

PROYECTO DE REDUCCIÓN DE DEFECTOS EN EL PROCESO DE PINTURA EN LA FABRICACIÓN DE GUITARRAS

DEFECT REDUCTION PROJECT IN THE COATING PROCESS FOR GUITAR MANUFACTURING

A. González Carrasco¹
L. Cardoza Avendaño²
V. M. Juárez Luna³
J. I. Aguilar Duque⁴

RESUMEN

El presente estudio aborda la reducción de defectos en el proceso de pintura de cuerpos de guitarra en una empresa dedicada a la fabricación de instrumentos musicales. A partir de la semana 17, se observó una caída significativa en el Yield del área de pintura, identificándose la contaminación como uno de los principales defectos, con un impacto del 0.973% en la producción. Se utilizó la metodología DMAIC de Six Sigma complementada con herramientas de calidad como diagramas de Pareto y pruebas de hipótesis. El análisis incluyó auditorías en cabinas de pintura, donde se detectaron fallas en los controles de limpieza y mantenimiento de filtros y chimeneas. Las pruebas de hipótesis mostraron una reducción significativa en la proporción de defectos tras la aplicación de estas medidas. Aunque no se identificó una única causa raíz del problema, se logró estabilizar el proceso y reducir la variabilidad en la proporción de defectos. Además, en este estudio se destaca la importancia de la estandarización y el monitoreo continuo en la manufactura de productos de alta calidad.

ABSTRACT

This study addresses defect reduction in the guitar body coating process at a musical instrument manufacturing company. Starting in week 17, a significant decrease in the coating area's Yield was observed, identifying contamination as one of the main defects, with an impact of 0.973% on production. The Six Sigma DMAIC methodology was used complemented by quality tools such as Pareto charts and hypothesis testing. The analysis included audits in coating booths, where deficiencies in cleaning controls and maintenance of filters and chimneys were detected. Hypothesis testing showed a significant reduction in defect rates after applying these measures. Although no single root cause of the problem was identified, the process was stabilized, and variability in defect rates was reduced. Additionally, this study highlights the importance of standardization and continuous monitoring in the manufacturing of high-quality products.

ANTECEDENTES

En la industria manufacturera de instrumentos musicales, el proceso de pintura es determinante para lograr un acabado estético y garantizar la durabilidad del producto final. La presencia de partículas extrañas en las capas de pintura afecta no solo la apariencia, sino también la funcionalidad del instrumento, lo que se traduce en retrabajos y un incremento en los costos de producción (Montgomery, 2020). Dado que la industria busca optimizar procesos mediante metodologías de mejora continua, es crucial implementar estrategias de control de calidad para reducir la variabilidad y aumentar la eficiencia operativa (Antony et al., 2017).

¹Profesor de Tiempo Completo. Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño. UABC. agonzalez48@uabc.edu.mx

²Profesora de Tiempo Completo. Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño. UABC. lcardoza@uabc.edu.mx

³Profesor de Tiempo Completo. Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño. UABC. juarezv@uabc.edu.mx

⁴Director de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño. UABC. julian.aguilar@uabc.edu.mx

El problema central de este estudio radica en la contaminación durante la aplicación de pintura, la cual se atribuye a deficiencias en los sistemas de filtrado, inadecuados procedimientos de limpieza o a la exposición del producto a partículas presentes en el ambiente. La hipótesis de este estudio plantea que, al establecer controles más rigurosos en la limpieza de cabinas, filtros y chimeneas, se logrará una disminución significativa de los defectos, impactando de manera positiva en la calidad final del proceso (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008). Este enfoque permite identificar las causas raíz de los problemas y orientar la implementación de soluciones específicas y medibles.

Para abordar esta problemática, se adoptó la metodología DMAIC de Six Sigma, la cual se ha comprobado eficaz en la optimización de procesos y en la reducción de la variabilidad en múltiples contextos industriales (McShane-Vaughn, 2022). Se llevaron a cabo auditorías en las cabinas de pintura para evaluar tanto el estado de los sistemas de filtrado como el cumplimiento de los protocolos de limpieza establecidos. Además, la aplicación de herramientas de calidad como el diagrama de Pareto, pruebas de hipótesis y gráficos de control permitieron identificar, cuantificar y visualizar la incidencia del defecto a lo largo de las diferentes etapas del proceso. La incorporación de listas de verificación (checklists) complementó estas acciones, asegurando que se cumplan los procedimientos estandarizados, lo cual fue clave para reducir la variabilidad del proceso y estabilizar la línea de producción (Pérez Márquez, 2014).

La empresa realiza un monitoreo semanal del Yield para evaluar la eficiencia de cada área y establecer metas específicas en colaboración con el equipo de trabajo y los ingenieros asignados. Este seguimiento resulta crucial para detectar desviaciones tempranas en la calidad del proceso y para implementar acciones correctivas de forma oportuna. El proyecto surge a partir de una problemática identificada en el área de pintura, donde el Yield se encuentra consistentemente por debajo del 95% objetivo, tal como se muestra en Figura 1. En particular, se ha observado un incremento en la incidencia de defectos desde la semana 17 de producción, siendo la contaminación un problema recurrente. Este defecto representa aproximadamente el 0.973% del total de defectos anuales, lo que genera rechazos y retrabajos con importantes implicaciones económicas para la empresa. Actualmente, más del 10% de la producción es rechazada en la etapa de pulido, proceso en el cual se realiza el detallado de los cuerpos para obtener un acabado tipo espejo, libre de imperfecciones superficiales. El presente estudio se enfoca el análisis y la reducción del mayor defecto dentro del conjunto de los tres principales problemas de calidad de este proceso, el de contaminación, mientras que otros equipos de ingeniería se enfocarían en los defectos restantes.

Es importante destacar que este estudio se fundamenta en datos obtenidos a través de proyectos de vinculación realizados por estudiantes del programa de Ingeniería Industrial de la UABC. La colaboración estrecha con empresas del sector manufacturero ha permitido recabar información de primera mano sobre la problemática, evaluar la efectividad de las medidas implementadas y adaptar las soluciones a escenarios reales. Esta sinergia entre la academia y el sector productivo no solo refuerza la validez de los hallazgos, sino que también facilita la transferencia de conocimientos y la aplicación de mejoras continuas en los procesos productivos, beneficiando tanto a la empresa como a la formación integral de los futuros profesionales.

METODOLOGÍA

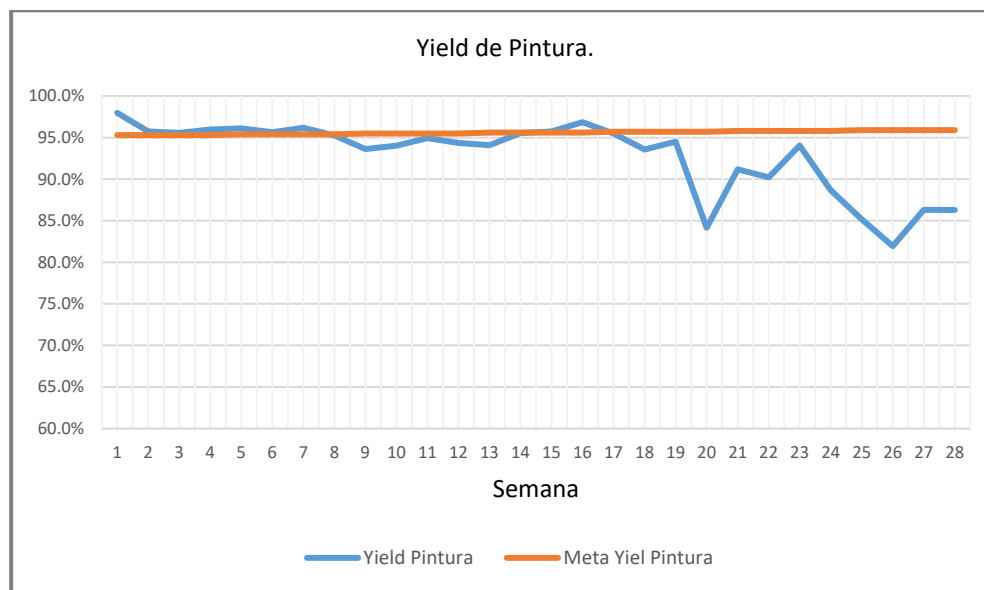
Metodología DMAIC

Para realizar mejoras significativas de manera consistente dentro de una organización, es fundamental emplear un modelo estandarizado de mejora. La metodología DMAIC, utilizada en Six Sigma, es un enfoque estructurado y disciplinado que consta de cinco fases interconectadas: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Cada fase emplea herramientas específicas para responder a preguntas clave y guiar el proceso de mejora (Pyzdek & Keller, 2014).

DMAIC es una estrategia basada en datos que mejora los procesos y, aunque es un componente central de Six Sigma, también puede implementarse de manera independiente o en combinación con otros enfoques de mejora de la calidad, como Lean (Antony, 2006). A continuación, se describen sus fases:

- **Definir (Define):** Se establece el alcance del proyecto y los objetivos de mejora.
- **Medir (Measure):** Se recopilan y evalúan datos sobre el proceso.
- **Analizar (Analyze):** Se examinan los datos mediante herramientas estadísticas descriptivas e inferenciales para identificar las causas raíz de los problemas.
- **Mejorar (Improve):** Se proponen e implementan soluciones basadas en el análisis previo.
- **Controlar (Control):** Se aplican métodos estadísticos para monitorear la estabilidad del proceso y prevenir la recurrencia de problemas (Montgomery, 2020).

Figura 1. Yield de Proceso de pintura cuerpos de guitarra.



Herramientas de Calidad.

Las siete herramientas básicas de calidad son técnicas gráficas ampliamente utilizadas en la gestión de calidad para identificar, analizar y resolver problemas. Su uso es accesible para individuos con formación básica en estadística (Ishikawa, 1985). Estas herramientas son:

1. *Diagrama de Ishikawa*: También conocido como diagrama de causa y efecto o de espina de pescado, ayuda a visualizar factores que pueden estar contribuyendo a un problema (Montgomery, 2020).
2. *Hoja de Verificación*: Permite la recopilación y organización sistemática de datos en una tabla estructurada (Basu, 2004).
3. *Gráfico de Control*: Representa visualmente la evolución de un proceso en el tiempo, facilitando la detección de variaciones inusuales (Montgomery, 2020).
4. *Histograma*: Muestra la distribución de una variable en forma de barras, facilitando la interpretación de la variabilidad del proceso (Juran & Godfrey, 1999).
5. *Diagrama de Pareto*: Organiza datos en orden descendente para identificar los factores más críticos de un problema, aplicando el principio 80/20 (Juran & Godfrey, 1999).
6. *Diagrama de Dispersión*: Representa la relación entre dos variables para evaluar correlaciones potenciales (Montgomery, 2020).
7. *Muestreo Estratificado*: Separa datos en grupos homogéneos para un análisis más detallado de la variabilidad (Basu, 2004).

Pruebas de Hipótesis.

Una hipótesis estadística es una afirmación sobre los parámetros de una población o proceso, cuya validez se evalúa con base en datos muestrales (Montgomery & Runger, 2016). Por ejemplo, la hipótesis “este proceso produce menos de un 8% de defectos” puede formularse así: Hipótesis nula (H_0): $p = 0.08$ (la proporción de defectos es del 8%); Hipótesis alternativa (H_1): $p < 0.08$ (la proporción de defectos es menor al 8%).

El procedimiento de prueba parte del supuesto de que H_0 es verdadera y, si la evidencia estadística es suficiente para rechazarla, se acepta H_1 . En caso contrario, no se rechaza H_0 . Para llevar a cabo una prueba de hipótesis, se selecciona una muestra aleatoria, se calcula un estadístico de prueba y se compara con una región de rechazo previamente definida. Si el estadístico cae dentro de esta región, se rechaza la hipótesis nula en favor de la alternativa (Montgomery, 2020).

El Proceso de Pintura de Cuerpos de Guitarra

La mejora se implementó en el Edificio 5, encargado del proceso de pintura de los cuerpos de guitarra. Este proceso comprende varias etapas, que incluyen la aplicación de *under coat*, lijado intermedio, aplicación de color, aplicación de *top coat* y pulido como se muestra en la Figura 2. Para ello, se emplean herramientas especializadas como lijadoras, pulidoras y pistolas de presión de aire para la aplicación de la pintura.

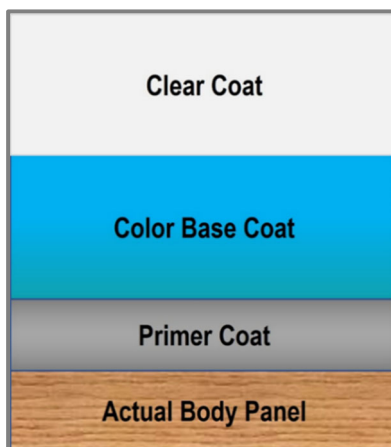
El proceso de pintura está conformado por tres etapas principales:

1. **Under Coat**: Se trata de una base uniforme de poliéster aplicada sobre la madera previamente sellada con gel UV. Este recubrimiento consta de tres capas superpuestas, con un tiempo de secado de una hora entre cada una.
2. **Color**: Consiste en la aplicación de la base de color sobre el *under coat*, hasta alcanzar el tono deseado. Este proceso se realiza 24 horas después de la aplicación del *under coat* y tras haber pasado por el lijado intermedio.
3. **Top Coat**: Se aplican tres capas de poliéster transparente (*polyester clear*) de manera uniforme sobre la base de color. La primera capa de *top coat* se aplica el mismo día de la

aplicación del color, seguida de dos capas adicionales con un tiempo de reposo de una hora entre cada una.

Este proceso estructurado y meticuloso garantiza un acabado de alta calidad en los cuerpos de guitarra, asegurando uniformidad, durabilidad y estética en el producto final.

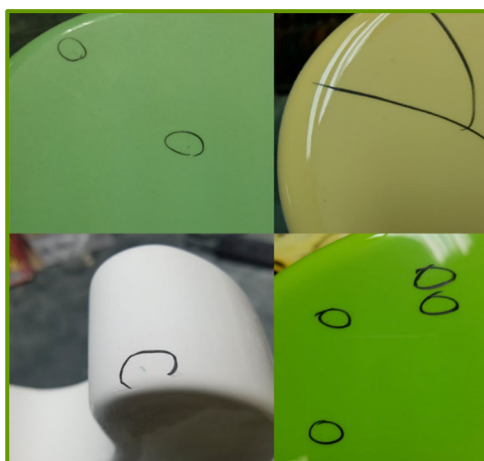
Figura 2. Esquema del orden de capas de acabado del proceso de pintado.



RESULTADOS

La contaminación en el proceso de pintura podemos definirla como la presencia de partículas o materiales extraños, tales como polvo, cabellos humanos, residuos de pintura de otro color, entre otros, que se incrustan en la superficie entre las capas de pintura. Estas impurezas, cuyo tamaño es superior a 1/64 de pulgada (≈ 0.3969 mm), pueden introducirse durante la aplicación o el secado entre capas, como se muestra en la Figura 3. La fuente de contaminación puede ser el ambiente o algún objeto presente en las cabinas de pintura, a pesar de los métodos de limpieza implementados.

Figura 3. Imágenes de algunos ejemplos de contaminación en la pintura de las guitarras.

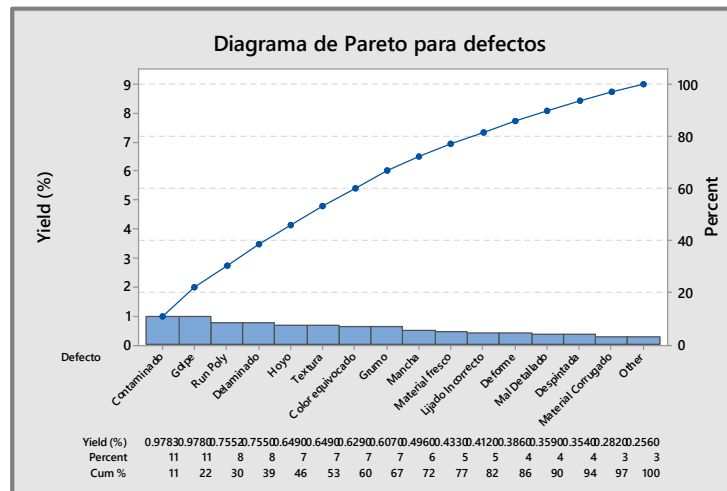


El proceso de pintura involucra diversas operaciones, incluyendo inspección, transferencia, limpieza y aplicación de pintura, cada una de las cuales agrega valor al producto. Dentro de este esquema, la limpieza de los cuerpos es un factor crucial en la mejora de la calidad. Debido a esto, las operaciones en el proceso de pintura incluyen actividades de limpieza implementadas antes y durante la aplicación de la pintura.

Definir

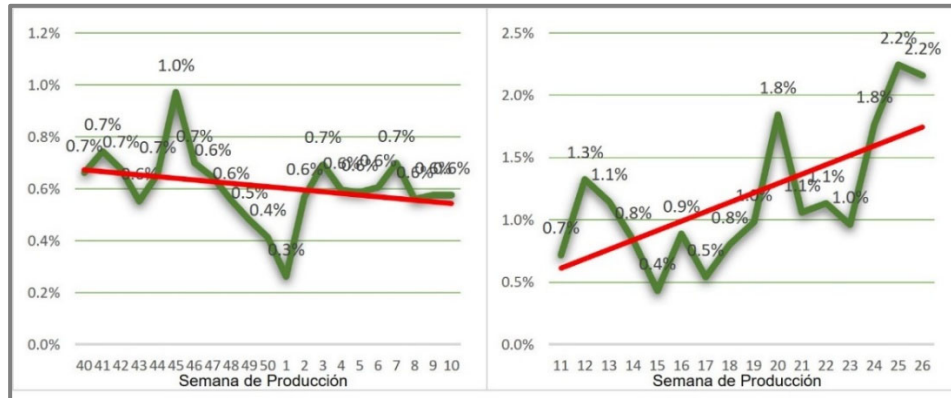
En la Figura 4 se presenta un diagrama de Pareto diseñado para identificar los defectos más significativos en el proceso de pintura. Los resultados indican que la contaminación constituye el defecto con mayor impacto en el rendimiento de producción, con una incidencia del 0.973% en el total de unidades procesadas en lo que va del año. Además, este defecto se encuentra entre los tres principales factores responsables de la reducción del Yield por debajo del 95% en el área de pintura, lo que pone de manifiesto su impacto en la disminución de la eficiencia del proceso.

Figura 4. Pareto de defectos área de pintura (Promedio semana 1-28).



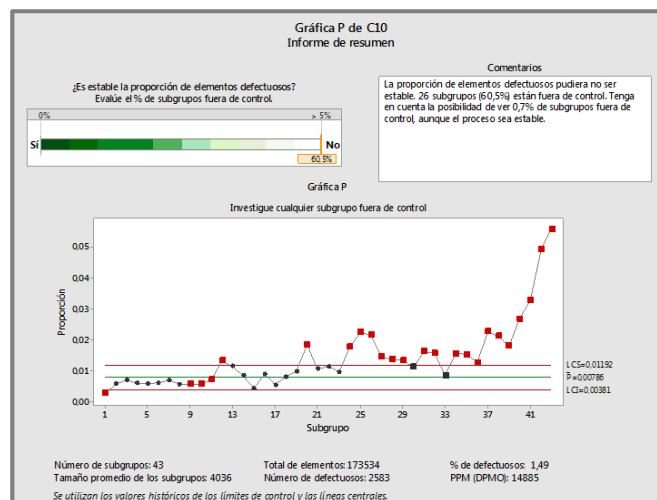
Se identificó que el área de pintura ha experimentado una reducción en el Yield desde la semana 17, situándose por debajo de la meta establecida, como se observa en la Figura 1. No se dispone de información concluyente sobre las causas del incremento en los defectos durante este periodo. A partir del análisis de los defectos, se realizó un diagrama de Pareto de primer nivel como se plasma en la Figura 4 para identificar los principales factores que han contribuido a la disminución del Yield, estableciendo que la contaminación es la causa predominante del aumento en los defectos. Con base en datos históricos, se generó un gráfico de tendencia como se muestra en la Figura 5 que evidencia un incremento progresivo del defecto a lo largo de las semanas.

Figura 5. Proporción de contaminado de la semana 40 de 2023 a la semana 26 de 2024.



Para evaluar la estabilidad de los defectos de contaminación en los datos, se realizó un análisis de proporciones, eliminando puntos fuera de especificación o que violaban las ocho reglas de control. Posteriormente, se ejecutó nuevamente el gráfico de proporción, obteniendo una distribución normal de los datos. Se observó que a partir de la semana 24 hubo un incremento en la producción, pasando de 850 a 1000 piezas diarias, y aumentando progresivamente hasta alcanzar 1250 piezas diarias. En el gráfico de proporción también en los datos podemos observar que a partir de la semana 38 hubo un crecimiento en la producción de 4 puntos consecutivamente, tal como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6. Gráfico de proporción con límites definidos (contaminado).



Una vez analizados los datos recabados, se definió como el objetivo principal del presente estudio el análisis de las tres principales operaciones de pintura (*Under Coat*, *Color* y *Top Coat*), enfocándose en la generación del defecto de contaminación en el área de pintura de cueros.

Medir

Se realizó un Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) con el apoyo de para identificar los posibles modos de falla asociados a la contaminación y evaluar sus causas. Esto permitió obtener una mejor comprensión de las condiciones bajo las cuales se realiza la aplicación de pintura y los controles existentes en el proceso.

Se llevaron a cabo dos auditorías. La primera, realizada en la semana 42, tuvo como objetivo evaluar los controles existentes en el área de producción de pintura para prevenir la contaminación y verificar la documentación de los procedimientos. La segunda auditoría, ejecutada por los departamentos de ingeniería y mantenimiento, se enfocó en el análisis de las cabinas de pintura, incluyendo la inspección de paredes y sistemas de ventilación, encontrándose las siguientes deficiencias:

1. Filtros de cabinas con tiempo de vida expirado.
2. Acumulación de suciedad en las chimeneas de extracción de aire.
3. Falta de limpieza en el área de inyección de aire.
4. Ausencia de limpieza profunda en el pleno de las cabinas.

Analizar

Los datos obtenidos permitieron formular la hipótesis de que la limpieza de las chimeneas podría tener un impacto significativo en la reducción del defecto de contaminación. Tras la auditoría de mantenimiento, se implementaron acciones correctivas en la semana 25, cuyo proceso tomó dos días. Dado el tiempo necesario para que el material tratado llegara a la etapa de pulido, se recopilaron datos una semana después. Se realizó una prueba de hipótesis para proporciones, comparando dos semanas, antes y después de la limpieza, y con un nivel de confianza del 95%, se determinó que la proporción de defectos disminuyó significativamente tras el mantenimiento de las chimeneas, con un valor $P < 0.001$ como se puede observar en la Figura 7.

En la semana 43, una auditoría adicional reveló que los controles de limpieza y aplicación de pintura no se estaban ejecutando de manera rigurosa. Como medida correctiva, se documentaron los procedimientos y se capacitó a los operadores en la aplicación de las normas establecidas. Además, se asignaron dos operadores adicionales para garantizar la limpieza de los racks utilizados en la aplicación de pintura. Una prueba de hipótesis con un 95% de confianza confirmó que la limpieza de racks redujo la incidencia del defecto por contaminación.

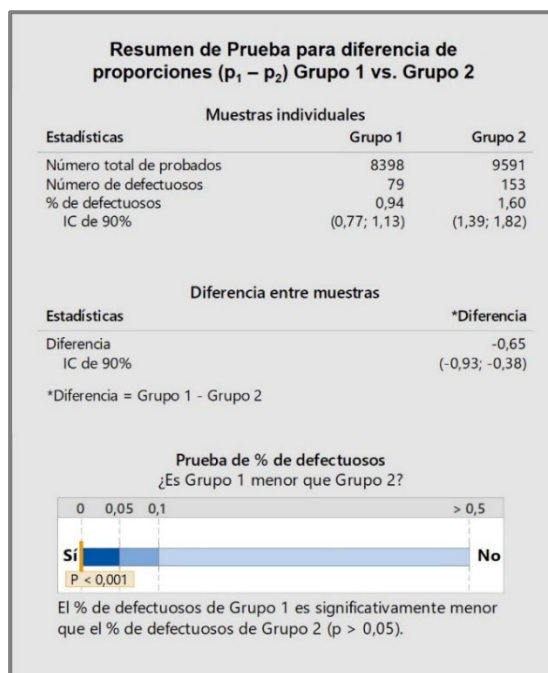
Mejorar y controlar

Se revisaron y actualizaron los controles existentes, incorporando la información relevante en las ayudas visuales del proceso. Se verificó que la falta de seguimiento a los controles de limpieza influía en la contaminación, impactando directamente en la calidad del producto. Para reforzar estas mejoras, se establecieron los siguientes controles:

- Checklist diario para aplicadores, con el fin de verificar la limpieza de las cabinas de pintura.
- Checklist de facilitador, enfocado en la supervisión de filtros y seguimiento de los gráficos de control en producción.

- Checklist de entrega de racks, donde los racks deben ser inspeccionados antes de su uso, y en caso de no cumplir con los estándares de limpieza, serán rechazados y devueltos para su corrección.
- Programa de mantenimiento de chimeneas, estableciendo un ciclo de limpieza cada 10 semanas.

Figura 7. Prueba de hipótesis limpieza y mantenimiento de chimeneas. Grupo 1 (semana después de limpieza) vs. Grupo 2 (semana antes de limpieza).



CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron identificar la contaminación como el principal defecto que impacta en la reducción del Yield por debajo del 95%, derivado de deficiencias en los controles de limpieza y mantenimiento de equipos. El análisis de las operaciones (Under Coat, Color y Top Coat) mostró que las condiciones ambientales y el estricto cumplimiento de los protocolos de limpieza inciden directamente en la aparición de defectos. Herramientas de calidad, como el diagrama de Pareto y gráficos de proporción, revelaron una tendencia creciente del defecto desde la semana 24, coincidiendo con el aumento de la producción diaria, y se detectaron fallas en la limpieza de cabinas, ventilación y manejo de filtros.

Las pruebas de hipótesis confirmaron que las acciones correctivas en la limpieza de chimeneas, la inspección de racks y la aplicación de pintura reducen efectivamente el defecto por contaminación. En este contexto, la implementación de controles documentados y la capacitación del personal en buenas prácticas de limpieza y mantenimiento resultan esenciales para estabilizar el proceso y minimizar la variabilidad en la calidad.

En base a estos hallazgos, se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo que incluya la limpieza y revisión periódica de filtros, chimeneas y cabinas de

pintura. Asimismo, es crucial reforzar la supervisión mediante listas de verificación diarias y auditorías semanales, optimizar la inspección de racks y mantener un monitoreo estadístico continuo del defecto para evaluar la efectividad de las mejoras y realizar ajustes oportunos.

Además, es relevante destacar el impacto positivo que estos proyectos de mejora tienen en la formación de los estudiantes de Ingeniería Industrial. La participación en proyectos de vinculación con el sector productivo les permite aplicar conocimientos teóricos en situaciones reales, fortaleciendo habilidades analíticas, de resolución de problemas y trabajo en equipo. Esta experiencia práctica enriquece su aprendizaje y fomenta una integración más sólida entre la academia y la industria, preparándolos integralmente para enfrentar los desafíos del entorno profesional actual.

BIBLIOGRAFÍA

- Antony, J. (2006). *Six sigma for service processes*. *Business Process Management Journal*, 12(2), 234–248. <https://doi.org/10.1108/14637150610657558>
- Antony, J., Snee, R., & Hoerl, R. (2017). *Lean Six Sigma for small and medium sized enterprises: A practical guide*. CRC Press/Taylor & Francis.
- Basu, R., & Wright, J. N. (2003/2004). *Quality beyond Six Sigma*. Butterworth-Heinemann/Routledge. (Libro; ed. 2003).
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2013/2008). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma* (2.^a o 3.^a ed.). McGraw-Hill.
- Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control? The Japanese way*. Prentice-Hall. (Libro; edición en inglés 1985;
- Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (Eds.). (1999). *Juran's quality handbook* (5th ed.). McGraw-Hill.
- McShane-Vaughn, M. (2022/2023). *The ASQ Certified Six Sigma Black Belt Handbook* (4th ed.). ASQ/Quality Press. (Folio de 2023; refleja el BoK 2022).
- Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to statistical quality control* (8th ed.). Wiley
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. *Applied statistics and probability for engineers* (Wiley).
- Pérez Márquez, M. (2014/2016). *Control de calidad: Técnicas y herramientas*. RC Libros (2014). Edición mexicana: Alfaomega (2016).
- Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2014). *The Six Sigma handbook* (4th ed.). McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.1036/0071840532>; https://www.mheducation.com/highered/mhp/product/six-sigma-handbook-fourth-edition.html?utm_source=chatgpt.com