Análisis de la influencia de las proporciones de polvo virgen y recirculado en la tonalidad de pinturas de poliuretano metalizadas

Villa Fajardo, Carlos Eduardo[1] y Cáceres Díaz, Luis Alberto[2]

[1] Posgrado CIATEQ A.C. San Luis Potosí, Eje 126 225, Zona Industrial San Luis, 78395 San Luis, S.L.P., México
caedvifa@hotmail.com
[2] SECIHTI-CIATEQ A.C. San Luis Potosí, Eje 126 225, Zona Industrial San Luis, 78395 San Luis, S.L.P., México
luis.caceres@ciateq.mx

Resumen

Este estudio analizó como varía la tonalidad de pinturas de poliuretano metalizadas al modificar la proporción de polvo virgen y recirculado en el proceso de aplicación, empleando un DOE de tipo factorial fraccionado para garantizar un control preciso en parámetros clave como voltaje, corriente, débito, dilución y velocidad de la turbina, optimizando así la consistencia en la aplicación. Las muestras se aplicaron sobre paneles con pretratamiento estándar y se dividieron en cinco grupos según la proporción de polvo utilizado: 100% recirculado, 80% recirculado y 20% virgen, 50% recirculado y 50% virgen, 20% recirculado y 80% virgen, y 100% virgen. Los resultados mostraron diferencias en la tonalidad del recubrimiento, con mayor variación en las muestras que contienen más proporción de polvo recirculado, aunque todas las formulaciones cumplieron con los estándares de calidad establecidos en pruebas adicionales, incluyendo resistencia a la corrosión en cámara salina (superando las 800 horas), espesor y adherencia. Estos hallazgos destacan que, aunque el uso de polvo recirculado puede alterar la tonalidad, es posible emplearlo sin comprometer las propiedades funcionales del recubrimiento, permitiendo una reducción en el consumo de material virgen. Además, el DOE no solo permitió identificar los efectos de las proporciones de polvo, sino también establecer un enfoque controlado y repetible para mejorar la eficiencia del proceso. En conjunto, el estudio sugiere que incorporar polvo recirculado puede ofrecer beneficios económicos y ambientales, especialmente en aplicaciones donde las variaciones de tonalidad sean tolerables.

***Palabras clave*— Polvo recirculado, recubrimientos de poliuretano, tonalidad.**

Analysis of the influence of virgin and recycled powder ratios on the shade of metallic polyurethane paints

Abstract

This study analyzed how the color tone of metallic polyurethane paints varies with different proportions of virgin and recirculated powder in the application process, by using a fractional factorial experimental design to ensure precise control of key parameters such as voltage, current, flow rate, dilution, and turbine speed, thereby optimizing application consistency. Samples were applied to panels with standard pretreatment and divided into five groups based on the powder ratio: 100% recirculated, 80% recirculated and 20% virgin, 50% recirculated and 50% virgin, 20% recirculated and 80% virgin, and 100% virgin. The results showed differences in coating color tone, with greater variation observed in samples with higher recirculated powder content. However, all formulations met the established quality standards in additional tests, including corrosion resistance in a salt spray chamber (exceeding 800 hours), thickness, and adhesion. These findings highlight that although recirculated powder can affect the color tone, it is possible to use it without compromising the functional properties of the coating, enabling a reduction in virgin material consumption. Furthermore, the experimental design not only identified the effects of powder proportions but also established a controlled and repeatable approach to improve process efficiency. Overall, the study suggests that incorporating recirculated powder can offer economic and environmental benefits, particularly in applications where color tone variations are acceptable.

***Keywords*— Color tone, polyurethane coatings, recirculated powder.**

0

I. Introducción

La pintura electrostática es una técnica utilizada en diversos dispositivos y equipos para aplicar pintura de manera eficiente mientras se minimizan las emisiones y se maximiza la calidad del recubrimiento. Como se muestra en la Fig. 1 el proceso implica inducir carga electrostática en partículas de pintura, creando una fuerte atracción hacia la pieza de trabajo conectada a tierra, lo que resulta en una aplicación de recubrimiento más uniforme y eficiente [2]. Los sistemas avanzados incluyen características como válvulas que cambian

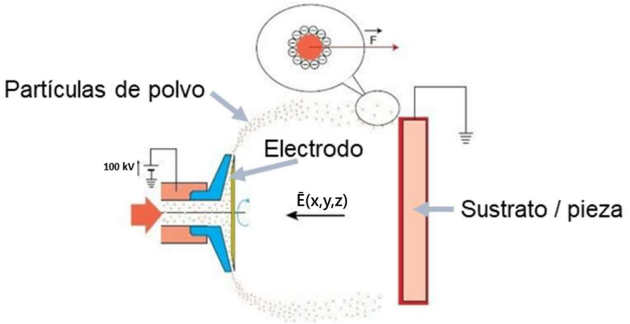

Fig. 1. Esquema del proceso de aplicación de pintura electrostática. [1]

de color, bombas y compartimentos de esclusas de aire de servicio para mejorar la eficiencia y minimizar el desperdicio de pintura durante los cambios de color [3].

El proceso de pintura del recubrimiento juega un papel crucial en diversas industrias, como la de automoción y la de fabricación de células solares. Se han desarrollado sistemas automatizados con múltiples pistolas pulverizadoras para mejorar la productividad y la calidad en los procesos de pintura por pulverización [4].

El proceso de pintura de recubrimiento implica aplicar un material sobre una superficie para formar una película continua o discontinua después del secado, con el objetivo de mejorar propiedades como resistencia a la intemperie, resistencia al desgaste y adhesión [5]. Este proceso es crucial en diversas industrias, incluidas la automotriz, la aeroespacial y la de productos de consumo cotidiano, donde se utilizan ampliamente materiales recubiertos. Se utilizan diferentes tipos de pinturas, como a base de solventes, a base de agua y sin solventes, según los requisitos específicos de la aplicación [6]. Técnicas como pistolas pulverizadoras sin aire y asistidas por aire se emplean comúnmente para atomizar el material de pintura, y los estudios se centran en la distribución del tamaño de las gotas, las velocidades y las distribuciones del espesor de la película para optimizar el proceso de pintura y mejorar el rendimiento del atomizador [5]. Además, los avances en tecnologías como la pintura por pulverización robótica y los procesos de electrodeposición han mejorado aún más la calidad, la productividad y el impacto ambiental de las aplicaciones de recubrimiento [7].

El proceso de pintura electrostática generalmente implica varios pasos clave para garantizar una aplicación de recubrimiento eficiente y eficaz. En primer lugar, la pieza de trabajo se prepara mediante un lavado para eliminar cualquier contaminante que pueda afectar la adherencia de la pintura [8]. Posteriormente, la pieza se seca completamente para eliminar cualquier humedad que pudiera interferir con el proceso de pintura [9]. La etapa real de pintura implica la aplicación de partículas de pintura cargadas hacia la pieza de trabajo, las cuales luego son aceleradas por un potente campo eléctrico para lograr una mejor cobertura y reducir el impacto ambiental [8]. Finalmente, es esencial curar o fijar la pintura en la pieza de trabajo, lo que a menudo se logra mediante la aplicación de calor para derretir las partículas de pintura seca y solidificar la pintura para un acabado duradero [9], La Fig. 2 muestra de forma esquemática cada una de las etapas que componen el proceso de pintura electrostática, siguiendo el trayecto real que realiza la pieza a lo largo de la línea. El proceso comienza en el área de carga (naranja), donde se colocan las piezas en el sistema transportador. A partir de ahí, las piezas ingresan a la lavadora (azul lavanda), donde se eliminan impurezas como polvo, grasa o residuos que podrían afectar la adherencia del recubrimiento. Luego, pasan por los sopladores (morado), que eliminan el exceso de agua antes de continuar al secador (verde), donde se asegura que la pieza quede completamente libre de humedad.

Una vez seca, la pieza atraviesa el enfriador (azul celeste), que regula su temperatura para evitar problemas en la aplicación de pintura. Posteriormente, llega al cuarto de cabina (gris), donde se encuentran dos cabinas de pintura. Estas permiten realizar un pivote operativo: mientras una cabina se utiliza para aplicar pintura, la otra puede limpiarse o prepararse para un cambio de color, lo cual es fundamental para mantener la eficiencia del proceso y evitar contaminación de colores.

Después de la aplicación del recubrimiento, la pieza entra al horno (rojo), donde se lleva a cabo el curado de la pintura por medio de calor, fundiendo las partículas aplicadas y asegurando un acabado duradero y resistente. Finalmente, las piezas pasan al área del checker (amarillo), donde se realiza una inspección final de calidad antes de su descarga o empaque.

La pintura electrostática de poliuretano es un tipo de recubrimiento ampliamente utilizado en diversas industrias debido a sus excelentes propiedades mecánicas, químicas y estéticas. Entre sus características más destacadas se encuentran su alta resistencia a la abrasión, gran durabilidad frente a la intemperie, buena elasticidad, y resistencia a productos químicos y radiación UV. Estas propiedades la hacen especialmente adecuada para aplicaciones donde se requiere un acabado de alta calidad y larga vida útil, como en componentes automotrices, mobiliario metálico, maquinaria industrial y estructuras expuestas a condiciones ambientales exigentes. Las investigaciones han demostrado que la aplicación de recubrimientos de pintura en polvo electrostático en el proceso de polimerización puede mejorar significativamente la calidad y durabilidad de las piezas metálicas [10]. Además, los poliuretanos son reconocidos por su versatilidad y diversas propiedades, como su resistencia a la intemperie, durabilidad,

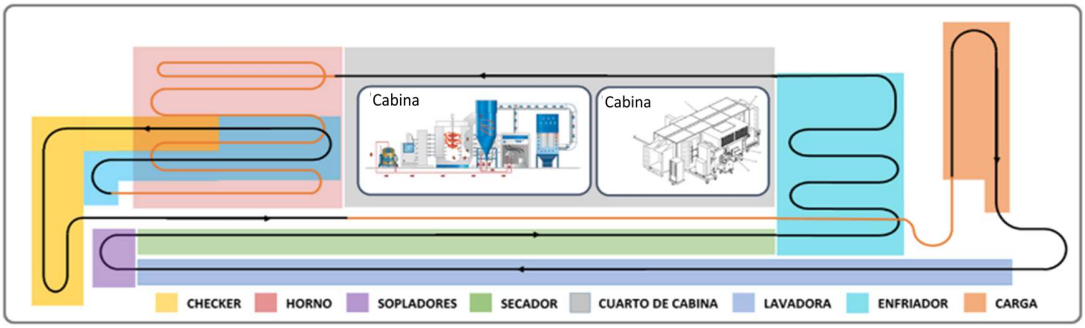

Fig. 2. Etapas de proceso de pintado electrostático. (Elaboración propia).

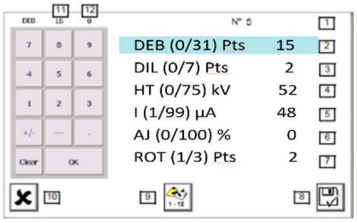

Fig. 3. Pantalla de configuración de parámetros. (Equipo Inobell, Sames)

flexibilidad y capacidad de adherirse bien a diferentes superficies, lo que los convierte en una opción popular para esculturas pintadas al aire libre debido a su atractivo estético y expectativas de rendimiento [11]. En general, la pintura de poliuretano electrostática desempeña un papel crucial a la hora de mejorar la calidad del producto, proporcionar durabilidad y permitir aplicaciones innovadoras en diversos campos.

Los parámetros de pintura electrostática juegan un papel crucial para lograr procesos de recubrimiento eficientes y efectivos. Varios factores, como la distancia de aplicación de la pulverización, la relación carga-masa (Q/M) y la orientación de la superficie objetivo, afectan significativamente la eficiencia de la deposición y la calidad del recubrimiento [12]. Además, los avances en los equipos de recubrimiento en polvo electrostático han permitido la aplicación precisa y reproducible de capas homogéneas, con la capacidad de apilar múltiples capas para lograr los espesores deseados, lo que en última instancia mejora la adhesión del polvo y la homogeneidad del recubrimiento [13]. Los generadores de alto voltaje son componentes esenciales en los sistemas de recubrimiento electrostático, particularmente en aplicaciones como las industrias automotriz y aeronáutica, donde se utilizan partículas cargadas para mejorar la cobertura de la pintura y al mismo tiempo reducir el uso de químicos y el impacto ambiental [14].

La configuración de las campanas de pintado electrostático Inobell ofrece un control preciso sobre varios parámetros cruciales. El débito (0-31 kg/hr) regula la cantidad de polvo suministrado. El voltaje (0-75 kV) ajusta la carga electrostática de las partículas de polvo, influyendo en su adherencia. La dilución (0-7 puntos) controla el flujo de aire que transporta el polvo desde el depósito hasta la pistola. La corriente (1-99 µA) es esencial para la seguridad y la estabilidad del proceso, previniendo sobrecalentamientos y asegurando una distribución uniforme. Finalmente, el ancho de abanico (0-100%) y la velocidad de rotación (1-3 puntos, equivalentes a 6500, 7500 y 8500 rpm) determinan el área de cobertura y la dispersión del polvo, respectivamente. El ajuste preciso de estos parámetros permite optimizar la calidad del acabado y la eficiencia del proceso, en la Fig. 3 se pude observar el menú de configuración de los parámetros para generar la receta de aplicación por cada una de las campanas a utilizar en el pintado electrostático.

La aplicación de pinturas de poliuretano metalizadas mediante procesos electrostáticos ofrece ventajas estéticas y funcionales, como durabilidad y resistencia. Sin embargo, la tonalidad final es crucial y se ve influenciada por factores del proceso, como voltaje, corriente, débito, dilución y velocidad de la turbina. Estos parámetros afectan la uniformidad y el acabado visual, planteando la interrogante de ¿cómo influyen en la tonalidad? Esta investigación analiza la incidencia de estos factores operativos para optimizar el proceso y asegurar acabados consistentes y de alta calidad.

Además, la proporción de polvo virgen y recirculado es relevante. La recirculación, además de ser sostenible y económica al reducir el uso de material virgen, puede alterar la tonalidad. Surge la pregunta de ¿cómo afectan estas proporciones a la tonalidad? Este análisis busca identificar proporciones que mantengan la homogeneidad tonal sin comprometer la estética, evaluando cómo las combinaciones de polvo virgen y recirculado afectan la consistencia y calidad visual.

Finalmente, el reciclaje de polvo plantea consideraciones económicas y ambientales. Si bien el polvo recirculado reduce residuos y mejora la eficiencia, existe la preocupación de que afecte la tonalidad o el acabado. Se plantea la pregunta de ¿cómo incorporar polvo recirculado sin comprometer la tonalidad?, clave para avanzar hacia una manufactura sostenible sin sacrificar la calidad estética.

Esta investigación analiza cómo los parámetros del pintado electrostático y las proporciones de polvo virgen y recirculado afectan la tonalidad, buscando optimizar el proceso para desarrollar estrategias viables económica y ambientalmente.

II. MÉTODOS

El presente estudio evalúa el impacto de los parámetros del proceso de pintado electrostático en la tonalidad de pinturas de poliuretano metalizadas, considerando diferentes proporciones de polvo virgen y recirculado. Comprender la influencia de estos parámetros en la tonalidad final del recubrimiento es crucial, ya que esta impacta tanto la estética como las posibles características funcionales del mismo. Por lo tanto, se requiere un análisis detallado para optimizar el proceso sin sacrificar la calidad visual.

Para garantizar la consistencia y comparabilidad de las muestras, se identificaron los parámetros de aplicación que afectan el comportamiento del polvo recirculado. Con este fin, se implementó un DOE factorial fraccionado, una técnica eficiente para explorar múltiples variables y sus interacciones. Este DOE, que se describe en la siguiente sección, permitirá investigar factores como voltaje, corriente, débito, dilución y velocidad de la turbina influyen en la tonalidad de los recubrimientos.

A. DOE.

El DOE utilizado es un diseño factorial fraccionado de 5 variables y 10 niveles en total, estructurado como un 2^{5-1} dos niveles para cada uno de los cinco factores principales. Esto significa que se combinarán todas las posibles combinaciones de dos niveles para los cuatro factores variables, mientras que uno de los factores se mantendrá fijo en dos niveles. Las variables consideradas son las siguientes:

- Voltaje: 2 niveles (60 kV, 65 kV).
- Corriente: 2 niveles (60 µA, 75 µA).
- Débito: 2 niveles (14 kg/h, 16 kg/h).
- Dilución: 2 niveles (2 pts, 3 pts).

- Velocidad de turbina: 2 niveles (6,500 rpm, 7,500 rpm).

Al utilizar este enfoque, se busca maximizar la cantidad de información obtenida de un número relativamente reducido de ensayos, permitiendo así un análisis exhaustivo de los efectos de cada parámetro y sus interacciones.

B. Establecimiento de Condiciones Controladas.

Para garantizar la validez de los resultados, es fundamental mantener constantes otros factores relevantes del proceso. Las condiciones que se mantendrán constantes incluyen:

- Distancia de la pistola al sustrato: 12.5 pulgadas.
- Temperatura del cuarto de aplicación: 23 °C.
- Temperatura del horno de curado: 375 °F.
- Ancho de abanico: 75%.
- Velocidad de oscilación de las pistolas: 26 ciclos por minuto.

C. Ejecución de los Experimentos.

Durante la ejecución de los experimentos, cada configuración experimental se llevará a cabo con el objetivo de observar y medir cómo influyen los parámetros en las características del recubrimiento resultante. Las variables de salida que se analizarán incluyen:

- Espesor del recubrimiento: medido en milésimas (de 2.5 a 7.0 milésimas).
- Adherencia: evaluada en una escala de 0 (sin adherencia) a 1 (con adherencia).
- Tonalidad: que se registrará para analizar su variabilidad en función de los diferentes parámetros aplicados.

La tabla I presenta una organización clara de las variables implicadas en el proceso de pintado electrostático, abarcando categoría de variables fijas, móviles y de salida. Se detallan las condiciones experimentales que se mantienen constantes, así como los parámetros que se ajustan durante las pruebas para evaluar su impacto en el recubrimiento. Además, se incluyen las propiedades del recubrimiento que se analizarán al concluir el experimento.

TABLA I
VARIABLES DEFINIDAS PARA EL DOE. ELABORACIÓN PROPIA.

Variables Constantes	Especificación	Variables Móviles	Especificación	Variables de salida	Especificación
Temperatura cuarto de aplicación	23°c	Voltaje	0 a 75 kV	Tonalidad	-3 a 3
Distancia de pistola a sustrato	12.5 in	Corriente	1 a 99 µA	Espesor	2.5 a 7.0 mil
Temperatura horno de curado	375 °F	Débito	0 a 31 kg/hr	Adherancia	0 / 1
Ancho de abanico	75%	Dilusión	0 a 7 pts.		
Velocidad de oscilación	26 ciclos/min	Velocidad turbina	1 a 3 pts.		

La forma de medir la tonalidad es con un espectrofotómetro, se tomará como “0” el valor ideal de tonalidad, de $0 > x \geq -3$ y $0 < x \leq 3$ como valores aceptables, $-3 > x \geq -6$ y $3 < x \leq 6$ como valores aceptables bajo desviación $-6 > x \geq -12$ y $6 < x \leq 12$ como valores no aceptables como se aprecia en la Fig. 4.

Grado de Similitud	Color Chip
$9 < x \leq 12$	✗
$6 < x \leq 9$	✗
$3 < x \leq 6$	✓
$0 < x \leq 3$	✓
0	✓
$0 > x \geq -3$	✓
$-3 > x \geq -6$	✓
$-6 > x \geq -9$	✗
$-9 > x \geq -12$	✗

Fig. 3. Valores aceptables vs no aceptables de color chip. Elaboración propia.

D. Análisis de Datos.

Una vez completados los experimentos, se llevará a cabo un análisis estadístico detallado para evaluar la influencia de los parámetros experimentales y sus interacciones. Se utilizará el análisis de varianza (ANOVA), que es una técnica estadística robusta que permite descomponer la variabilidad total de los datos en sus componentes, facilitando la identificación de los factores más significativos. Este enfoque permitirá determinar cuáles combinaciones de parámetros tienen el mayor impacto en las características del recubrimiento, y cómo la variabilidad entre los grupos afecta los resultados. Además, ANOVA proporcionará una medición precisa de la significancia de los efectos observados, lo que es crucial para tomar decisiones informadas en la optimización del proceso.

El análisis no solo permitirá identificar las combinaciones óptimas de parámetros, sino que también ayudará a descubrir interacciones complejas entre los factores que podrían no ser evidentes a simple vista. Esto es esencial para entender cómo los diferentes parámetros influyen de manera conjunta en el rendimiento del recubrimiento. A través de este enfoque, se podrá maximizar la eficiencia del proceso y garantizar una calidad superior en la aplicación de la pintura, lo que facilitará la mejora continua en futuras aplicaciones.

III. RESULTADOS

El análisis de la Tabla II revela una evolución en la optimización de la tonalidad hacia un valor objetivo de 0. Los experimentos iniciales (1-16), con alto débito (18-24 kg/h) y dilución (4-6 puntos), mostraron tonalidades alejadas del objetivo, indicando un control impreciso. La reducción del débito (14-16 kg/h) y la dilución (2-3 puntos) en los experimentos 17-32 demostró ser crucial, acercando las tonalidades a valores entre -2.3 y -2.95. Dentro de este rango, la combinación de 60 kV y 75 µA ofreció la mayor consistencia y valores más cercanos a 0, independientemente del débito y la dilución dentro de los rangos inferiores. Con base en esto la reducción de débito y dilución, combinada con 60 kV y 75 µA, optimiza el control de la tonalidad.

TABLA II
DOE ENTRADAS VS SALIDAS. ELABORACIÓN PROPIA.

	Entradas					Salidas		
Ítem	Voltaje (kV)	Corriente (µA)	Débito (kg/h)	Dilución (pts)	Velocidad turbina (rpm)	Adherencia	Espesor	Tonalidad
1	50	60	18	4	6,500	1	3.2	-3.3
2	70	60	18	4	7,500	1	3.7	-3.1
3	50	75	18	4	6,500	1	4.0	-3.5
4	70	75	18	4	7,500	1	3.8	-3.2
5	50	60	24	4	6,500	1	4.5	-8.7
6	70	60	24	4	7,500	1	3.7	-8.9
7	50	75	24	4	6,500	1	4.2	-8.5
8	70	75	24	4	7,500	1	3.5	-8.8
9	50	60	18	6	6,500	1	3.6	-3
10	70	60	18	6	7,500	1	3.3	-3.4
11	50	75	18	6	6,500	1	3.4	-3.2
12	70	75	18	6	7,500	1	3.9	-3.5
13	50	60	24	6	6,500	1	4.1	-9
14	70	60	24	6	7,500	1	3.7	-8.6
15	50	75	24	6	6,500	1	4.3	-8.8
16	70	75	24	6	7,500	1	3.6	-8.4
17	60	60	14	2	6,500	1	2.5	-2.95
18	65	60	14	2	7,500	1	2.8	-2.9
19	60	75	16	2	6,500	1	2.6	-2.53
20	65	75	16	2	7,500	1	2.9	-2.75
21	60	60	14	2	6,500	1	2.9	-2.93
22	65	60	14	2	7,500	1	3.1	-2.88
23	60	75	16	2	6,500	1	2.8	-2.31
24	65	75	16	2	7,500	1	2.6	-2.7
25	60	60	14	3	6,500	1	2.8	-2.85
26	65	60	14	3	7,500	1	2.6	-2.8
27	60	75	16	3	6,500	1	3.0	-2.54
28	65	75	16	3	7,500	1	2.8	-2.6
29	60	60	14	3	6,500	1	2.7	-2.83
30	65	60	14	3	7,500	1	2.8	-2.78
31	60	75	16	3	6,500	1	2.9	-2.49
32	65	75	16	3	7,500	1	2.6	-2.58

A. Análisis de Varianza.

El análisis de la Fig. 5 revela la influencia individual de cinco variables en la tonalidad de las pinturas. Se observa una tendencia general: a mayor valor de la variable en el eje x, menor es la tonalidad (descenso en la línea de puntos). Sin embargo, la magnitud de esta influencia varía.

El débito (kg/h) muestra una fuerte influencia negativa. Al aumentar de 14 a 24 kg/h, la tonalidad disminuye drásticamente, asociándose un mayor débito con tonalidades más bajas. El voltaje (kV) exhibe una influencia negativa similar. Un incremento de 50 a 70 kV se relaciona con una disminución sustancial en la tonalidad. Ambos parámetros, débito y voltaje, presentan pendientes pronunciadas, subrayando su fuerte impacto.

La dilución (pts) también muestra una correlación negativa, pero el cambio es menor comparado con débito y voltaje. Al aumentar la dilución de 2 a 6 puntos, la tonalidad disminuye, aunque menos pronunciadamente. La dilución ejerce una influencia negativa, pero en menor medida.

La velocidad de la turbina (rpm) presenta un comportamiento diferente. La gráfica muestra una variación mínima en la tonalidad al aumentar la velocidad de 6500 a 7500 rpm. Esta escasa variación y la falta de una tendencia clara sugieren que, en el rango estudiado, la velocidad de la turbina no influye significativamente en la tonalidad.

La corriente (µA) también muestra una influencia negativa. Un aumento de 60 a 75 µA se relaciona con una disminución en la tonalidad, similar a débito, voltaje y dilución. Sin embargo, su influencia es de magnitud intermedia, menor que la de débito y voltaje, pero mayor que la de dilución.

Las gráficas confirman la influencia dominante de débito y voltaje, la influencia intermedia de la corriente, la menor influencia de la dilución y la falta de significancia de la velocidad de la turbina. Las gráficas (a) y (b) (Débito y Voltaje) muestran pendientes pronunciadas, (c) (Dilución) una pendiente suave, (d) (Velocidad de Turbina) casi horizontal y (e) (Corriente) una pendiente intermedia.

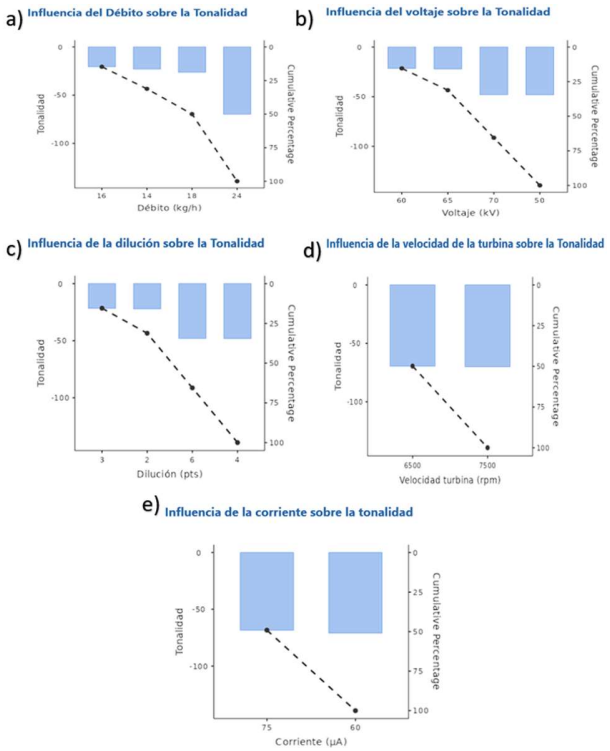

Fig. 4. Influencia individual de cada una de las variables sobre la tonalidad. Elaboración propia.

La Tabla III presenta los resultados de un Análisis de Varianza (ANOVA) diseñado para evaluar la influencia de Voltaje (kV), Corriente (µA), Débito (kg/h) y Dilución (pts), así como sus interacciones, sobre la Tonalidad. La Velocidad de la Turbina fue excluida por análisis preliminares que demostraron su insignificancia.

El ANOVA particiona la variabilidad total de la Tonalidad. La Suma de Cuadrados representa la variabilidad explicada por cada fuente; los grados de libertad (df) indican el número de niveles menos uno; el Cuadrado Medio es la Suma de Cuadrados dividida por los grados de libertad; el estadístico F es la relación entre el Cuadrado Medio de cada fuente y el de los Residuales; y el valor p (P) indica la significancia estadística ($p < 0.05$ se considera significativo).

El modelo global muestra al menos una variable o interacción con efecto significativo (varios $p < 0.05$). Los efectos principales de Voltaje ($p < .001$), Débito ($p < .001$) y Corriente ($p < .001$) son altamente significativos, indicando un impacto considerable en la Tonalidad. La Dilución ($p = 0.177$) no presenta un efecto principal estadísticamente significativo.

Se identificaron interacciones significativas: Voltaje * Corriente ($p = 0.011$), Corriente * Débito ($p < .001$) y Voltaje * Débito * Dilución ($p < .001$). Las demás interacciones (Voltaje * Dilución, Corriente * Dilución, Débito * Dilución, y las de orden superior) no resultaron significativas ($p > 0.05$).

El Débito y el Voltaje individualmente, y las interacciones entre Voltaje y Corriente, Corriente y Débito, y la triple interacción Voltaje * Débito * Dilución, influyen significativamente en la Tonalidad. El Débito y el Voltaje ejercen un impacto directo considerable. Las interacciones Voltaje * Corriente y Corriente * Débito muestran una dependencia mutua. La interacción triple sugiere que el efecto combinado de Voltaje y Débito se modula según la Dilución. La exclusión de la Velocidad de la Turbina confirma su falta de significancia.

TABLA III
ANOVA DE LA TONALIDAD. ELABORACIÓN PROPIA.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Voltaje (kV)	86.08742	3	28.69581	8287.598	< .001
Corriente (µA)	0.19845	1	0.19845	57.314	< .001
Débito (kg/h)	118.43383	2	59.21691	17102.357	< .001
Dilución (pts)	0.01502	2	0.00751	2.170	0.177
Voltaje (kV) ✻ Corriente (µA)	0.05823	2	0.02911	8.408	0.011
Voltaje (kV) ✻ Débito (kg/h)	0.01563	1	0.01563	4.513	0.066
Corriente (µA) ✻ Débito (kg/h)	0.10563	1	0.10563	30.505	< .001
Voltaje (kV) ✻ Dilución (pts)	0.01385	2	0.00693	2.000	0.198
Corriente (µA) ✻ Dilución (pts)	0.00703	2	0.00351	1.014	0.405
Débito (kg/h) ✻ Dilución (pts)	6.25e−4	1	6.25e−4	0.181	0.682
Voltaje (kV) ✻ Corriente (µA) ✻ Débito (kg/h)	0.00563	1	0.00563	1.625	0.238
Voltaje (kV) ✻ Corriente (µA) ✻ Dilución (pts)	0.01385	2	0.00692	2.000	0.198
Voltaje (kV) ✻ Débito (kg/h) ✻ Dilución (pts)	0.39062	1	0.39062	112.816	< .001
Corriente (µA) ✻ Débito (kg/h) ✻ Dilución (pts)	6.25e−4	1	6.25e−4	0.181	0.682
Voltaje (kV) ✻ Corriente (µA) ✻ Débito (kg/h) ✻ Dilución (pts)	6.25e−4	1	6.25e−4	0.181	0.682
Residuals	0.02770	8	0.00346		

B. Receta de Aplicación Optimizada.

La optimización de la tonalidad se realizó mediante un DOE riguroso y un análisis de varianza (ANOVA), identificando las variables influyentes y sus configuraciones óptimas. Tras experimentación y análisis estadístico, se determinó una configuración óptima fija para ciertas variables, incorporándose a la receta de aplicación ideal. Los valores fijos son: Dilución (3 pts), Voltaje (60 kV), Corriente (75 µA) y Apertura (75%). Estos valores no son arbitrarios, sino el resultado del DOE y el ANOVA, que demostraron que cualquier variación dentro del rango estudiado resulta en cambios no significativos en la tonalidad. Por lo tanto, se establecen como puntos de referencia fijos para asegurar consistencia y optimización.

La única variable con variación controlada es el Débito (kg/h), la cual no es aleatoria, sino que se ajusta según la posición de las pistolas respecto al extractor. Las pistolas más cercanas al extractor, debido a una mayor concentración del material a extraer, requieren un mayor débito para lograr una cobertura y tonalidad uniformes. Por el contrario, las pistolas más alejadas requieren un débito menor para evitar la sobre aplicación. Se establecieron los siguientes niveles de débito diferenciados: 13 kg/h y 14 kg/h para las pistolas más alejadas, 15 kg/h para las intermedias y 17 kg/h para las más cercanas. Esta diferenciación compensa las variaciones en la concentración del material, asegurando una tonalidad homogénea en toda la pieza. Esta configuración optimizada se resume en la Tabla 4 que representa la receta de aplicación.

TABLA IV
RECETA DE APLICACIÓN OPTIMIZADA. ELABORACIÓN PROPIA.

Número Campana	Débito (kg/h)	Dilusión (pts)	Voltaje (kV)	Corriente (µA)	Apertura (%)	Rotación (rpm)
1	13	3	60	75	75	7500
2	13	3	60	75	75	7500
3	14	3	60	75	75	7500
4	14	3	60	75	75	7500
5	14	3	60	75	75	7500
6	14	3	60	75	75	7500
7	14	3	60	75	75	7500
8	14	3	60	75	75	7500
9	15	3	60	75	75	7500
10	15	3	60	75	75	7500
11	17	3	60	75	75	7500
12	17	3	60	75	75	7500

C. Débito: Factor Clave en la Generación de Polvo Recirculado.

El DOE basado en ANOVA, inicialmente enfocado en optimizar la tonalidad mediante variables como Débito, Voltaje, Dilución, Corriente y Apertura, reveló un efecto secundario importante: la generación de polvo recirculado. Se observó que un mayor débito aumentaba la cantidad de polvo recirculado, lo que llevó a explorar la posibilidad de integrarlo de manera controlada en el proceso, transformando un residuo en un recurso útil.

Después de optimizar los parámetros para la tonalidad (Dilución 3 pts, Voltaje 60 kV, Corriente 75 µA, Apertura 75% y débito ajustado según la posición de las pistolas), se planteó investigar en qué proporción se podía añadir polvo recirculado

a)

CIE1976	D65 10°	CWF 10°	A 10°
ΔE^*_{ab}	10.60	10.56	10.49
ΔL^*_{ab}	-10.42	-10.32	-10.27
Δa^*	0.13	0.07	0.66
Δb^*	1.95	2.24	2.06

b)

CIE1976	D65 10°	CWF 10°	A 10°
ΔE^*_{ab}	5.02	5.00	4.99
ΔL^*_{ab}	-5.00	-4.97	-4.96
Δa^*	-0.01	-0.01	0.13
Δb^*	0.48	0.55	0.50

c)

CIE1976	D65 10°	CWF 10°	A 10°
ΔE^*_{ab}	3.34	3.33	3.32
ΔL^*_{ab}	-3.32	-3.30	-3.29
Δa^*	0.02	0.00	0.12
Δb^*	0.41	0.47	0.43

d)

CIE1976	D65 10°	CWF 10°	A 10°
ΔE^*_{ab}	2.55	2.55	2.55
ΔL^*_{ab}	-2.55	-2.55	-2.55
Δa^*	-0.04	-0.03	-0.02
Δb^*	0.06	0.06	0.05

sin comprometer la calidad. Se evaluó la interacción entre polvo virgen y recirculado en distintas proporciones, buscando mantener o mejorar características como cobertura, uniformidad y adherencia.

Para medir el impacto en la tonalidad, se utilizaron cinco combinaciones de polvo (virgen y recirculado en diversas proporciones) y se aplicaron con los parámetros optimizados. La tonalidad de los recubrimientos se midió con un

espectrofotómetro, cuantificando las diferencias cromáticas entre las mezclas y el control. El análisis permitió determinar si la adición de polvo recirculado afectaba significativamente la tonalidad, estableciendo una correlación entre la proporción de polvo recirculado y las variaciones cromáticas.

Este enfoque ofrece una forma de reutilizar el polvo recirculado sin sacrificar la calidad, optimizando recursos y reduciendo el desperdicio.

D. Resultados de Espectrofotometría

La Fig. 6 muestra los resultados de espectrofotometría, utilizando el espacio de color CIE L*a*b* bajo el iluminante D65 (luz diurna promedio), evaluó el impacto de diferentes proporciones de polvo recirculado en la tonalidad. Se analizaron cuatro combinaciones: 100% recirculado (a), 80% recirculado (b), 50% recirculado (c) y 20% recirculado (d), comparándolas implícitamente con una muestra de 100% polvo virgen.

La muestra de 100% recirculado (a) mostró la mayor desviación cromática (ΔE*ab = 10.60), con una notable disminución en la luminosidad (ΔL*ab = -10.42), indicando que es significativamente más oscura que el polvo virgen. Las diferencias en cromaticidad (Δa* y Δb*) fueron menores.

Al reducir la proporción de recirculado al 80% (b), la diferencia de color disminuyó a la mitad (ΔE*ab = 5.02), manteniendo la disminución en luminosidad (ΔL*ab = -5.00) como el factor dominante. Los cambios en a* y b* fueron mínimos.

Con una proporción igual de polvo virgen y recirculado (c), la diferencia de color continuó disminuyendo (ΔE*ab = 3.34), con una correspondiente disminución en la luminosidad (ΔL*ab = -3.32). Los componentes a* y b* mostraron cambios mínimos.

La muestra con 20% de recirculado (d) presentó la menor diferencia de color (ΔE*ab = 2.55), con una menor disminución en la luminosidad (ΔL*ab = -2.55). Los cambios en a* y b* fueron casi imperceptibles.

Los resultados demuestran una correlación directa entre la proporción de polvo recirculado y la diferencia de color respecto al polvo virgen. A mayor proporción de recirculado, mayor es la desviación en la tonalidad, principalmente debido a una disminución en la luminosidad. Las diferencias en cromaticidad son comparativamente menores. Este análisis cuantitativo permite determinar los límites aceptables de adición de polvo recirculado sin afectar significativamente la apariencia del recubrimiento.

La Fig. 7 analiza el impacto del polvo recirculado en la luminosidad (ΔL*ab) con diferentes mezclas. Los resultados muestran que, a mayor proporción de recirculado, menor luminosidad. El ΔL*ab disminuye a medida que aumenta el recirculado: a (-10.42, más oscuro), b (-5.00), c (-3.32), d (-2.55, más cercano al estándar). Las variaciones en cromaticidad son mínimas, destacando que el principal efecto del polvo recirculado es en la reducción de luminosidad.

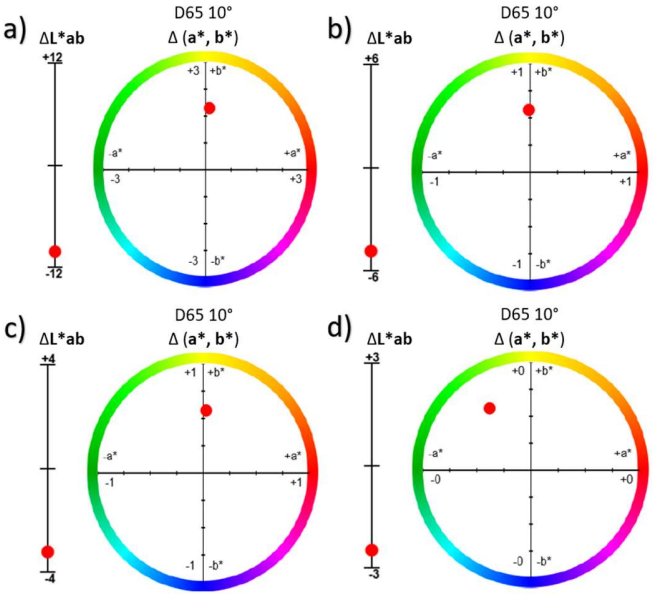

Fig. 7. Impacto del porcentaje de polvo recirculado sobre la luminosidad. Elaboración propia.

La Fig. 8 muestra el impacto del polvo recirculado en los componentes del espacio CIE Lab*. La gráfica de ΔLab revela una disminución de luminosidad a medida que aumenta el porcentaje de recirculado, indicando un oscurecimiento progresivo. Las mezclas con 20% de recirculado se mantienen dentro del rango aceptable, mientras que al 50%, 80% y 100% superan este umbral, mostrando cambios perceptibles no deseados. La gráfica de ΔEab confirma esta tendencia, con un aumento significativo en la diferencia de color a partir del 50% de recirculado. Las variaciones en Δa* y Δb* son menores.

E. Ensayos de Cámara Salina

El estudio evaluó la resistencia a la corrosión de recubrimientos de polvo poliuretano con hasta un 20% de polvo recirculado, tras verificar su aptitud mecánica previa. Paneles con 100% polvo virgen (P1), 100% polvo recirculado (P3) y una mezcla 50/50 (P2) se sometieron a ensayos de cámara salina (ASTM B117). La Tabla V resume los resultados clave.

En cuanto al espesor promedio, los tres paneles superaron el umbral mínimo, registrando 2.08 mils (P1), 2.77 mils (P2) y 2.22 mils (P3) tras 803 horas de exposición. Este cumplimiento inicial es fundamental para una protección anticorrosiva eficaz. La adherencia (Tape Adhesion Rating) fue excelente (SA) en los tres casos al final del ensayo (803 horas), indicando una fuerte unión al sustrato incluso tras la exposición prolongada a la niebla salina.

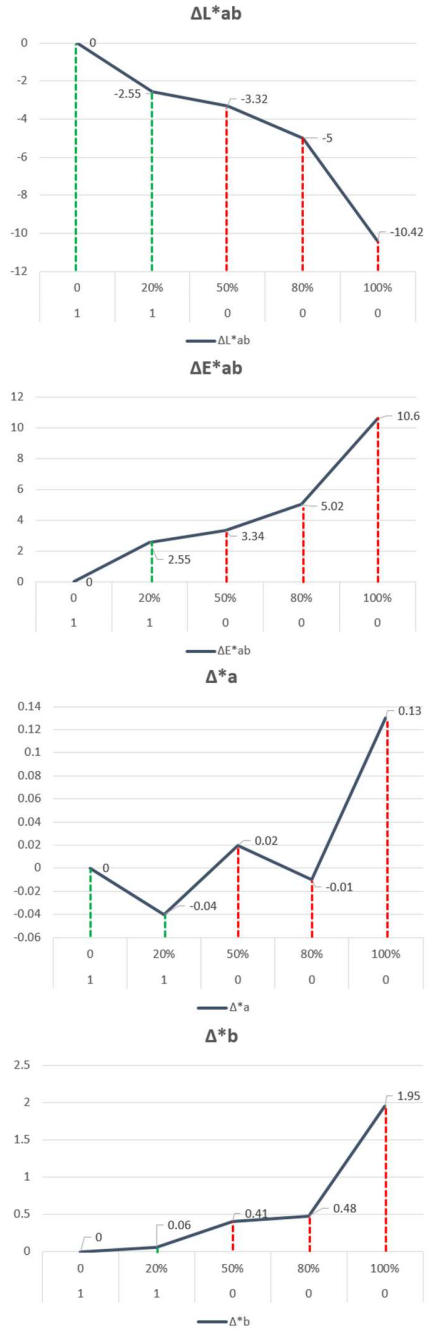

Fig. 8. Cambio de los componentes del espacio de color CIE L*a*b* en función del porcentaje de polvo recirculado añadido. Elaboración propia.

La resistencia al óxido (Rust Rating) fue sobresaliente, con una calificación de "Sin óxido" para los tres paneles al final del ensayo. Este dato cuantitativo se correlaciona directamente con las fotografías de la Fig. 9, no se aprecia formación de óxido visible en la superficie ni en las líneas de corte realizadas para inducir la corrosión.

TABLA V
RESULTADOS DE PRUEBAS DE CÁMARA SALINA

PRODUCTO	TECNOLOGIA	HORAS DE EXPOSICION	INICIO DE PRUEBA		FIN DE PRUEBA	
			FECHA	CONTADOR	FECHA	CONTADOR
PUM70107	Polvo Poliuretano	803	02 OCT 2024	89,496	05 NOV 2024	90,299

ASTM B-117

# PANEL	HRS. DE PRUEBA	ESPESOR PROM. (MILS)	RATING NUMBER	Desprendim. a lo ancho de la línea (mm)	Max Creep from Scribe (mm)	Tamaño blister	Frecuencia	Rust rating	Tape Adhesion Rating
1	475	2.08	10	0.00	0.00	10	N	Sin óxido	5A
2	537	2.77	9	0.229	6	8	N	Sin óxido	5A
3	803	2.22	10	0.00	0.00	10	N	Sin óxido	5A
Especific. prueba	800	No especificado	No especif.	No especificado	No especificado		No especif.	No especif.	No especif.
Métodos de prueba:	ASTM B117	ASTM D 7091-13	ASTM D1654, METODO A				ASTM D 714	ASTM D-610	
Notas	Blister Size Scale: 10 No Blistering 8 Blisters Easily Seen by Unaided Eye 6,4,2 See Photographic Standards in ASTM D 714. Blister Frequency: N=None, F=Few, M=Medium, MD=Medium Dense, D=Dense.								

Los datos de la Tabla V (espesor, adherencia, ausencia de óxido) se respaldan con la evidencia visual (sin desprendimiento, corrosión visible ni ampollas), validando la efectividad del recubrimiento de polvo poliuretano, incluso con 100% de polvo recirculado, frente a condiciones corrosivas severas.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio investigó la optimización del proceso de pintado electrostático con pintura de poliuretano, centrándose en la influencia de parámetros como voltaje, corriente, débito, dilución y velocidad de la turbina en la tonalidad del acabado. Mediante un DOE se identificaron las relaciones entre estos parámetros y la tonalidad, permitiendo desarrollar una configuración optimizada para la aplicación. El DOE resultó crucial para garantizar la consistencia de la tonalidad dentro de un rango aceptable, confirmando que existe una relación significativa entre los parámetros de aplicación y el resultado final.

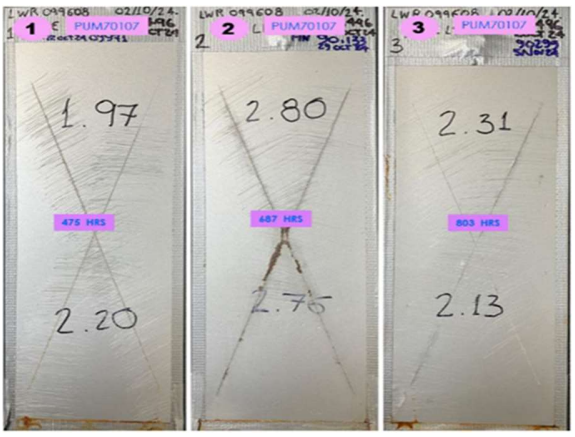

Fig. 9. Evidencia fotográfica de las muestras evaluadas en cámara salina. Elaboración propia.

Además de la optimización mediante el DOE, se exploró el uso de polvo recirculado como estrategia para optimizar recursos. Se analizó el impacto de la adición de este polvo en la tonalidad, determinándose que hasta un 20% de adición es viable, manteniéndose dentro de los límites de tonalidad aceptables definidos previamente por el DOE.

Finalmente, se realizaron pruebas de cámara salina para asegurar que la adición del 20% de polvo recirculado no afectara negativamente la resistencia a la corrosión del recubrimiento. Los resultados de estas pruebas confirmaron que el uso de polvo recirculado dentro de este límite no compromete la durabilidad del recubrimiento. En conjunto, el estudio logró optimizar el proceso de pintado, validar la influencia de los parámetros de aplicación en la tonalidad, y demostrar la viabilidad del uso de polvo recirculado sin sacrificar la calidad del acabado ni la resistencia a la corrosión.

V. AGRADECIMIENTOS

Villa Fajardo Carlos Eduardo, agradece al Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ) Unidad San Luis Potosí, así como a la empresa Mabe por el apoyo en la realización de este proyecto

VI. REFERENCIAS

[1] https://www.sames.com/usa/en/technologies-corona-charge.html
[2] Elliott, Stephen, Bennett., Srinivasan, Venkatesh, Kannan., Menzie, Mark, Joseph. (2020). Electrostatic painting device and method for electrostatic painting of workpieces.
[3] Scott, J., Clifford., Waineo, Douglas, B. (2019). Robotic electrostatic painting apparatus.
[4] M., N., Rudzuan., Wan, Khairunizam., I, Zunaidi., Zuradzman, M., Razlan., Abu, Bakar, Shahriman., A, R, Rozman., A, Shaharizal. (2019). Development of Automated Spray-Painting System for Anti-Static Coating Process. doi: 10.1088/1757-899X/557/1/012001
[5] Qiaoyan, Ye., Bo, Shen., Oliver, Tiedje., Thomas, Bauernhansl., Joachim, Domnick. (2014). Numerical and experimental study of spray coating using air-assisted high pressure atomizers. Atomization and Sprays, doi: 10.1615/ATOMIZSPR.2015010791
[6] Swapan, Kumar, Ghosh. (2006). Functional Coatings and Microencapsulation: A General Perspective. doi: 10.1002/3527608478.CH1
[7] Swetha, Danthala., S., V., S., Rao., Boggarapu, Nageswara, Rao., Kasiprasad, Mannepalli. (2021). Multi-objective optimization with modified Taguchi approach to specify optimal robot spray painting process parameters. International Journal of Nonlinear Analysis and Applications, doi: 10.22075/IJNAA.2021.5193
[8] Jun-Hyuk, Choi., Byong, Jo, Hyon., Jin, Hong, Kim., Joon, Sung, Park. (2015). Development of single phase PFC module for electrostatic coating machine applications. doi: 10.1109/ICIEA.2015.7334394
[9] U., Rothgordt. (1977). Electrostatic Printing Methods. doi: 10.1007/978-3-642-81284-2_40
[10] D, T, Walter, Quezada., F, M, Walter, Quezada., Gilberto, D., Hernández., Wilson, Corrales., S, Erenio, González. (2018). Variables Control in the Application of Electrostatic Powder Paint: An Alternative to Reduce the Defective Fraction of Metal Parts. doi: 10.23956/IJERMT.V7I3.10
[11] Catherine, Defeyt., Catherine, Defeyt., Julia, Langenbacher., Rachel, Rivenc. (2017). Polyurethane coatings used in twentieth century outdoor painted sculptures. Part I: comparative study of various systems by means of ATR-FTIR spectroscopy. Heritage Science, doi: 10.1186/S40494-017-0124-7
[12] Robson, Shigueaki, Sasaki., Mauri, Martins, Teixeira., Haroldo, Carlos, Fernandes., Paulo, Marcos, de, Barros, Monteiro., Denílson, Eduardo, Rodrigues., Cleyton, Batista, de, Alvarenga. (2013). Parameters of electrostatic spraying and its influence on the application efficiency. doi: 10.1590/S0034-737X2013000400005.
[13] Nicolas, Vogel., Steffen, Dipl.-Ing., Lang. (2023). Electrostatic Powder Coating as a Novel Process for High Voltage Insulation Applications. Advanced Engineering Materials, doi: 10.1002/adem.202300465
[14] Jun-Hyuk, Choi., Byong, Jo, Hyon., Jin, Hong, Kim., Joon, Sung, Park. (2015). Development of single phase PFC module for electrostatic coating machine applications. doi: 10.1109/ICIEA.2015.7334394