estrella; las características del diseño se establecieron como rotatable y ortogonal, fue posible maximizar la dureza (6H), la adherencia (5a) y el curado (30 frotos). El máximo se encontró en el valor de 175°C para la temperatura de curado y el valor 13 minutos para el tiempo de curado.

Se realizó el diseño conceptual de una planta industrial de recubrimiento de pintura en polvo electrostática con una capacidad de recubrir 264000 m^2 al año. Para la planta diseñada se realizó un análisis económico para un horizonte de 10 años y una Tasa interna de oportunidad (TIO) del 15%. Se determinó un valor presente neto (VPN) de $\$364.042.231$ por lo que se concluye que el proyecto está entregando $\$364.042.231$ por encima de lo obtenido si se entregaran los mismos recursos a una entidad financiera. La tasa interna de retorno (TIR) obtenida en el proyecto es de 25%, que es 10 puntos mayor que la tasa interna de oportunidad (TIO), lo que indica que la rentabilidad del proyecto es superior a la rentabilidad ofrecida por la entidad financiera. Además se obtuvo un beneficio anual equivalente de $\$ 10.845.591$. Lo que indica que el inversionista recibirá $\$ 10.845.591$ anuales. Además la relación costo beneficio para el proyecto fue de 1.35 lo que indica que el proyecto tuvo mayores beneficios que costos. Por lo anterior se concluye que el proyecto es económicamente viable bajo las condiciones presentadas en este trabajo de investigación.

10.RECOMENDACIONES.

Se recomienda que ambos hornos utilizados en el proceso tengan una distribución de calor uniforme para garantizar que tanto el calentamiento como el curado de la pintura sean homogéneos a lo largo de la superficie del MDF.

Se recomienda el uso de ganchos de un material no conductor para colgar los paneles de MDF en la línea de producción con el fin de evitar que la pintura no adhiera bien en las zonas adyacentes a los mismos.

Se recomienda para otros calibres de MDF realizar nuevamente el diseño de experimentos que se presenta en este proyecto ya que no se conoce el efecto del calibre sobre las propiedades mecánicas aquí evaluadas en el proceso de recubrimiento de MDF utilizando pintura en polvo electrostática.

11. BIBLIOGRAFÍA.

1. Ángel, J. R. (2014). ¿Qué es el aglomerado de madera MDF? Retrieved 28 de septiembre, 2014
2. Belder, E. G., Rutten, H. J. J., & Perera, D. Y. (2001). Cure characterization of powder coatings. *Progress in organic coatings*, 42(3), 142-149.
3. Binder, J. (2004). Powder of MDF: A Process Analysis. *Industrial Paint & Powder*, 80(9), 16-21.
4. Crapper, G. (2012). 10.29 - Powder Coatings. In K. Matyjaszewski & M. Möller (Eds.), *Polymer Science: A Comprehensive Reference* (pp. 541-566). Amsterdam: Elsevier.
5. Cunliffe, Z. (2000). Advancing powder coating formulations to meet new performance requirements. *Pigment & resin technology*, 29(2), 108-113.
6. De La Vara Salazar, R., & Gutierrez Pulido, H. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. (R. Del Bosque Alayón Ed. 2nd ed.). México D.F.: McGraw Hill.
7. Design-technology. Medium density Fibreboard. Retrieved 25 de septiembre, 2014
8. Diez, R. (2013). [Comunicación personal].
9. Entrevista experto en MDF de TABLEMAC, (2013).
10. Harris, S. (2006). The future for powder coatings—UV curable powders! *Focus on Powder Coatings*, 2006(5), 1-2.
11. Harris, S. (2008). Powder Coatings on Wooden Substrates. *Focus on Powder Coatings*, 2008(6), 1-2.
12. Harris, S. (2011). Add value, not cost, to powder coating systems. *Focus on Powder Coatings*, 2011(1), 1-2.
13. Kim, J.-A. (2011). Evaluation of formaldehyde and VOCs emission factors from paints in a small chamber: The effects of preconditioning time and coating weight. *Journal of hazardous materials*, 187(1), 52-57.
14. Lin, C. (2008). Activated conductive layer for powder coating on wood. *JCT Coatings Tech*, 5(3), 48-55.

15. Mills, P. (2003). The Performance Characteristics of UV-curable Powder Coatings on MDF. *Powder Coating*, 19-23.
16. Montgomery, D. M. (2008). *Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería* (L. Wiley Ed. Vol. 0).
17. MyM. (2011). Tablemac Anuncia la Inauguración de su Planta de MDF para fin de Año. . *M&M*.
18. Mymrin, V., Meyer, S. A. S., Alekseev, K. P., Pawlowsky, U., Fernandes, L. H., Scremim, C. B., & Catai, R. E. (2014). Manufacture of a construction material using the physicochemical properties of ash and sludge wastes from MDF board production. *Construction and Building Materials*, 50(0), 184-189.
19. Ozdemir, T., Hiziroglu, S., & Malkocoglu, A. (2009). Influence of relative humidity on surface quality and adhesion strength of coated medium density fiberboard (MDF) panels. *Materials & Design*, 30(7), 2543-2546.
20. Patiño, L. F. C. (2010). Tablemac MDF: Se inaugura la primera planta de esta variedad en Colombia. *M&M*, 3.
21. Redshaw, R. (2006). New Horizons for MDF. *Polymers, Paint and Colour Journal*. , 2006(9), 24-27.
22. Rijkse, K. (2001). Curing powders—How low can you go? *Metal Finishing*, 99(4), 47-50.
23. Romer, J. (2002). *Coating MDF Furniture with Powder: The First Industrial Series Production*. Paper presented at the PCE 2002, Nuremberg.
24. Schmidt, T. (2004). Powder Coating Medium Density Fiberboard: A New Approach to Success. *Powder Coating*, 2004(7), 16-24.
25. Schwarb, R. (2008). *Novel Natural Wood Effect with UV Curable Powder Coatings*. Paper presented at the PRA Wood Finishing Conference Amsterdam, Holanda.
26. Talbert, R. (2001). *Cubierta revestimiento de polvo*. (Cuarta Edición ed.). Manhattan, Estados Unidos: Chemical Coaters Association International.
27. Technologies, C. (2010). Automatic Powder Application.
28. Thomas, A., Saleh, K., Guigon, P., & Czechowski, C. (2009). Characterisation of electrostatic properties of powder coatings in relation with their industrial application. *Powder Technology*, 190(1), 230-235.
29. Tobar, M. (2011). *Ingeniería Económica* (Portafolio Ed. Vol. 0). Colombia.

30. Weg, Q. (2008). *Pinturas industriales en polvo DT-13*. (4th ed.). Brasil.
31. Wicks Jr, Z. W., Jones, F. N., Pappas, S. P., & Wicks, D. A. (2007). *Organic coatings: science and technology*: John Wiley & Sons.
32. Winandy, J. E., & Krzysik, A. M. (2007). Thermal degradation of wood fibers during hot-pressing of MDF composites. Part I, Relative effects and benefits of thermal exposure. *Wood and fiber science.*, 39(3 (2007)), 450-461.
33. Wuzella, G., Kandelbauer, A., Mahendran, A. R., Müller, U., & Teischinger, A. (2014). Influence of thermo-analytical and rheological properties of an epoxy powder coating resin on the quality of coatings on medium density fibreboards (MDF) using in-mould technology. *Progress in Organic Coatings*.

12. ANEXOS.

12.1 ANEXO 1: Ficha técnica pintura en polvo.



PINTURAS ELECTROSTÁTICAS

Ficha Técnica

ELECTROCOAT GRIS TENUE MICROTTEXTURIZADO HIBRIDO ALUMINIO BLANCO MICROTTEXTURIZADO UM HIBRIDO RAL 9006

Descripción del producto

Pintura en polvo termo fija basada en resina EPOXI/POLIESTER catalizado, de acabado MICROTTEXTURIZADO para la aplicación sobre superficies metálicas de uso decorativo y protector en exteriores. Brinda excelente protección a la corrosión, magnífica retención del color y del brillo, 100% sólida, ecológica, con una utilización hasta de un 98% del producto.

Características de la pintura

PROPIEDADES	ESPECIFICACIÓN	NORMA
Tipo	EPOXI/POLIESTER	NTC 2800
Tamaño de partícula promedio (µm)	38 – 40	NTC 2682/Cilas 990
Peso Específico (g/cm ³)	1.50 – 1.80	NTC 2684
Gel – Time (seg)	100 – 160	NTC 3216
Brillo (u.b)	1 - 10	NTC 592

Condiciones de aplicación

Sustrato	Metálico
Método de aplicación	Corona
Voltaje (kV)	70 – 80
Espesor (µm)	60 - 80
Rendimiento teórico (m ² /kg)	9 – 11
Curado (min/°C)	12/160

Propiedades del recubrimiento

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN	NORMA
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Flexibilidad	Pasa 1/8"	NTC 1115 / Mandril cónico
Adherencia	Pasa Gr-0	NTC 811 / Corte cruzado
Embutimiento	Pasa 7 mm	ISO 1520
Impacto	Pasa 80 kgf x cm inverso y reverso	NTC 877
Dureza al lápiz	≥ 2H	NTC 5252
RESISTENCIA QUÍMICA Y DURABILIDAD		
Niebla salina (500 horas)	Pasa - no ocurre corrosión en área mayor que 2 mm de la incisión	NTC 1156
Inmersión en agua destilada (240 horas)	Pasa – no ocurre ampollamiento o pérdida de brillo	ASTM D870
Envejecimiento acelerado	Pasa – 240 horas Retención >50% Cambio de color < límites de Qualicoat	ASTM D822
Resistencia Química, MEK	Pasa 30 frotos	---
Resistencia química a ácidos, álcalis y aceites a T ambiente	Excelente	---

Estas pruebas mecánicas y químicas fueron realizadas en condiciones de laboratorio y sirven solamente como referencia. El desempeño del producto se dará en función del pre-tratamiento, y de las circunstancias a las que será sometido.

Sustrato	Acero al carbono cold rolled
Espesor de pintura aplicada	60 - 70 micras
Pruebas mecánicas	Lámina lijada y desengrasada
Pruebas químicas	Lámina fosfatizada
Tratamiento	Fosfato de zinc
Curado	12 minutos a 160°C

Recomendaciones para la aplicación

Pre-tratamiento

Pasivación de la superficie	
Superficies ferrosas	Superficies no ferrosas
La fosfatización es el proceso más usado pudiendo ser a base de fosfato de hierro o de zinc, este último proporciona una mayor protección anti-corrosiva.	Aluminio y magnesio: La cromatización es el proceso más usado y similar a la fosfatización. Frecuentemente, antes de la cromatización, es necesario hacer un pre-tratamiento de las piezas con una solución diluida de soda.

Aplicación

Aplicar con equipo electrostático de polvo en spray. Es esencial que la fuente de aire comprimido para fluidizar y expulsar el polvo esté libre de aceite y humedad, los cuales podrían causar contaminación de la pintura.

El pre-calentamiento de las piezas a recubrir permitirá alcanzar películas más delgadas. Los ganchos que sujetarán el objeto a pintar deberán mantenerse limpios, especialmente en el punto de contacto, para que se obtenga un buen potencial a tierra.

El exceso de polvo (overspray) que no se adhiera a los artículos rociados puede ser recuperado por medio de una planta de recuperación de polvo, y después de ser tamizado para eliminar cualquier material extraño, puede ser incorporado en polvo nuevo para su re utilización. Adicionar como máximo un 20% de polvo de recuperación. Para evitar contaminación al usar diferentes colores es esencial hacer una limpieza de la planta entre cambios de color y de tipo de polvo.

Curado

Curar en horno durante 6 minutos, manteniendo una temperatura uniforme y constante en la pieza a pintar de 160°C.

Almacenamiento

El producto debe almacenarse en su empaque original hasta que se requiera para uso, en un área libre de humedad y de la luz directa del sol. Bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, 60% y 25°C, el producto puede tener una vida útil de hasta 18 meses.

Precauciones de seguridad.

Este producto fue desarrollado para ser usado por aplicadores profesionales en ambiente industrial y no debe ser usado sin consultar la Hoja de Seguridad que RECYA S.A.S proporciona a sus clientes. Si por cualquier razón, esta hoja no estuviera disponible, el usuario deberá contactar a RECYA S.A.S para obtener una copia antes de utilizar el producto. Las precauciones mínimas de seguridad que se deben tomar al trabajar con pinturas en polvo son las siguientes: Todo polvo es un irritante respiratorio, consecuentemente, la inhalación de pintura en polvo o de los vapores resultantes de la cura de la pintura, debe ser evitada. Tome medidas para prevenir contacto con la piel, pero en caso de que esto ocurra, lave la piel con agua y jabón. En el caso de contacto con los ojos, enjuague inmediatamente con agua limpia y consulte un médico. Los polvos de cualquier material orgánico finamente pulverizados pueden ser inflamados por una chispa eléctrica o llama abierta. Por esta razón los polvos no se deben acumular en las superficies de piezas e instalaciones. El equipo de recolección de pintura usada debe contener un dispositivo adecuado para alivio de explosión. Todo equipo debe ser aterrizado eléctricamente para prevenir acumulación de electricidad estática. Para mayor información refiérase a la Hoja de Seguridad del Material.

12.2 ANEXO 2: Análisis de varianza por residuales para las 3 variables de respuesta en el diseño factorial completo.

12.2.1 Análisis de residuales para Adherencia

SnapStat: Análisis de Una Muestra

Datos/Variable: RESIDUOS
Recuento = 18
Promedio = $-6,11111E-8$
Desviación Estándar = 0,266605
Coeficiente de Variación = $-4,36263E8\%$
Mínimo = -0,5
Máximo = 0,569444
Rango = 1,06944
Sesgo Estandarizado = 0,24619
Curtosis Estandarizada = 0,0468798

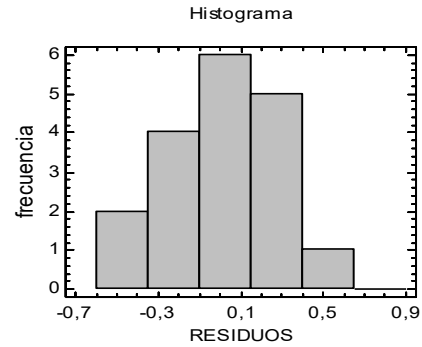
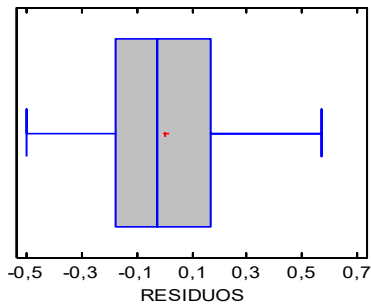


Gráfico de Caja y Bigotes



Intervalos de confianza del 95%

Media: $-6,11111E-8 \pm 0,13258$ $[-0,13258, 0,13258]$
Sigma: $[0,200057, 0,39968]$

Diagnósticos

Valor-P de Shapiro-Wilks = 0,9979
Autocorrelación en Retraso 1 = $-0,194125 \pm 0,461969$

Gráfico Secuencias Cronológicas

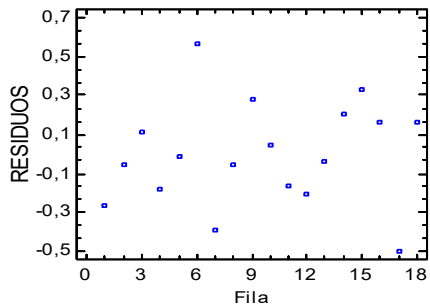
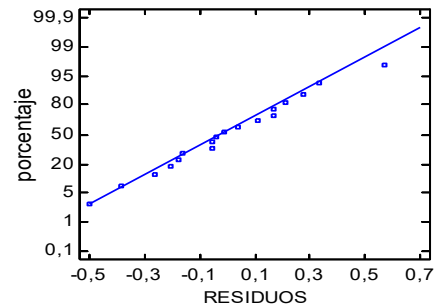


Gráfico de Probabilidad Normal



12.2.2 Análisis de residuales para dureza.

SnapStat: Análisis de Una Muestra

Datos/Variable: RESIDUOS
 Recuento = 18
 Promedio = 0,00000144444
 Desviación Estándar = 3,86665
 Coeficiente de Variación = 2,67691E8%
 Mínimo = -6,11111
 Máximo = 5,97222
 Rango = 12,0833
 Sesgo Estandarizado = 0,112062
 Curtosis Estandarizada = -1,23434

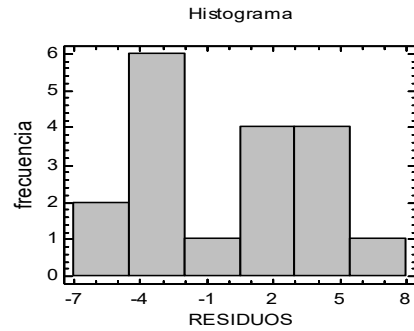
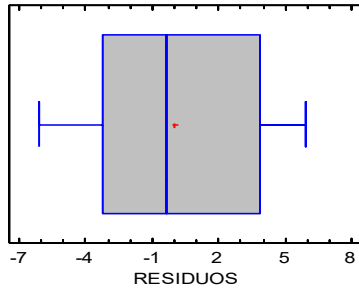


Gráfico de Caja y Bigotes



Intervalos de confianza del 95%

Media: 0,00000144444 +/- 1,92284 [-1,92284, 1,92285]
 Sigma: [2,90149, 5,79666]

Diagnósticos

Valor-P de Shapiro-Wilks = 0,2487
 Autocorrelación en Retraso 1 = -0,218883 +/- 0,461969

Gráfico Secuencias Cronológicas

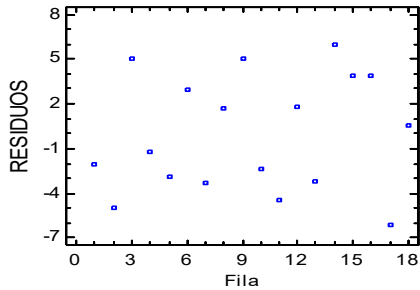
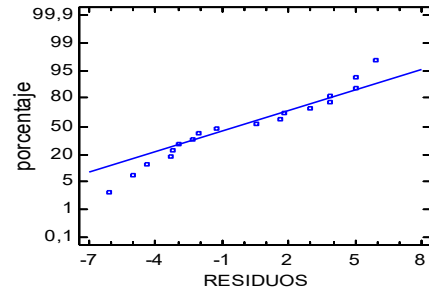


Gráfico de Probabilidad Normal



12.2.3 Análisis de residuales para curado.

SnapStat: Análisis de Una Muestra

Datos/Variable: RESIDUOS
Recuento = 18
Promedio = 0,00000144444
Desviación Estándar = 3,86665
Coeficiente de Variación = 2,67691E8%
Mínimo = -6,11111
Máximo = 5,97222
Rango = 12,0833
Sesgo Estandarizado = 0,112062
Curtosis Estandarizada = -1,23434

Histograma

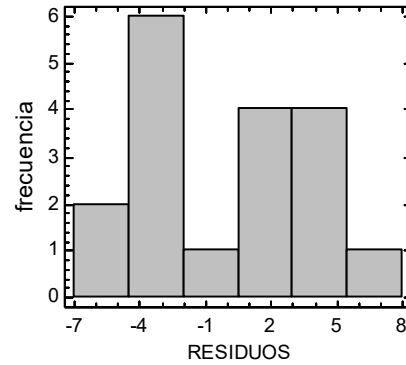
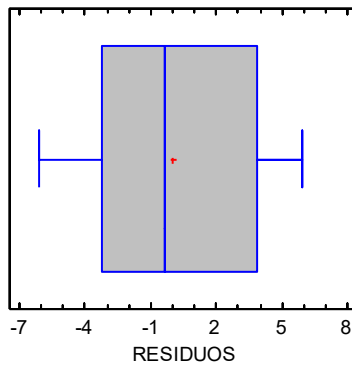


Gráfico de Caja y Bigotes



Intervalos de confianza del 95%

Media: 0,00000144444 +/- 1,92284 [-1,92284, 1,92285]
Sigma: [2,90149, 5,79666]

Diagnósticos

Valor-P de Shapiro-Wilks = 0,2487
Autocorrelación en Retraso 1 = -0,218883 +/- 0,461969

Gráfico Secuencias Cronológicas

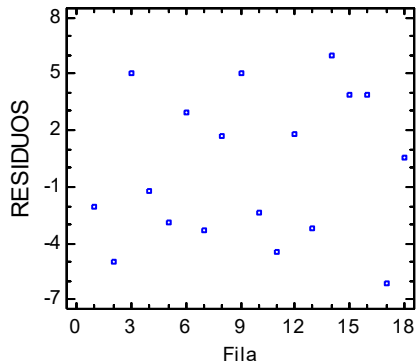
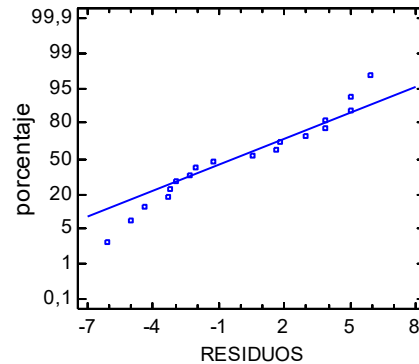


Gráfico de Probabilidad Normal



12.3 ANEXO 3: Tablas ANOVA para cada variable de respuesta en del diseño de superficie de respuesta.

Análisis de Varianza para Adherencia

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
B:Temperatura	0,251021	1	0,251021	6,62	0,0278
AA	0,034276	1	0,034276	0,90	0,3642
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BB	5,27027	1	5,27027	138,93	0,0000
Error total	0,379337	10	0,0379337		
Total (corr.)	5,9375	15			

R-cuadrada = 93,6112 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 90,4168 por ciento
Error estándar del est. = 0,194766
Error absoluto medio = 0,0917426
Estadístico Durbin-Watson = 2,54667 (P=0,8902)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,273336

Análisis de Varianza para Dureza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	0,126263	1	0,126263	1,93	0,1948
B:Temperatura	0,729061	1	0,729061	11,15	0,0075
AA	0,133858	1	0,133858	2,05	0,1830
AB	0,25	1	0,25	3,82	0,0790
BB	6,10159	1	6,10159	93,33	0,0000
Error total	0,65376	10	0,065376		
Total (corr.)	8,0	15			

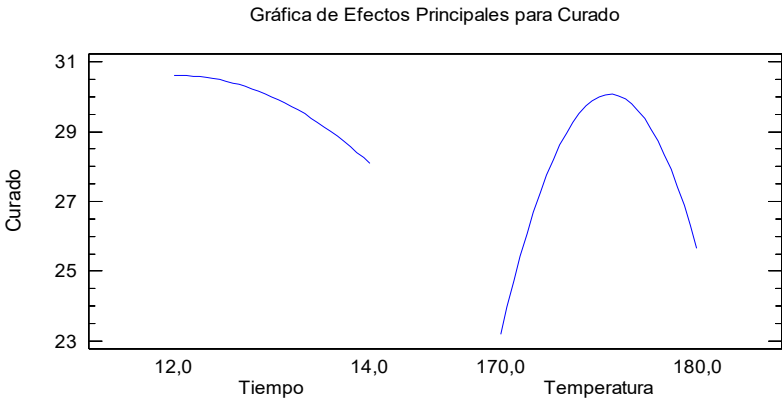
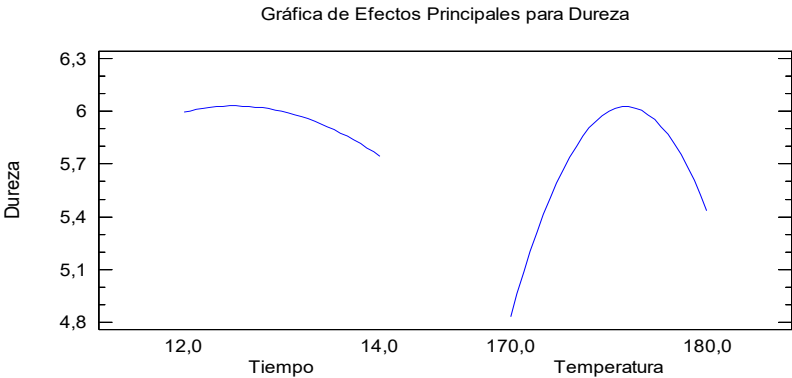
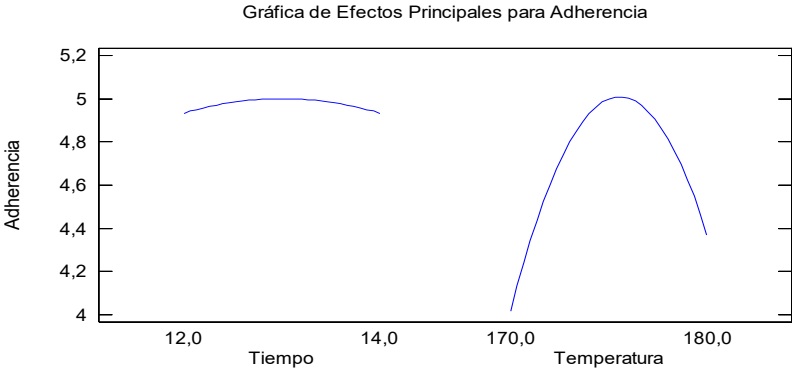
R-cuadrada = 91,828 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 87,742 por ciento
Error estándar del est. = 0,255687
Error absoluto medio = 0,126509
Estadístico Durbin-Watson = 2,4114 (P=0,8221)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,205699

Análisis de Varianza para Curado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	12,6263	1	12,6263	3,34	0,0974
B:Temperatura	12,449	1	12,449	3,30	0,0994
AA	3,37339	1	3,37339	0,89	0,3668
AB	25,0	1	25,0	6,62	0,0277
BB	252,37	1	252,37	66,85	0,0000
Error total	37,7543	10	3,77543		
Total (corr.)	343,75	15			

R-cuadrada = 89,0169 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 83,5254 por ciento
Error estándar del est. = 1,94305
Error absoluto medio = 0,913228
Estadístico Durbin-Watson = 1,73102 (P=0,2907)
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,134487

12.4 ANEXO 4: Gráficas de influencia de los efectos principales en el diseño de superficie de respuesta.



12.5 ANEXO 5: Camino de máximo ascenso para las 3 variables de respuesta en el diseño de superficie de respuesta.

Camino de Máximo Ascenso para Adherencia.

		<i>Predicción para</i>
<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Adherencia</i>
<i>(min)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(b)</i>
13,0	175,0	5,00039
Pendiente igual a 0. Cálculo detenido.		

Camino de Máximo Ascenso para Dureza variando el tiempo de curado.

		<i>Predicción para</i>
<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Dureza</i>
<i>(min)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(H)</i>
13,0	175,0	6,00077
13,1	173,431	5,79894
13,2	171,353	5,25237
13,3	169,011	4,25496
13,4	166,515	2,7487
13,5	163,921	0,698961

		<i>Predicción para</i>
<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Dureza</i>
<i>(min)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(H)</i>
13,0	175,0	6,00077
12,9	175,708	6,0338
12,8	175,741	6,03895
12,7	175,661	6,04157
12,6	175,817	6,03997
12,5	178,519	5,72512

Camino de Máximo Ascenso para Dureza variando la temperatura de curado.

		<i>Predicción para</i>			<i>Predicción para</i>
<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Dureza</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Dureza</i>
<i>(min)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(H)</i>	<i>(min)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(H)</i>
13,0	175,0	6,00077	13,0	175,0	6,00077
13,0677	174,0	5,89327	13,0577	176,0	6,02147
13,1213	173,0	5,712	13,2194	177,0	5,97032
13,1694	172,0	5,45699	13,2465	178,0	5,86693
13,2143	171,0	5,12831	13,2511	179,0	5,69651
13,2572	170,0	4,72604	13,2458	180,0	5,45653

Camino de Máximo Ascenso para Curado variando el tiempo.

		<i>Predicción para</i>
<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Curado</i>
<i>(min)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(Frotes)</i>
13,0	175,0	30,0039
12,9	175,361	30,2024
12,8	175,577	30,3571
12,7	175,737	30,4961
12,6	175,872	30,6252
12,5	175,998	30,746
12,4	176,12	30,8589
12,3	176,241	30,9641
12,2	176,36	31,0617
12,1	176,48	31,1517
12,0	176,6	31,234
11,9	176,72	31,3088
11,8	176,839	31,3759
11,7	176,959	31,4354
11,6	177,079	31,4873
11,5	177,198	31,5316
11,4	177,318	31,5683
11,3	177,438	31,5973
11,2	177,557	31,6188
11,1	177,677	31,6326
11,0	177,797	31,6388
10,9	176,48	31,1814
10,8	174,394	28,6911
10,7	172,306	24,0323

Camino de Máximo Ascenso para Curado variando el tiempo.

		<i>Predicción para</i>
<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Curado</i>
<i>(min)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(Frotes)</i>
13,0	175,0	30,0039
13,1	174,183	29,5594
13,2	170,858	25,2775
13,3	170,731	25,0747
13,4	168,459	19,5202

Camino de Máximo Ascenso para Curado variando la temperatura.

		<i>Predicción para</i>
<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Curado</i>
<i>(min)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(Fotes)</i>
13,0	175,0	30,0039
13,0188	174,9	29,9537
13,035	174,8	29,9036
13,0491	174,7	29,8529
13,0614	174,6	29,8008
13,0722	174,5	29,747

Camino de Máximo Ascenso para Curado variando la temperatura.

		<i>Predicción para</i>
<i>Tiempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Curado</i>
<i>(min)</i>	<i>(°C)</i>	<i>(Fotes)</i>
13,0	175,0	30,0039
12,978	175,1	30,0551
12,952	175,2	30,1086
12,921	175,3	30,166
12,8838	175,4	30,2288
12,8389	175,5	30,2991
12,7854	175,6	30,3778
12,7229	175,7	30,465
12,6525	175,8	30,5584
12,5761	175,9	30,6546
12,4961	176,0	30,7503
12,4142	176,1	30,8432
12,3313	176,2	30,9319
12,248	176,3	31,0157
12,1646	176,4	31,0943
12,0811	176,5	31,1678
11,9975	176,6	31,2359
11,914	176,7	31,2987
11,8304	176,8	31,3562
11,7468	176,9	31,4084
11,6633	177,0	31,4553
11,5797	177,1	31,4968
11,4962	177,2	31,5331
11,4126	177,3	31,564
11,3291	177,4	31,5896
11,2455	177,5	31,6099
11,162	177,6	31,6249
11,0784	177,7	31,6346
10,9948	177,8	31,6389
10,9684	177,9	31,6382