



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

***“Aplicación de la metodología Lean Six Sigma, caso
de estudio: línea de pintura automotriz”***

Tesina

Para obtener el grado de

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN
MATERIALES**

P R E S E N T A

Gelibeth Tania Romero Pérez

Directora de tesina

M.I. Carolina Osnaya Gamboa

Puebla, Pue.

Junio 2025

Dedicatoria

*A los seres que más he amado en la vida,
mi mamá, mi papá y mi perrita Lunna.*

Agradecimientos

A mi mamá, por creer siempre en mí y apoyarme en todo lo que siempre soñé hacer y ser. Por nunca soltar mi mano y ser ese lugar seguro al que siempre querré volver. Por ser mi ejemplo de fortaleza y superación, y por enseñarme que, sin importar los desafíos, siempre es posible salir adelante. Aspiro a ser una gran mujer como ella, llena de amor, sabiduría y generosidad.

A mi papá, por motivarme siempre a perseguir mis sueños y por confiar en mí como nadie más lo ha hecho. Por darme las herramientas y oportunidades para llegar hasta donde he querido, y por inspirarme a ser una gran profesionalista, como él lo fue. Gracias por enseñarme que con perseverancia y determinación es posible abrir un camino lleno de éxito en un lugar desconocido.

A mi hermano Jeannel y a mi cuñada Yareli, por enseñarme el valor de reinventarse y atreverse a seguir un camino propio, distinto al de los demás. Y, sobre todo, por mostrarme que hacerlo de la mano de quien amas es lo más valioso de todo.

Al amor, por enseñarme que nada es imposible, que siempre vale la pena intentarlo, y que al final todo estará bien si se actúa con el corazón. Por inspirarme a crecer, sanar y construir la mejor versión de mí misma

A mi Lunnita, mi fiel compañera durante 14 años, quien ha estado presente en cada una de mis etapas escolares y ha sido una de mis más grandes maestras de vida.

A mi amiga Ingrid, por trece años de una relación auténtica y sincera, la cual ha crecido y evolucionado con el tiempo, pero que siempre conserva la esencia de cuando éramos niñas.

A mi amigo William, por ser mi apoyo incondicional y compañero de aventuras durante toda la universidad, con quien más disfruté de cada momento de esta etapa tan especial. Definitivamente, un amigo leal para toda la vida.

A mi amiga Louise, por recibirme con tanta calidez durante mi intercambio, por buscarme incluso sin conocerme y regalarme compañía, alegría y apoyo justo cuando más lo necesitaba.

A la M.I. Carolina Osnaya, por ser mi asesora y guía en esta última etapa de la universidad. Le agradezco profundamente su tiempo, sus consejos y su apoyo constante en la elaboración de este trabajo. Gracias a su esfuerzo y dedicación como docente, nos inspira a más mujeres a ser aguerridas y comprometidas en el campo de la ingeniería.

A la Dra. Ma. de Lourdes Ruiz y al Dr. Heriberto Hernández, por compartir su conocimiento con tanta pasión y compromiso en cada clase que me impartieron. Agradezco su calidez humana, el apoyo brindado para alcanzar mis metas y sus consejos en la elaboración de ese trabajo.

Al ingeniero Eloy, por ser un mentor y guía en mi camino dentro de la mejora continua, por confiar en mí desde el inicio y brindarme la oportunidad que abrió muchas puertas en mi desarrollo profesional y personal.

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo I. Antecedentes	4
1.1 Industria automotriz	4
1.2 Calidad	5
1.3 Gestión de la calidad en la industria automotriz	6
1.4 Mejora continua	6
1.5 Six Sigma	7
1.6 Ciclo DMAIC	11
1.7 Herramientas Six Sigma	15
1.8 Lean Manufacturing	21
1.9 Lean Six Sigma	23
Capítulo II. Metodología	24
2.1 Definir	24
2.2 Medir	25
2.3 Analizar	25
2.4 Mejorar	26
2.5 Controlar	26
Capítulo III. Resultados y discusión	27
3.1 Definir	27

3.2	<i>Medir</i>	29
3.3	<i>Analizar</i>	32
3.4	<i>Mejorar</i>	36
3.5	<i>Controlar</i>	39
	Conclusiones	43
	Bibliografía	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de distribución normal de un proceso estable de calidad 6σ	8
Figura 2. Jerarquía en certificaciones Six Sigma.	10
Figura 3. Jerarquía del equipo en un proyecto Six Sigma.	11
Figura 4. Ciclo DMAIC de la metodología Six Sigma.	11
Figura 5. Project Chart para Six Sigma.	16
Figura 6. Diagrama de proceso.	16
Figura 7. Diagrama Pareto.	17
Figura 8. Gage R&R datos continuos.	17
Figura 9. Gráfico de control de procesos.	19
Figura 10. Ishikawa o diagrama de espina de pescado.	19
Figura 11. Matriz Causa y Efecto.	20
Figura 12. $\bar{X}$'s Tracking.	20
Figura 13. Plan-Do-Check-Act	21
Figura 14. Desperdicios en Lean Manufacturing.	22
Figura 15. Pilares que forman Lean Six Sigma	23
Figura 16. Botoneras con presencia del defecto escurrimiento de barniz.	24
Figura 17. Pareto de los defectos que se presentan en la línea de pintura de las botoneras.	27
Figura 18. Moon View del proceso de pintura de las botoneras.	28
Figura 19. Equipo de trabajo para proyecto Six Sigma en el área de pintura.	28

Figura 20. Project Charter del proyecto Six Sigma del área de pintura.	29
Figura 21. Paretos de cada mes de los defectos presentes en las botoneras.	30
Figura 22. Evolución del defecto escurrimiento de barniz.	31
Figura 23. Gráfico de control P, piezas defectuosas debido al escurrimiento de barniz por semana.	31
Figura 24. Gage R&R por atributos en inspección final de las botoneras.....	32
Figura 25. Ishikawa escurrimiento de barniz en botoneras.	33
Figura 26. Matriz Causa y Efecto del proceso de pintura de las botoneras.....	34
Figura 27. X's Tracking del proceso de pintura de las botoneras.	35
Figura 28. Causas raíz del escurrimiento de barniz.....	35
Figura 30. Heat map de los soportes de las botoneras.....	37
Figura 31. Panel de control del robot del barniz.	37
Figura 32. Gráfica mensual de la evolución del defecto escurrimiento de barniz.	38
Figura 33. Gráfico de control tipo P, comparación del antes y después de la mejora.....	38
Figura 34. Prueba Z para dos proporciones (comparación entre piezas defectuosas por escurrimiento de barniz antes y después de la mejora).	39
Figura 35. Base de datos para crear gráfico de monitoreo de defectos dinámico.....	40
Figura 36. Gráfico de tendencia de posiciones con escurrimiento de barniz en el soporte de las botoneras.	41
Figura 37. Gráfico de tendencia de posiciones en el soporte con escurrimiento de barniz por versiones de las botoneras.....	41

Figura 38. Base de datos para gráfico de control de monitoreo de piezas defectuosas del proceso de pintura de las botoneras..... 42

Figura 39. Gráfico de control P Chart, monitoreo de piezas defectuosas en el proceso. 42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios para la selección y definición de un proyecto Six Sigma.	12
Tabla 2. Criterios de aceptación en un Gage R&R dependiendo de la naturaleza de los datos....	18
Tabla 3. Plan de Acción basado en el Ciclo PDCA para atacar el escurrimiento de barniz.	36

Introducción

La industria automotriz es uno de los sectores más relevantes para la economía mundial. Aporta aproximadamente entre el 3 % y 3.65 % del PIB global ^[1], y en países como México, representa hasta el 4.7 % del PIB nacional y más del 21 % del producto manufacturero. Este sector no solo genera millones de empleos directos e indirectos, sino que también impulsa el desarrollo tecnológico, la inversión extranjera y la innovación en procesos industriales. Sin embargo, en un entorno global cada vez más competitivo, las empresas automotrices enfrentan desafíos constantes en términos de calidad, eficiencia y reducción de costos. ^[2]

Uno de los procesos más críticos dentro de la manufactura automotriz es la aplicación de pintura, debido a su doble función: proporcionar una apariencia estética al producto y actuar como una capa protectora contra la corrosión y el desgaste ambiental. Un control deficiente en este proceso puede generar defectos visuales y estructurales que impactan negativamente en la durabilidad del producto, en la percepción del cliente y en la rentabilidad operativa de la empresa. ^[3]

En este contexto, una empresa del sector ha detectado un incremento considerable en la tasa de scrap en su línea de pintura, particularmente en la fabricación de botoneras, uno de sus productos de mayor demanda. Entre los defectos más recurrentes, el escurrimiento de barniz destaca por su frecuencia e impacto en los costos de producción, ya que genera pérdidas mensuales significativas debido a piezas que no pueden ser retrabajadas. Este problema se ve agravado por la ausencia de un sistema de trazabilidad eficiente que permita registrar datos detallados del defecto, como su ubicación exacta, versión de pieza y cantidad por zona, lo cual limita la capacidad de análisis y la toma de decisiones efectivas.

Ante esta situación, resulta necesario recurrir a una metodología rigurosa que no solo permita identificar y reducir las causas raíz del defecto, sino también establecer controles sostenibles respaldados por evidencia y datos. Por ello, Lean Six Sigma se presenta como una metodología integral que combina el enfoque Lean, centrado en la eliminación de desperdicios y optimización de procesos, con las herramientas estadísticas de Six Sigma, orientada a la reducción de la variabilidad y la mejora continua de la calidad. ^[4] Gracias a esta combinación, muchas organizaciones han logrado mejorar significativamente su eficiencia operativa, disminuir costos y

aumentar la satisfacción del cliente mediante soluciones fundamentadas en datos y procesos estandarizados.

Un caso de éxito destacado ocurrió en una empresa automotriz en México, cuyo proceso manual de forrado de piezas con vinil presentaba un alarmante 90% de retrabajos debido a la falta de estandarización y a la alta dependencia de la habilidad individual de los operadores. Mediante la aplicación de la metodología Lean Six Sigma, se analizaron y optimizaron los pasos del proceso, implementando estándares claros, capacitando al personal y eliminando actividades que no aportaban valor. Además, se fomentó una cultura de mejora continua entre los operadores, incentivando su participación activa en la identificación y solución de problemas. Como resultado, se redujo significativamente el retrabajo, mejorando la calidad y la eficiencia del proceso, lo que generó un ahorro anual de \$68,570 dólares.

El presente trabajo propone la implementación de la metodología Lean Six Sigma, como una estrategia para optimizar el proceso de pintura y reducir la variabilidad que genera defectos. Su aplicación en este trabajo busca identificar las causas raíz del defecto, generar soluciones sostenibles y mejorar la eficiencia del proceso, reduciendo el porcentaje de scrap, estandarizando procedimientos y promoviendo una cultura organizacional basada en la calidad.

Objetivos

Objetivo general

Implementar la metodología Lean Six Sigma para optimizar el proceso de la línea de pintura de la empresa automotriz.

Objetivos específicos

- Mejorar el control de la calidad del producto, mediante la identificación precisa de los defectos que pueden surgir durante el proceso de producción.
- Reducir el porcentaje de scrap generado por el mayor ofensor (escurrimiento de barniz) en el producto.
- Mantener la proporción de defectos en el proceso de pintura dentro de los límites de control determinados mediante el gráfico P para el defecto escurrimiento de barniz en las botoneras.

Hipótesis

La implementación de la metodología Lean Six Sigma en la línea de pintura de la empresa automotriz permitirá optimizar el proceso al reducir la variabilidad, mejorar el control de calidad y disminuir el porcentaje de scrap.

Capítulo I. Antecedentes

1.1 Industria automotriz

La industria automotriz desempeña un papel fundamental a nivel global, tanto por su impacto económico como por su contribución al desarrollo tecnológico e industrial. Este sector no solo impulsa la innovación y el avance de nuevas tecnologías, sino que también genera millones de empleos directos e indirectos en todo el mundo. ^[5] En el caso de México, la industria automotriz es uno de los pilares económicos más relevantes: emplea a más de 960 mil personas, de las cuales aproximadamente 100 mil laboran en la industria terminal y más de 860 mil en los sectores de autopartes, carrocerías y remolques. En total, se estima que más de 3.5 millones de mexicanos se benefician directamente de esta actividad productiva. ^[6]

Dentro de la cadena de valor automotriz, uno de los procesos clave es la pintura de componentes, especialmente de partes plásticas como fascias, molduras y elementos del interior del vehículo. Entre estos últimos se encuentran las botoneras, las cuales son piezas plásticas (acrilonitrilo butadieno estireno ABS) que integran los botones o interruptores para controlar funciones como las ventanas eléctricas, los espejos laterales y la iluminación interior. ^[7] Estos componentes deben cumplir con estrictos requisitos estéticos y funcionales, ya que están en constante interacción con el usuario. Este proceso no solo tiene fines estéticos, sino también funcionales, ya que la pintura protege los materiales contra agentes ambientales y contribuye a la durabilidad del vehículo. Sin embargo, pintar superficies plásticas representa diversos desafíos, especialmente en un proceso automatizado.

La aplicación automatizada de pintura permite lograr acabados uniformes y de alta calidad en los vehículos. Este proceso exige una alta precisión y repetibilidad, ya que incluso pequeñas variaciones en parámetros como la atomización de la pintura, la distancia y el ángulo de aplicación, la velocidad de la línea o las condiciones ambientales pueden afectar directamente la calidad del acabado. El proceso automatizado implica etapas definidas, como la aplicación de primer, base color y finalmente el barniz, que cumple una función esencial al proteger las capas anteriores contra rayaduras, exposición UV, corrosión y otros daños provocados por agentes químicos, además de proporcionar brillo y durabilidad. Este recubrimiento final debe aplicarse de manera uniforme, lo

cual requiere controlar variables como viscosidad, temperatura, caudal y tiempos de curado. ^[3]

Entre los defectos más comunes en este tipo de procesos se encuentran el escurrimiento de barniz, piel de naranja, contaminaciones, burbujas y diferencias de tono, todos ellos asociados a variabilidad en la aplicación, mal ajuste de parámetros del proceso o uso inadecuado de materiales. Estos defectos no solo afectan la calidad visual del producto, sino que generan reprocesos, desperdicio de materiales y costos adicionales. ^[8]

El proceso inicia con la preparación de la superficie, que comprende actividades como el lavado, desengrase y tratamiento químico, fundamentales para garantizar una adecuada adherencia de las capas posteriores. Para asegurar una preparación óptima, las piezas también requieren tratamientos previos más específicos, como el uso de técnicas como el flameado o plasma, las cuales modifican las características superficiales del material y mejoran la adhesión del recubrimiento ^[8]. Posteriormente, se aplica una capa de pintura por electrodeposición (conocida como e-coat), que proporciona una protección uniforme contra la oxidación. Luego, se lleva a cabo el sellado y el curado en horno. ^[9]

Las etapas siguientes comprenden la aplicación del primer, la base de color y finalmente el barniz o clear coat. Esta última capa se aplica generalmente por medio de pulverización, utilizando robots programados que controlan con precisión la trayectoria y los parámetros del proceso. La pulverización convierte el barniz en una nube fina que recubre la pieza de forma uniforme; sin embargo, su correcta aplicación depende de varios factores como la presión, el caudal, la distancia, el ángulo y la velocidad del robot. Una variación en alguno de estos parámetros puede generar defectos en el acabado, como los escurrimientos, que afectan la calidad visual y funcional del recubrimiento final. ^[10]

1.2 Calidad

La calidad se ha convertido en uno de los factores de decisión más importantes de los consumidores para elegir entre productos y servicio que compiten. El fenómeno es generalizado, sin importar si el consumidor es un individuo, una organización industrial, una tienda minorista o un programa de defensa militar. Por lo tanto, entender y mejorar la calidad es un factor clave que lleva al éxito de los negocios, al crecimiento y a una competitividad fortalecida.

En la elaboración de los productos en el área industrial involucra principalmente tres etapas: la entrada (personal, material, equipo, políticas, procedimientos, métodos y el medio ambiente), realización del producto o servicio (proceso) y la salida (brindar un servicio y/o elaboración de un producto). En dichas etapas, se presentan errores que afectan la calidad del producto y/o servicio generando un atraso en el tiempo para pruebas, análisis y reparación. Estas actividades no-adicionales requieren espacio, equipo, materiales y personal. ^[11]

1.3 Gestión de la calidad en la industria automotriz

La gestión de la calidad es un pilar estratégico en la industria automotriz, ya que influye directamente en la competitividad de las empresas, la satisfacción del cliente y la sostenibilidad del negocio. En un entorno globalizado, donde los consumidores son cada vez más exigentes y los ciclos de vida de los productos se reducen, mantener estándares de calidad rigurosos se ha vuelto indispensable. La calidad no solo se refiere a cumplir con especificaciones técnicas, sino también a garantizar la confiabilidad, durabilidad, seguridad y apariencia de cada componente del vehículo.

En este sentido, la calidad está intrínsecamente ligada a la eficiencia operativa. Procesos robustos y bien controlados reducen la variabilidad, los desperdicios y los retrabajos, lo cual impacta positivamente en los costos de producción y en los tiempos de entrega. ^[12]

Históricamente, la industria automotriz ha adoptado diversas herramientas de calidad para garantizar la estabilidad de sus procesos y productos. Entre ellas destacan los métodos estadísticos clásicos, como el uso de gráficos de control, análisis de capacidad de procesos, y diagramas causa-efecto. Estas herramientas permiten detectar y prevenir desviaciones en el proceso, así como identificar las causas raíz de los problemas de calidad. Estas herramientas han sentado las bases para la implementación de metodologías más integrales y orientadas a resultados, como Lean Manufacturing y Six Sigma, las cuales permiten una mejora sistemática en la calidad y la productividad. ^[13]

1.4 Mejora continua

Una cultura de mejora continua se refiere a un entorno organizacional en el cual la búsqueda constante de la mejora, la innovación y la excelencia están arraigadas y son valoradas por todos los miembros de la organización. Es un enfoque que fomenta la mentalidad de que siempre hay espacio

para mejoras y que todos desempeñan un papel activo en la identificación y resolución de problemas. ^[14] El objetivo principal de este enfoque es mejorar la competitividad de las empresas a través de la productividad de una manera sostenible en el tiempo.

En comparación con el mundo, México y Latinoamérica presentan niveles de crecimiento económico inferiores al mundo desarrollado. En nuestro país, a pesar de las largas jornadas laborales, la eficiencia productiva es baja, este fenómeno se debe en gran parte a procesos ineficientes y falta de capacitación. La baja competitividad de México se ve reflejada en su posición en los índices a nivel global, lo cual es preocupante. Esta situación, derivada de ineficiencias en procesos productivos y falta de innovación, limita el crecimiento económico, afecta la inversión extranjera y reduce la calidad de vida de la población. ^[15]

1.5 Six Sigma

La metodología Six Sigma es una estrategia de mejora continua que busca mejorar el desempeño de los procesos de una organización y reducir su variación, con ello, es posible encontrar y eliminar las causas de los errores, defectos y retrasos en los procesos del negocio. En todo momento se toma como punto de referencia a los clientes y sus necesidades. La estrategia 6σ se apoya en una metodología fundamentada en las herramientas y el pensamiento estadístico. Asimismo, tiene tres áreas prioritarias de acción: satisfacción del cliente, reducción del tiempo de ciclo y disminución de los defectos.

Sigma (σ) es la letra griega que se usa para denotar la desviación estándar poblacional (proceso), la cual mide la dispersión de los datos alrededor de la media, es decir, es una forma de cuantificar la variación que tiene una variable de dicha población o proceso. ^[16]

La curva de distribución normal, o campana de Gauss (Figura 1), muestra cómo se distribuyen las métricas de un proceso estable, como los tiempos de ciclo, temperaturas, presiones, concentraciones y otras variables clave. En esta curva, el centro representa el promedio del proceso y el ancho refleja la magnitud de la variación.

Al ajustar los datos a esta distribución, Six Sigma permite predecir con qué frecuencia pueden ocurrir valores extremos o defectos. El nivel sigma indica cuántas desviaciones estándar (σ) caben entre la media del proceso y los límites de especificación, a mayor nivel sigma, menor probabilidad

de piezas defectuosas.

En este sentido, la meta ideal es que el proceso tenga un nivel de calidad de Six Sigma, es decir, que como máximo genere 3.4 defectos por millón de oportunidades. Esta meta se pretende alcanzar mediante un programa vigoroso de mejora, diseñado e impulsado por la alta dirección de una organización, en el que se desarrollan proyectos 6 σ a lo largo de la organización con el objetivo de lograr mejoras, así como eliminar defectos y retrasos de productos, procesos y transacciones.

En la práctica, Six Sigma considera un posible desplazamiento de la media del proceso de hasta 1.5 σ , lo cual se refleja en los cálculos clásicos del modelo, manteniendo una meta realista y aún así exigente en cuanto a calidad. ^[17]

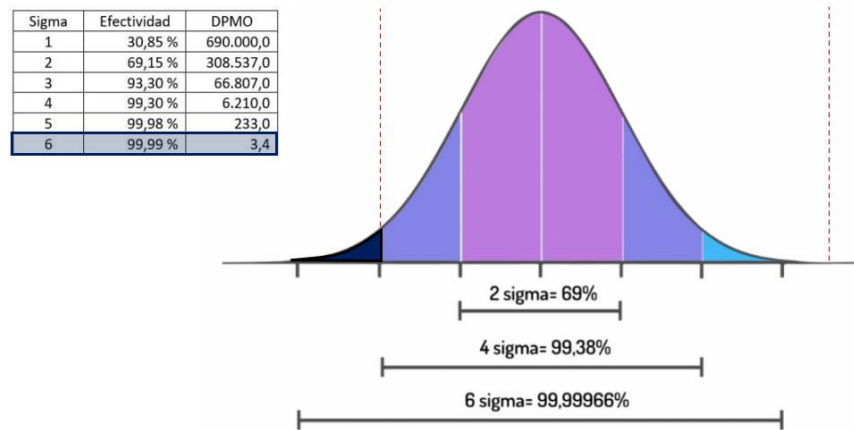


Figura 1. Curva de distribución normal de un proceso estable de calidad 6 σ .

1.5.1 Organización en Six Sigma

Las certificaciones Six Sigma son credenciales que validan el nivel de conocimiento, experiencia y habilidades que una persona tiene en la metodología Six Sigma. Los niveles están organizados en una estructura jerárquica, y cada uno representa un grado distinto de formación técnica, liderazgo y responsabilidad en proyectos de mejora continua. Se obtiene cada nivel mediante formación teórica, exámenes y aplicación práctica, por ejemplo, liderar o participar en proyectos reales (Figura 2).

La metáfora de los “cinturones” viene del mundo de las artes marciales, como el karate o el judo, donde los colores de los cinturones indican el nivel de dominio de una persona. En Six Sigma se

adoptó esta idea para simbolizar el progreso y la autoridad técnica de un practicante dentro de la metodología.

- **White Belt:** Nivel más básico. Proporciona una visión general de los principios Six Sigma, el pensamiento de mejora continua y la identificación de desperdicios. Las personas con este nivel no suelen participar activamente en proyectos, pero comprenden el lenguaje y pueden apoyar iniciativas locales en sus áreas de trabajo.
- **Yellow Belt:** Introduce herramientas básicas como el mapeo de procesos, análisis causa-raíz y conceptos del ciclo DMAIC. Los Yellow Belts participan como miembros de equipos en proyectos liderados por Green o Black Belts, contribuyendo en la recolección de datos y en la implementación de soluciones simples.
- **Green Belt:** Tienen un conocimiento más profundo de la metodología DMAIC y están capacitados para utilizar herramientas estadísticas y de calidad. Son responsables de liderar proyectos dentro de su área funcional, generalmente sin dedicación exclusiva, y trabajan bajo la supervisión de un Black Belt. Su labor se centra en resolver problemas específicos, mejorar procesos y reducir variabilidad en operaciones.
- **Black Belt:** Están altamente capacitados en técnicas avanzadas de análisis estadístico, gestión del cambio y liderazgo de equipos multidisciplinarios. Dedicados a tiempo completo, lideran proyectos de alto impacto que cruzan funciones dentro de la empresa. Además, forman y asesoran a Green Belts, fomentando una cultura de mejora continua. Tienen un rol clave en la alineación de los proyectos Six Sigma con los objetivos estratégicos de la organización.
- **Master Black Belt:** Son expertos en la metodología y tienen una comprensión profunda de la gestión organizacional. Actúan como mentores de Black y Green Belts, diseñan e implementan estrategias globales de mejora continua, y colaboran con la alta dirección para identificar oportunidades a largo plazo. También desarrollan métricas clave, estructuras de formación y estándares de calidad en toda la organización. ^[18]

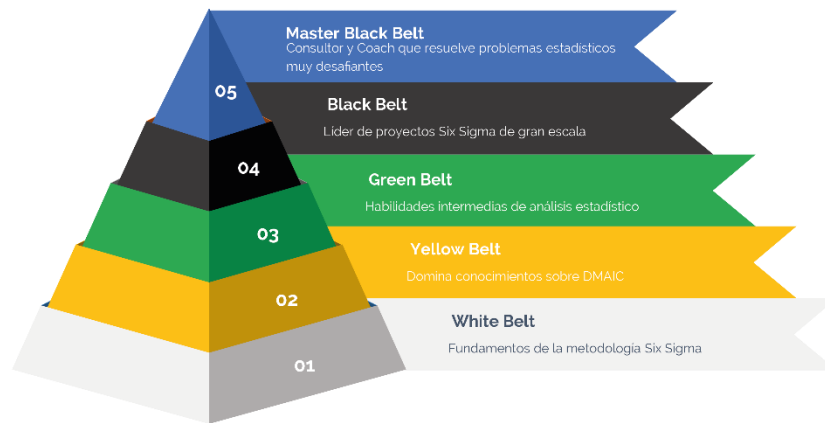


Figura 2. Jerarquía en certificaciones Six Sigma.

El impacto en la aplicación de la metodología Six Sigma, depende en gran medida de la estructura del equipo de trabajo, en ella existe una jerarquía en roles de los participantes del proyecto (Figura 3).

- **Champion:** Generalmente un alto directivo, que se encarga de asignar recursos, eliminar obstáculos y brindar soporte estratégico al equipo.
- **Master Black Belt:** Experto en metodologías Six Sigma cuya función principal es capacitar y asesorar a los Black Belts y Green Belts, además de supervisar múltiples proyectos para asegurar el cumplimiento riguroso de la metodología.
- **Controller:** Encargado de evaluar la viabilidad económica del proyecto, validar los ahorros estimados, cuantificar el impacto financiero de las mejoras implementadas y asegurar que los beneficios sean sostenibles en el tiempo.
- **Black Belt:** Lidera directamente el proyecto, se dedica de tiempo completo a su ejecución y es responsable tanto del análisis estadístico como de la aplicación del ciclo DMAIC.
- **Green Belt:** Apoya al Black Belt liderando tareas específicas, recopilando y analizando datos, y trabajando directamente con el personal operativo. Su rol es clave para identificar problemas, proponer mejoras basadas en datos y asegurar que las soluciones sean viables y sostenibles, todo con un conocimiento práctico de Six Sigma.
- **Dueño del proceso y equipo operativo:** Está compuesto por expertos del área donde se lleva a cabo el proyecto; su conocimiento del proceso resulta fundamental para identificar problemas, proponer soluciones y contribuir de forma activa en todas las fases del proyecto.



Figura 3. Jerarquía del equipo en un proyecto Six Sigma.

1.6 Ciclo DMAIC

La metodología Six Sigma plantea una estrategia de trabajo denominada *DMAIC* (por sus iniciales en inglés *Define, Measure, Analyze, Improve and Control*) (Figura 4). Esta estructura está basada en el análisis y toma de datos que se usa para el proceso de mejora, enfocada específicamente en el uso de herramientas de control estadístico.



Figura 4. Ciclo DMAIC de la metodología Six Sigma.

1.6.1 Definiciones del ciclo DMAIC

- **Definir:** Se especifica el proyecto, es decir, se delimita el problema o la situación en la que se trabajará y se sientan las bases para su éxito. Por lo tanto, al finalizar esta fase se debe tener claro el objetivo del proyecto, la forma de medir su éxito, su alcance, los beneficios potenciales y las personas que intervienen en este. Posteriormente se reportará en un documento denominado “Project Charter”. La selección del proyecto, por lo general, es responsabilidad de los Champions y/o de los Black Belts. Los criterios a considerarse para la selección y definición del proyecto se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios para la selección y definición de un proyecto Six Sigma.

Criterios para la selección de proyectos Six Sigma
Aborda áreas de mejora de alto impacto: Reducir defectos o desperdicios en las etapas más críticas de un proceso. Ligado directamente a la satisfacción del cliente (quejas, reclamos, tiempos largos de atención, burocracia). Mejorar la capacidad de los procesos. Incrementar el flujo del trabajo en los procesos (organización del proceso, reducción del tiempo de ciclo, eliminar actividades que no agregan valor).
Apoyo y comprensión de la alta dirección: La importancia del proyecto es clara para la organización. El proyecto cuenta con el apoyo y la aprobación de la dirección (o gerencia) de la empresa.
Efectos fundamentales: Se espera que el proyecto tenga beneficios monetarios importantes (medibles), que se reflejen en un tiempo menor a un año, así como su factibilidad para realizarse en un intervalo de tiempo de 3 a 6 meses. Para medir el éxito del proyecto se tienen métricas cuantitativas claras, por lo que es fácil medir el punto de partida y los resultados.

Aspectos a evitar en el proyecto:

- Objetivos vagos e imprecisos.
- Indicadores insuficientes para medir el impacto.
- No ligado a lo financiero.
- Alcance demasiado amplio.
- No ligado a los planes estratégicos anuales.
- Soluciones indefinidas.
- Demasiados objetivos.

Una vez identificado un proyecto tentativo, se asigna un líder o responsable del proyecto, puede ser un Black Belt, Green Belt o un candidato a estas categorías, no debe formar parte del proceso operativo, debe contar con cierto conocimiento sobre el mismo. Además, se debe buscar que el líder cuente con la motivación y el liderazgo que le permitan guiar a los miembros del equipo.

El resto de los integrantes del equipo se asignan con base en lo que pueden aportar y la necesidad de contar con diferentes puntos de vista, experiencias y especialidades y el propio líder del equipo es copartícipe de la formación de este.

- **Medir:** El objetivo es entender y cuantificar mejor la magnitud del problema o situación que se aborda con el proyecto. Por ello, el proceso se define a un nivel más detallado para comprender el flujo de trabajo, los puntos de decisión y los detalles de su funcionamiento. Asimismo, se establecen con mayor precisión las métricas críticas del proyecto, conocidas como “Y” en la metodología Six Sigma, las cuales representan las salidas del proceso que se desean mejorar y con las que se evaluará el éxito del proyecto. Además, se analiza y valida el sistema de medición para garantizar que estas Y pueden medirse de forma consistente. Una vez validado el sistema, se procede a medir la situación actual (o línea base), lo que permite clarificar el punto de partida del proyecto respecto a dichas métricas. Como parte del enfoque metodológico, se utilizan herramientas como el mapeo de procesos a un nivel detallado, el estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), así como diversas técnicas estadísticas que permiten establecer una base sólida para el análisis. Entre ellas se

encuentran las herramientas básicas de calidad, el análisis de capacidad del proceso, el AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Fallos) y las métricas propias de la metodología Six Sigma.

A través de este análisis se comienzan a identificar posibles causas, proyectando así los niveles de mejora esperados. Cabe destacar que el uso de herramientas estadísticas rigurosas es esencial para generar hipótesis fundamentadas y tomar decisiones basadas en datos confiables.

- **Analizar:** Los principales objetivos de esta fase son identificar las causas raíz del problema (también conocidas como “X” vitales), comprender de qué manera influyen en la generación del defecto y validar dichas causas a través de datos objetivos. Para llegar a estas “X” vitales, es necesario comenzar identificando todas las variables de entrada y las posibles causas que podrían estar relacionadas con el problema.

Las herramientas de utilidad en esta fase son: lluvia de ideas, diagrama de Ishikawa, pareto de segundo nivel, mapeo de procesos, diseño de experimentos, prueba de hipótesis, diagrama de dispersión, matriz causa y efecto, X’s tracking, entre otras.

- **Mejorar:** El objetivo es proponer e implementar soluciones que atiendan las causas raíz, es decir, asegurarse de que se corrige o reduce el problema. Es recomendable generar diferentes alternativas de solución que atiendan las diversas causas, apoyándose en algunas de las siguientes herramientas: lluvia de ideas, técnicas de creatividad, hojas de verificación, diseño de experimentos, poka-yoke, etc. La clave es pensar en soluciones que ataquen la fuente del problema (causas) y no el efecto.

Una vez identificadas todas las áreas de oportunidad, de haber evaluado las opciones posibles y determinado las acciones tentativas, se diseña un plan de acción (PDCA) para trabajar con base a él. Este PDCA se documentará para la generación de un históricos y así crear un manual de calidad en el proceso, el cual tendrá como objetivo apoyar en la toma de decisiones en un futuro sin la necesidad de comenzar todo el proceso de nuevo, ahorrando tiempo y recursos. Es importante que se realicen planeaciones, al igual que en la primera fase de la metodología, sustentadas en herramientas diseñadas para ello.

- **Controlar:** Una vez alcanzadas las mejoras deseadas, la fase de control tiene como propósito garantizar la sostenibilidad de los resultados obtenidos, evitar que los problemas

originales se repitan y promover la mejora continua. Para ello, se implementa un sistema que permita controlar las variables críticas del proceso (X vitales) y formalizar el cierre del proyecto.

Esta etapa implica institucionalizar los cambios, lo cual requiere la adaptación de todas las personas involucradas y puede generar resistencias. El objetivo es que las mejoras soporten la prueba del tiempo mediante acciones de control a nivel de proceso, documentación y monitoreo.

Primero, se estandariza el proceso a través de mejoras permanentes en los métodos de operación, evitando depender exclusivamente de controles manuales. En este punto, pueden aplicarse dispositivos a prueba de errores (poka-yoke). Seguido, se documenta el plan de control con procedimientos claros, accesibles y actualizables, que incluyan formatos como hojas ilustradas, videos o manuales, además de una adecuada capacitación del personal.

Posteriormente, se establece un sistema de monitoreo que permita verificar que el desempeño del proceso se mantenga dentro de los niveles deseados. Para ello, se utilizan herramientas estadísticas como las cartas de control, asegurando que las variables clave, tanto de entrada como de salida, sean vigiladas correctamente en cuanto a frecuencia, especificaciones, capacidad y estabilidad.

Cuando se procede al cierre del proyecto, se documentan todos los elementos clave en un expediente que incluya desde la selección del proyecto hasta el plan de control final. También se elabora un resumen de los principales cambios implementados, su impacto y los aprendizajes obtenidos. Esta información se difunde mediante reportes, presentaciones o comunicaciones internas, con el fin de reforzar el compromiso organizacional con la estrategia Six Sigma.^[16]

1.7 Herramientas Six Sigma

La metodología Six Sigma se apoya en un conjunto robusto de herramientas estadísticas y de gestión que permiten analizar, controlar y mejorar procesos de manera sistemática. Estas herramientas son esenciales para identificar las causas raíz de los problemas, reducir la variabilidad y garantizar la calidad en productos y servicios. Dichas herramientas deberán seguir una secuencia a lo largo de cada etapa del ciclo DMAIC.

- **Project Charter:** En esta herramienta se delimita el alcance y ayuda a definir los objetivos, estableciendo así, los lineamientos, fechas de los entregables y las funciones de las personas involucradas en el proyecto, manteniendo comunicado al responsable del plan de trabajo a realizar (Figura 5).^[19]

Figura 5. Project Chart para Six Sigma.

- **Moon View:** Diagrama descriptivo de las etapas del proceso mediante una secuencia de pasos, en el cual se resaltan las etapas críticas del proceso (donde surgen los problemas o errores) (Figura 6).



Figura 6. Diagrama de proceso.

- **Diagrama Pareto:** Es un gráfico de barras en el que se utilizan datos categóricos (cualitativos nominales), su objetivo es identificar las causas o los defectos de los problemas en el proceso e indicar en qué situación se encuentra un punto más crítico, pues ordena los datos en un orden ascendente (Figura 7).^[13]

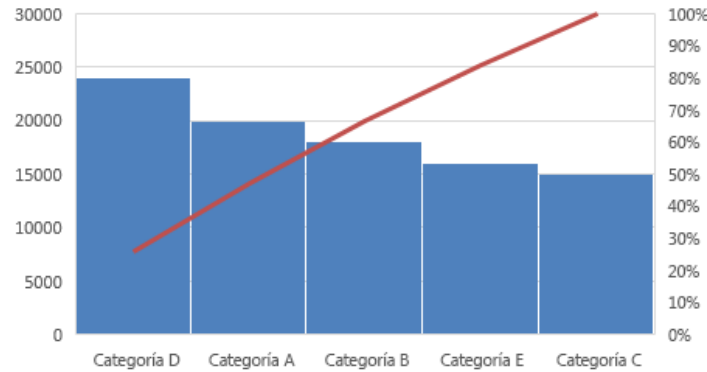


Figura 7. Diagrama Pareto.

- **Gage R&R:** Estos estudios analizan la variación en los sistemas de medición, evaluando tanto la repetibilidad como la reproducibilidad. Estos estudios son fundamentales para asegurar que las mediciones obtenidas en un proceso sean confiables y consistentes. Se pueden realizar con datos continuos o por atributos, dependiendo de la naturaleza del proceso y los tipos de medición utilizados.

En un estudio de Gage R&R con datos continuos (cuantitativos) (Figura 8), se evalúa la variación causada por el instrumento de medición (repetibilidad) y la variación entre operadores (reproducibilidad). La repetibilidad se refiere a la variación que ocurre cuando un mismo operador mide la misma pieza con el mismo instrumento varias veces bajo las mismas condiciones. La reproducibilidad, por su parte, es la variación observada cuando diferentes operadores miden la misma pieza con el mismo instrumento.

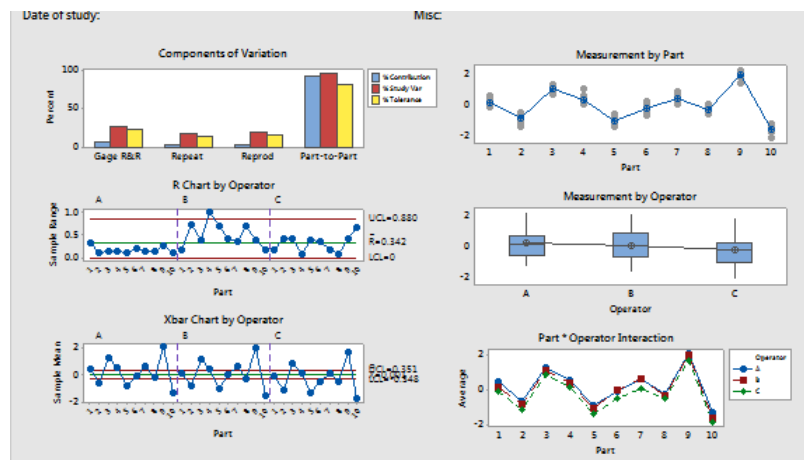


Figura 8. Gage R&R datos continuos.

Por otro lado, en el caso de Gage R&R por atributos (cualitativos), se evalúa la capacidad de los operadores para clasificar correctamente las piezas según características específicas (por ejemplo, defectos o conformidad). La repetibilidad se refiere a la capacidad de un operador para clasificar de manera consistente la misma pieza, y la reproducibilidad a la capacidad de diferentes operadores para llegar a un acuerdo sobre la clasificación. En la Tabla 2 se presentan los criterios de aceptación de Gage R&R para datos continuos y por atributos. ^[20]

Tabla 2. Criterios de aceptación en un Gage R&R dependiendo de la naturaleza de los datos.

Criterio	Tipo de datos	
	Continuos	Atributos
Porcentaje de aceptación	Acceptable < 10% Puede ser aceptable de 10% a 30% (condicionado) No acceptable > 30%	Acceptable > 90% No acceptable < 90%

- **Gráficos de control:** Son herramientas estadísticas que utilizan datos continuos (cuantitativos) o por atributos (cualitativos), se utilizan para monitorear la estabilidad y el comportamiento de un proceso a lo largo del tiempo. Sirven para distinguir entre variaciones normales (causas comunes) y variaciones anómalas (causas especiales) que podrían indicar un problema en el proceso. Están conformados por el límite superior, la línea central y el límite inferior (Figura 9).

Entre los diferentes tipos de gráficos de control se encuentra el gráfico P, el cual se utiliza para monitorear la proporción de unidades defectuosas por piezas producidas al día en un proceso. Se aplica a datos por atributos, donde cada unidad inspeccionada se clasifica como conforme o no conforme, y permite detectar variaciones anormales en la calidad del proceso a lo largo del tiempo. ^[21]

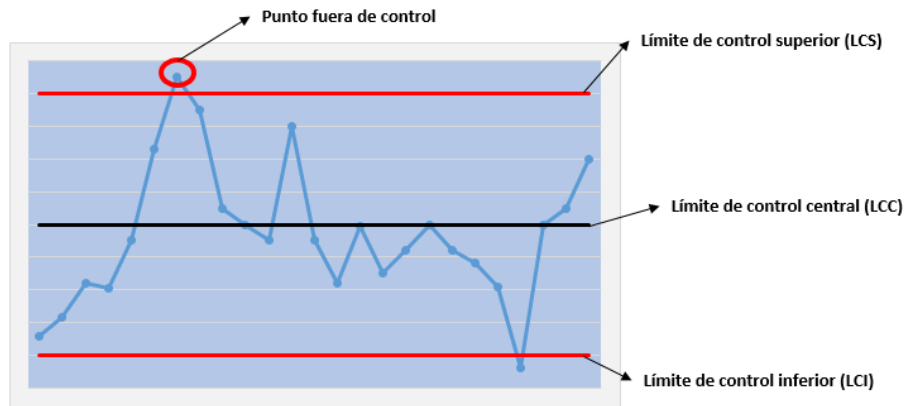


Figura 9. Gráfico de control de procesos.

- **Diagrama Ishikawa (diagrama espinas de pescado)** : Es una herramienta de calidad que permite identificar y organizar las posibles causas de un problema. Se utiliza principalmente para encontrar las raíces de fallos en procesos, estructurando las causas en categorías como materiales, métodos, mano de obra, maquinaria, medio ambiente y medición (Figura 10). Se puede utilizar para estructurar una sesión de lluvia de ideas e inmediatamente se ordenan las ideas en categorías.

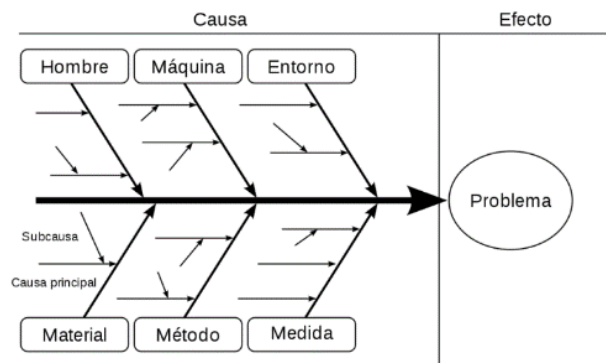


Figura 10. Ishikawa o diagrama de espina de pescado.

- **Matriz C-E:** En la matriz, las salidas Y clave del proceso o producto se colocan en filas horizontales y se les asigna una calificación del 1 al 10 según su importancia para el funcionamiento del producto. En las columnas verticales se enlistan las causas potenciales X, también calificadas del 1 al 10 según su correlación con cada salida clave. Posteriormente

se multiplican ambos valores y se suman los resultados por causa potencial. Las causas con mayor puntaje se priorizan para análisis posteriores, y el equipo, junto con el Master Black Belt, define un plan de recolección de datos y selecciona la técnica estadística adecuada para validar su impacto sobre la salida del proceso (Figura 11). ^[19]

**MATRIZ CAUSA Y EFECTO
XY MATRIX**

Proceso

Fecha

Xs Escala :

0- Sin impacto 1- Impacto bajo 4- Impacto medio 9- Impacto alto

Grado de importancia de Ys		Característica #										Total		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Salidas del proceso (Ys)	Entradas del proceso (Xs)	1											0	1
		2											0	2
		3											0	3
		4											0	4
		5											0	5
		6											0	6
		Sum											0	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			

Figura 11. Matriz Causa y Efecto.

- **X's Tracking:** Es un registro sistemático de las variables de entrada identificadas como posibles causas del problema o de la variación en el proceso. Su objetivo es observar cómo se comportan esas variables a lo largo del tiempo, si están dentro de los rangos esperados, y cómo pueden estar afectando las salidas Y del proceso. Con ayuda de este registro, es posible monitorear el cumplimiento de especificaciones o condiciones de operación del proceso (Figura 12).

X's Tracking								
ID	Hipótesis	Datos			Análisis		Resultados	
	1	2			3		4	
	X Descripción	C&E resultados	Factor retenido	X Categoría	Evaluación en proceso	Resultados	X s Clave	Remark
1								
2								
3								
4								
5								

Figura 12. X's Tracking.

- **Plan de acción (Ciclo PDCA):** Es un registro que se utiliza para planificar, ejecutar, revisar y ajustar los procesos con el fin de lograr mejoras sostenibles a lo largo del tiempo (Figura 13). [15]

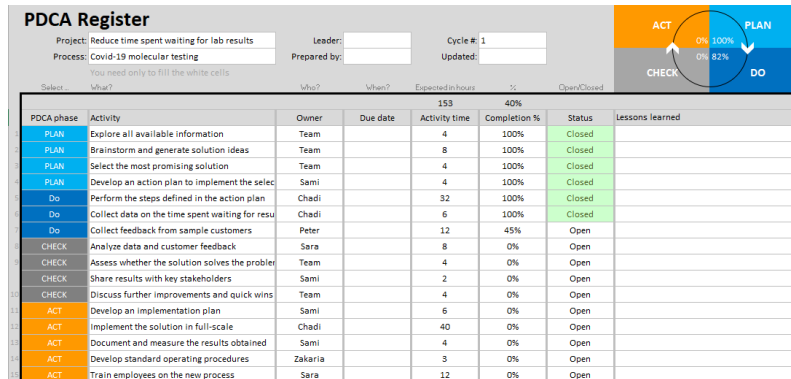


Figura 13. Plan-Do-Check-Act

- **Heat map:** Es una representación gráfica que usa colores para mostrar la intensidad, frecuencia o concentración de un fenómeno sobre una superficie o conjunto de datos. [22]
- **Prueba Z para dos proporciones:** Es una herramienta estadística donde se utilizan datos categóricos binarios, la cual permite comparar dos proporciones independientes para determinar si existe una diferencia significativa entre ellas. Se plantean dos hipótesis: la hipótesis nula (H_0), que afirma que ambas proporciones son iguales, y la hipótesis alternativa (H_1), que indica que son distintas. Si el valor Z es elevado y el p-value es muy bajo (cercano a 0), se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las proporciones evaluadas. [23]

1.8 Lean Manufacturing

El Lean Manufacturing tiene su origen en el sistema de producción Just in Time (JIT), que fue desarrollada en los años 50 por Toyota. Esta filosofía a través de los años se ha ido modificando y convirtiendo en el paradigma de los sistemas de mejora de la productividad asociada a la excelencia industrial. El objetivo de esta metodología (manufactura esbelta) es reducir las actividades innecesarias con el propósito de disminuir retrabajos y el tiempo ciclo, ahorrar costos e incrementar la productividad.

Un punto de partida fundamental para implementar procesos esbeltos consiste en identificar y hacer visibles los desperdicios presentes en las actividades productivas. Más allá de aplicar técnicas específicas, lo esencial es establecer una serie de principios que orienten las acciones hacia la eliminación de elementos que generan ineficiencias, como la lentitud, el exceso de tareas innecesarias, los cuellos de botella o cualquier otra forma de “carga” que obstaculice el flujo de trabajo.

Entre las principales herramientas utilizadas en Lean Manufacturing se encuentran las 5S, el just in time, los poka-yoke, el SMED, el takt time y el kaizen, entre otras. Estas herramientas tienen como finalidad optimizar los procesos, eliminar desperdicios, reducir tiempos de ciclo y mejorar la eficiencia operativa. En conjunto, permiten crear flujos de trabajo más ágiles, flexibles y orientados al cliente, lo que se traduce en una mayor calidad, menores costos, mejor aprovechamiento de recursos y un entorno laboral más ordenado y seguro.

La metodología de las 5S es una estrategia de mejora continua basada en cinco pasos: eliminar lo innecesario, ordenar, limpiar, estandarizar y fomentar la disciplina. Su objetivo es crear una cultura organizacional enfocada en el orden y la limpieza, sirviendo como base para otras herramientas de mejora (Figura 14). Entre sus principales beneficios se encuentran: facilitar el acceso a herramientas y materiales, evitar búsquedas innecesarias, conservar en buen estado los equipos, mejorar visualmente el entorno de trabajo, incrementar la seguridad, reducir pérdidas, fomentar el trabajo en equipo y es aplicable tanto en entornos de manufactura como de servicios. [24]



Figura 14. Desperdicios en Lean Manufacturing.

1.9 Lean Six Sigma

Muchos procesos no cumplen con las expectativas del cliente ni alcanzan las metas de productividad debido a su lentitud e ineficiencia. Para hacer frente a estas limitaciones, la metodología Six Sigma se complementa con los principios de Lean Manufacturing, dando origen a Lean Six Sigma. Esta combinación surge con el objetivo de responder de manera más eficaz a las demandas del cliente en términos de calidad, costo y tiempos de entrega. ^[25]

Lean Manufacturing aporta al enfoque Six Sigma herramientas como la flexibilidad en los procesos, el trabajo en equipo, la estabilidad operativa y el flujo continuo. Por su parte, Six Sigma contribuye con metodologías estructuradas para la solución de problemas, la reducción de la variación y el rediseño o innovación de procesos. Juntas, ambas filosofías permiten alcanzar mejoras significativas: reducción de costos, disminución en los tiempos de entrega, mejora en la calidad del producto o servicio y una mayor satisfacción tanto del cliente como del personal involucrado. (Figura 15). ^[26]



Figura 15. Pilares que forman Lean Six Sigma

Capítulo II. Metodología

Se describirán cada una de las etapas de la metodología Lean Six Sigma y sus herramientas aplicadas a la problemática señalada en la empresa automotriz.

2.1 Definir.

Se creará un pareto de primer nivel con los datos cualitativos de los diversos defectos que se presentaron de abril a septiembre de 2024 en las botoneras, con ayuda de este gráfico se identificará el mayor ofensor que es el defecto que provocando la mayor cantidad de pérdidas económicas y del producto (Figura 16).



Figura 16. Botoneras con presencia del defecto escurrimiento de barniz.

Mediante el uso del Moon View que representa el diagrama del proceso, se localizarán las etapas críticas del proceso las cuales son donde surge el defecto y donde es posible identificarlo.

Con base a los datos recopilados anteriormente, el Champion, el Black Belt y el dueño del proceso establecerán los objetivos y alcances del proyecto.

Posteriormente, se conformará el equipo de trabajo y se comunicarán los roles de cada integrante.

Finalmente, se trabajará en el Project Charter, en el cual se vacía toda la información ya establecida y se firma por todo el equipo.

2.2 Medir

Una vez definido el problema, es necesario comenzar a medir su magnitud. En esta fase del proyecto, se recopilarán los datos de los defectos que se presentaron en las botoneras diariamente.

Se crearán paretos de cada mes los cuales mostrarán el comportamiento del defecto escurrimiento de barniz (un escurrimiento por pieza). Posteriormente se presentará un grafica mensual que mostrará la evolución del defecto. En ella se visualizarán tres indicadores claves: el porcentaje de scrap, la pérdida monetaria y la cantidad de piezas defectuosas. A partir de esta información, se estimarán las perdidas por mes en términos de piezas, así como un costo aproximado de ello.

Utilizando la información recopilada de las piezas defectuosas por escurrimiento de barniz y las piezas producidas semanalmente, se creará un gráfico de control tipo P en Minitab. El cual demostrará si el proceso es estable o no lo es.

Dado que los datos utilizados en este proyecto son de tipo cualitativo, se aplicará un estudio de repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición por atributos. El estudio se llevará a cabo durante los tres turnos de producción del proceso, solicitando la participación activa de los inspectores encargados del control final. A cada inspector, en su respectivo turno, se le presentarán 22 piezas de forma individual y aleatoria con el propósito de su evaluación y clasificación como piezas conformes (OK) o no conformes (NOK), identificando además el tipo de defecto presente.

Posteriormente, los resultados obtenidos por cada inspector se compararán con la clasificación de referencia previamente establecida, lo cual permitirá evaluar la concordancia y la precisión del sistema de inspección.

2.3 Analizar

Se realizará una lluvia de ideas para saber cuáles podrían ser las posibles causas del escurrimiento de barniz. Posteriormente, se clasificarán estas causas potenciales en el Ishikawa respecto a las siguientes categorías: método, mano de obra, máquina, materiales, medición y medio ambiente.

Una vez teniendo organizadas las causas potenciales, se utilizará la matriz causa y efecto. En esta herramienta se colocarán las todas las causas organizadas en la columna de entradas y en la fila de

salidas en la primera posición la problemática principal que es el escurrimiento de barniz, enseguida en las siguientes celdas se colocarán los problemas que surgen dentro del proceso que estén relacionados al escurrimiento de barniz. Estas causas se ponderarán del 1 al 9 para saber que tan fuerte es su relación con la problemática principal.

Posteriormente se seleccionarán las causas con mayor puntaje para vaciarlas en el X's Tracking. En este documento las causas se convertirán en hipótesis, las cuales deberán refutarse o aceptarse. Por lo tanto, se realizará una auditoría en el proceso para revisar cada una de las hipótesis. A partir de los resultados del X's tracking se identificará la causa raíz del escurrimiento de barniz.

2.4 Mejorar

Con base a lo anterior, se tomarán acciones para solucionar y prevenir, es decir, se creará un Plan de Acción basado en el Ciclo PDCA, en el cual se detallan las actividades concretas, los responsables, los plazos y los recursos necesarios para implementar las soluciones.

2.5 Controlar

Con base en los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se establecerán ciertas acciones preventivas y correctivas las cuales se pretende que sean permanentes. Este es el mayor reto dentro del proyecto, ya que depende de la disciplina de los dueños del proceso para que la mejora continúe.

Capítulo III. Resultados y discusión

3.1 Definir

De acuerdo con los datos obtenidos en esta etapa, la Figura 17 muestra el pareto de primer nivel en donde las categorías son los diferentes defectos que pueden surgir a lo largo del proceso de pintura de las botoneras. En el eje de las abscisas se encuentran los posibles defectos y en el eje de las ordenadas el respectivo costo por el scrap en dólares de abril a septiembre de 2024. Se puede observar que el mayor ofensor es el defecto escurrimiento de barniz, ya que en un lapso de cinco meses provocó una pérdida de \$24,385 dólares en la empresa. Esto representa una pérdida económica alarmante, ya que, a diferencia de otros defectos, las piezas con escurrimiento de barniz no se pueden retrabajar.

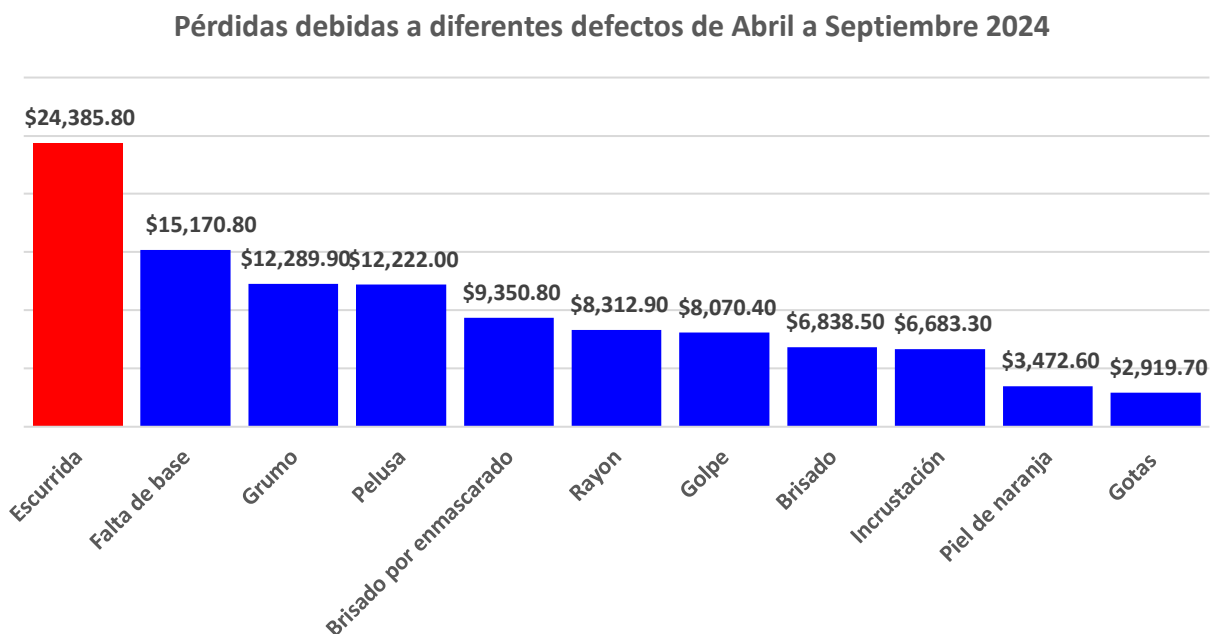


Figura 17. Pareto de los defectos que se presentan en la línea de pintura de las botoneras.

La Figura 18 muestra el diagrama Moon View del proceso de pintura, el cual indica la secuencia de los pasos y su trayectoria. Debido a que el mayor ofensor es el escurrimiento de barniz, las etapas críticas son la aplicación del barniz y la inspección final del producto, ya que son los pasos en donde se genera y se identifica el defecto.

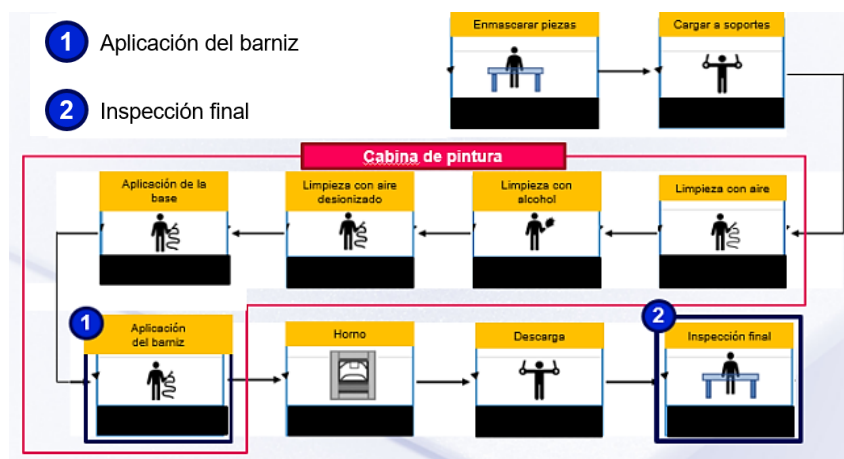


Figura 18. Moon View del proceso de pintura de las botoneras.

El Champion, el Black Belt y el dueño del proceso establecieron como objetivo principal reducir el porcentaje de scrap provocado por el escurrimiento de barniz del 7% al 3%. Se estimó que al realizar la mejora, el ahorro anual será de \$53,628 dólares.

Una vez establecidos los objetivos y alcances del proyecto, se conformó el equipo de trabajo, conformado por: el Gerente de la planta, el Controller, el Black Belt, el Green Belt, diferentes encargados en el área de pintura como el Gerente del área de pintura, el Ingeniero de Calidad, el Ingeniero de Procesos, el Especialista del Proceso, los supervisores el GAP líder y los operadores. Cada miembro del equipo conoce claramente la jerarquía y sus responsabilidades dentro del proyecto (Figura 19).

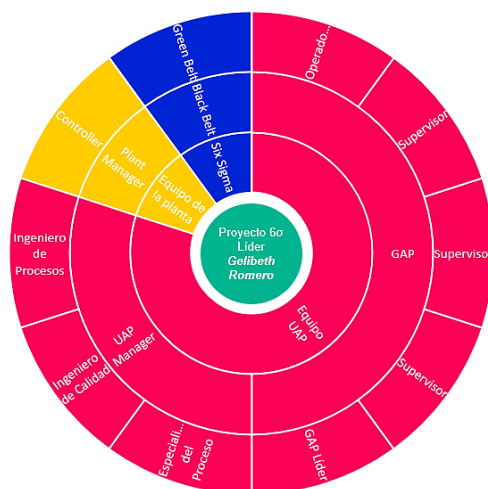


Figura 19. Equipo de trabajo para proyecto Six Sigma en el área de pintura.

La Figura 20 presenta el Project Charter, utilizado para documentar los objetivos y alcances del proyecto. El documento fue validado mediante la firma del Gerente de Planta, el Controller, el Black Belt, el Green Belt, el Ingeniero de Calidad, el Ingeniero de Procesos y el Especialista del Proceso, quienes, debido a la relevancia de sus funciones dentro del proceso, lideran equipos y gestionan información crítica para su desarrollo.

Six Sigma Project Charter

Project Title: Reduction of scrap caused by paint drops in painting process for the

Project Number: 88

Type of project: 88

Plant:

BG - Division:

6σ Project Leader: Gelibeth Tania Romero Pérez

Starting Date: 12/Sep/24

Initial closing date: 21/Dec/24

Initial length: 3.3 month OK

Simplicity: 93% Manageable

Financial Summary

Type of savings: Hard savings

Gross savings (initial calc.): 34000.0 €

Net savings (initial calc.): 34000.0 €

Payback (in months after project start): 5 months

Ease of Implementation

OK

Problem Description

On line there is a scrap issue where the biggest offender are the paint drops. In the last few months, this defect has caused a loss of up to \$6,629 dollars. The average scrap due to clear runs per month is 649 parts.

Objective of the project

Reduce the scrap resulting from clear runs from 7% to 3%.

Forecasted savings

\$53,628 USD per year.

Metrics descriptions

Indicator: Defects (clear runs)

Description: Number of defective parts due to clear runs at the oven exit.

Baseline value:

Target value:

Baseline period:

Financial Breakdown

Resources & Project Timing

	Sep/24	Oct/24	Nov/24	Dec/24	Jan/25	Feb/25	Mar/25	Apr/25
Project Manager								
Plant Controller								
6σ Manager								
Process Specialist Level 2								
Quality Engineer								
Process Engineer								
Project Leader								

Team Member's

Name	Function
	Plant Manager
	Plant Controller
	6σ Manager
	Process Specialist Level 2
	Quality Engineer
	Process Engineer
Gelibeth Romero	Project Leader

Validation

6σ Project Leader: Process Owner: Financial Controller: Plant Manager: Champion: MBB

Name:

Date:

Signature's:

Figura 20. Project Charter del proyecto Six Sigma del área de pintura.

3.2 Medir

Una vez identificado el problema y establecido los objetivos y alcances en esta etapa se presentan los paretos de cada mes de mayo a agosto (Figura 21), contruidos con datos cualitativos los cuales son los defectos que surgen durante el proceso de pintura de las botoneras.

En mayo, el defecto de escurrimiento de barniz generó una pérdida de \$1,396 dólares, ocupando el sexto lugar entre los defectos con mayores costos. En junio, escaló al segundo lugar, con una pérdida de \$1,678 dólares y a partir de julio, se convirtió en el principal generador de pérdidas, alcanzando los \$4,384 dólares, aumentando de manera continua para el mes de agosto, manteniéndose como el mayor ofensor con un impacto económico de \$7,507 dólares. Esta evolución progresiva evidencia que, entre todos los defectos, el escurrimiento de barniz fue incrementando su impacto mes con mes, hasta consolidarse como el principal problema a partir del mes de julio.

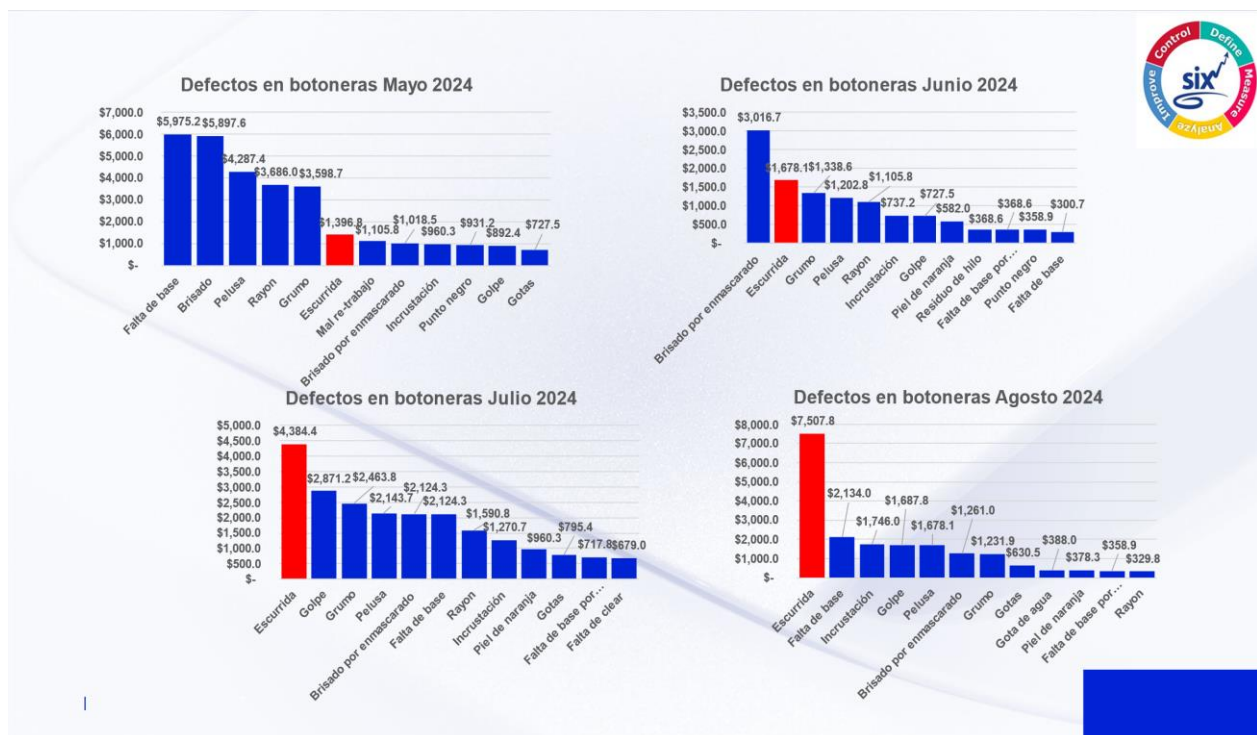


Figura 21. Paretos de cada mes de los defectos presentes en las botoneras.

La Figura 22 presenta el aumento del defecto escurrimiento de barniz mes con mes. Esto como resultado del desconocimiento por parte del equipo operativo de la causa raíz del problema, por lo que se realizaron cambios precipitados en los ejes del robot del barniz para solucionar el problema, lo cual lo agravó. Se estimo que si el problema seguía avanzando al mes se perderán \$6,294 dólares lo cual representa 649 piezas y una pérdida económica de \$75,528 dólares al año.

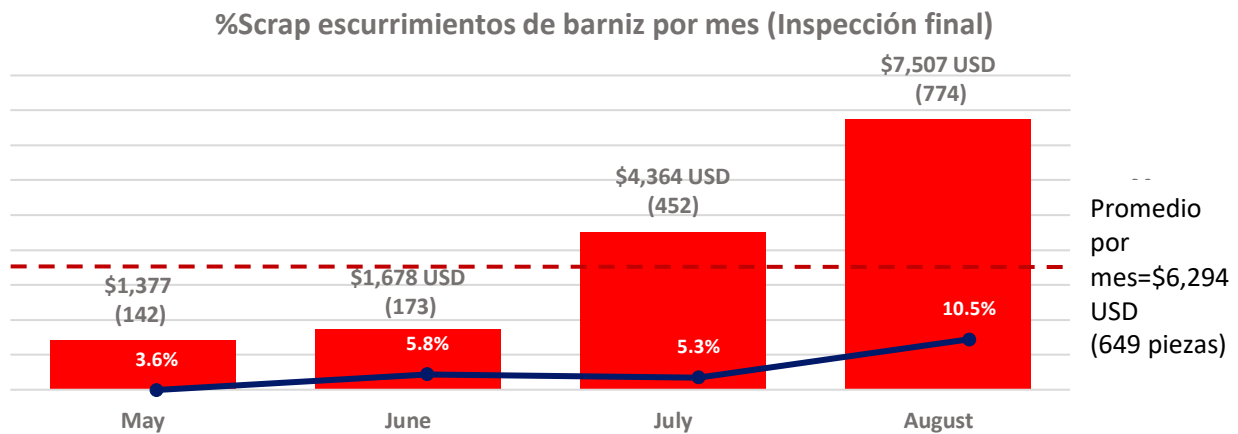


Figura 22. Evolución del defecto escurrimiento de barniz.

El gráfico de control tipo P, muestra la proporción de piezas defectuosas por escurrimiento de barniz respecto a las piezas producidas por semana. Se puede observar que más de la mitad de las semanas están fuera de los límites de control, por lo tanto, el proceso no es estable (Figura 23).

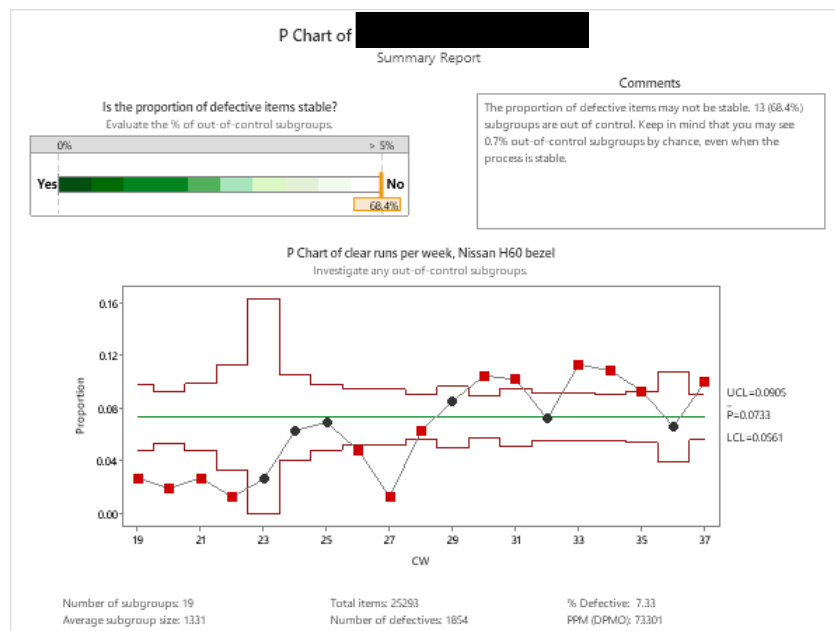


Figura 23. Gráfico de control P, piezas defectuosas debido al escurrimiento de barniz por semana.

En el estudio Gage R&R los inspectores 1 y 2 alcanzaron una concordancia del 100%, mientras que el inspector 3 obtuvo un 98%. Estos valores, al superar el umbral del 90%, indican que el

sistema de inspección es confiable y presenta un desempeño aceptable conforme a los criterios establecidos para estudios Gage R&R por atributos (Figura 24).

ATTRIBUTE GAGE R&R STUDY Measurement System												
Part Number :								Date :		10-Jul-24		
Characteristic :								Type of check:		Visual		
Measuring Device Number :								Number of parts :		50		
Number of repetitions:		3						S/R :		No		
S/W N° + Ind :								"2" :		No		
	Std Value	Type of defect (NOK)	Carmen A			Felipe			Magely			
1	NOK	Manchada	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
2	NOK	Daña	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
3	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
4	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
5	NOK	Brizada	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
6	NOK	Incrustación	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
7	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
8	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
9	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
10	NOK	Grumar mayor	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
11	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
12	NOK	Escorrida	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
13	NOK	Grumar mayor	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
14	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
15	NOK	Bakaka	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
16	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
17	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
18	NOK	Daña ZA	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
19	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
20	NOK	Palura ZA	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
21	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
22	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
23	NOK	Daña	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
24	NOK	Brizada	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	OK	NOK	NOK	
25	NOK	Escorrida	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
26	NOK	Brizada	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
27	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
28	NOK	Pielarrania	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
29	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
30	NOK	Incrustación	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
31	NOK	Palura	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
32	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
33	NOK	Brizada-palura	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
34	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
35	NOK	Grumar mayor	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
36	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
37	NOK	Brizada-rayna	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
38	NOK	Brizada ZA	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
39	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
40	NOK	Palura	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	
41	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
42	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
ATTRIBUTE GAGE R&R RESULTS (%)												
ASSESSMENTS			1		2		3		4			
Inspector score or repeatability (% of not mixed assessment)			100%		100%		98%					
Each Inspector versus Std (for not mixed assessment)	Full agreement to Std		100%		100%		98%					
	Disagreement to NOK Std (# parts assessed OK vs Std NOK)		0%		0%		0%					
	Disagreement to OK Std (# parts assessed NOK vs Std OK)		0%		0%		0%					
Between inspectors or System % Effective Score							98%					
All inspectors versus Std or System % Effective Score vs Reference							98%					
Comments :												
Engineering Validation			Quality Validation				Production validation					
Name - Date - Signature			Name - Date - Signature				Name - Date - Signature					
Decision Criteria			Inspector Score	Full Agreement	Disagreement to NOK Std	Disagreement to OK Std	Between Inspectors	All Inspectors vs Std				
Acceptable			≥ 90 %	≥ 90 %	0%	≤ 2 %	≥ 90 %	≥ 90 %				
Marginally acceptable - may need improvement			≥ 80 %	≥ 80 %	> 0	> 2 %	> 70 %	> 70 %				
Unacceptable - needs improvement			< 90 %	< 90 %	≤ 2 %	≤ 5 %	< 90 %	< 90 %				
			< 80 %	< 80 %	> 2 %	> 5 %	≤ 70 %	≤ 70 %				

Figura 24. Gage R&R por atributos en inspección final de las botoneras.

3.3 Analizar

En la lluvia de ideas que se realizó con el equipo del proyecto, se identificaron 19 causas potenciales que podrían estar provocando el escurrimiento de barniz. El diagrama Ishikawa muestra

la clasificación de las causas potenciales respecto a 6 categorías. El ordenarlas facilita la identificación de las áreas que requieren un análisis más profundo, en este caso la categoría de “máquina” fue en la que se encontraron más causas potenciales (Figura 25).

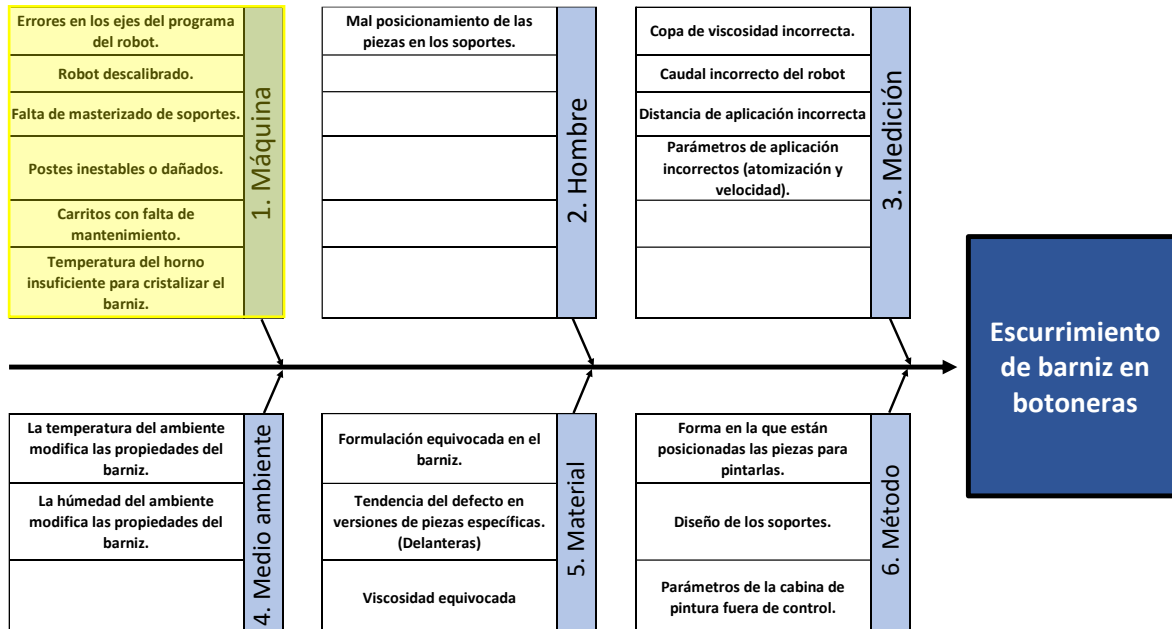


Figura 25. Ishikawa escurrimiento de barniz en botoneras.

Una vez identificadas y organizadas las causas potenciales del defecto mediante el diagrama Ishikawa, se procedió a evaluarlas cuantitativamente para priorizarlas. La Figura 26 muestra la ponderación de las 19 causas potenciales en la Matriz Causa-Efecto. La calificación final de cada causa se obtuvo multiplicando el grado de impacto del defecto en el proceso (valor asignado: 9) por el nivel de relación entre cada causa y el defecto (valor máximo: 9 en los casos más significativos).

En la columna denominada “Total” se muestran los puntajes obtenidos por cada causa. Aquellas que alcanzaron la puntuación más alta, equivalente a 81, fueron seleccionadas como relevantes, mientras que las demás fueron descartadas. Como resultado, se identificaron nueve causas potenciales con una fuerte correlación con el defecto de escurrimiento de barniz.

Figura 26. Matriz Causa y Efecto del proceso de pintura de las botoneras.

34

X's Tracking								
	Hipótesis	Datos			Análisis		Resultados	
	1	2			3		4	
ID	X Descripción	C&E resultados	Factor retenido	X Categoría	Evaluación en proceso	Resultados	X s Clave	Comentarios
1	Robot descalibrado.	144	Si	S	Check list	Hay evidencia de que el robot está calibrado.	No	
2	Errores en los ejes del programa del robot.	144	Si	C	Historial de actualizaciones en el programa.	No existe un documento en el cual se registren las modificaciones del programa.	Yes	
3	Falta de masterizado de soportes.	144	Si	S	Hojas de mantenimiento.	Válidado en documentación.	No	
4	Postes inestables o dañados.	144	Si	S	Hojas de mantenimiento.	Válidado en documentación.	No	
5	Carritos con falta de mantenimiento.	144	Si	S	Hojas de mantenimiento.	Válidado en documentación.	No	
6	Copa de viscosidad incorrecta.	144	Si	S	Registro de consumos.	Hay una ayuda visual y un documento que señala que copa usar para medir la viscosidad.	No	Liberación de primera pieza.
7	Distancia de aplicación incorrecta.	144	Si	C	Registro de parámetros.	Está predeterminada en el programa.	No	Liberación de primera pieza.
8	Parámetros de aplicación incorrectos (atomización y velocidad).	144	Si	C	Historial de actualizaciones en el programa.	Se registran diariamente los parámetros.	Yes	Liberación de primera pieza.
9	Formulación equivocada en el barniz.	144	Si	C	Ayudas visuales y receta.	Hay un documento con la receta en donde hacen las mezclas.	No	
10	Parámetros de la cabina de pintura fuera de control.	144	Si	C	Gráficos de control.	Los gráficos de control se encuentran estables.	No	

Figura 27. X's Tracking del proceso de pintura de las botoneras.

Se identificó que el programa del robot presentaba un desfase en puntos específicos de su trayectoria, lo cual generaba una aplicación irregular del barniz. Asimismo, la velocidad de aplicación era elevada, lo que, en combinación con la configuración de los puntos del recorrido, provocaba una acumulación excesiva de barniz en zonas específicas. Esta situación favorecía la aparición del escurrimiento, al no permitir que el material se distribuyera de manera uniforme sobre la superficie (Figura 28).

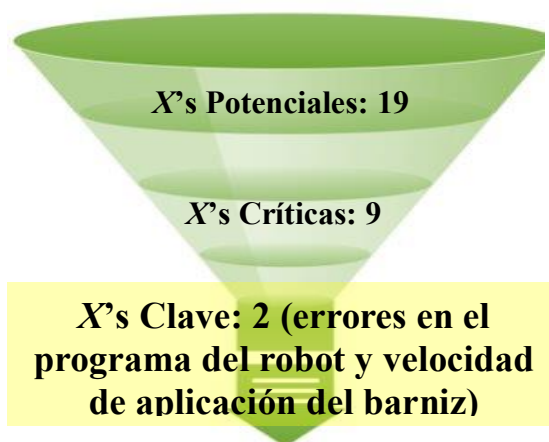


Figura 28. Causas raíz del escurrimiento de barniz.

3.4 Mejorar

La Tabla 3 muestra las acciones propuestas para solucionar el escurrimiento de barniz en la línea de pintura, las cuales se desarrollaron por diferentes integrantes del equipo de trabajo.

Tabla 3. Plan de Acción basado en el Ciclo PDCA para atacar el escurrimiento de barniz.

Fase PDCA	Actividad	Objetivo	Responsable	Semana (CW)	Indicador de seguimiento
PLAN	Creación del diagrama de guante.	Identificar contacto entre operador y piezas para análisis de posibles causas de defectos.	Green Belt e Ingeniero de Calidad	Semana 33	Diagrama documentado y validado
	Recopilación de datos de la frecuencia de la posición de las piezas defectuosas en el soporte de las botoneras.	Analizar patrones de defectos y determinar si hay una relación con la posición.	Green Belt	Semana 34	Base de datos con registros clasificados por posición
DO	Modificación del programa del robot (puntos de trayectoria y disminución de velocidad).	Ajustar el proceso para reducir el escurrimiento de barniz y mejorar la precisión de aplicación.	Especialista del proceso	Semana 34	Programa actualizado y validado en línea de producción
CHECK	Creación de gráfica mensual de la evolución del escurrimiento de barniz.	Evaluar si las modificaciones al robot han generado mejoras.	Green Belt	Semana 35	Gráfica generada mensualmente con tendencia
	Elaboración de gráfico P (piezas defectuosas por piezas producidas semanalmente), comparación antes y después de la mejora.	Medir la efectividad de la acción correctiva implementada.	Green Belt	Semana 35	Reducción porcentual de defectos evidenciada en gráfico
ACT	Estandarización del nuevo programa del robot y monitoreo continuo.	Asegurar la sostenibilidad de la mejora implementada y prevenir regresos a condiciones anteriores.	Ingeniero de proceso y especialista del proceso.	Semana 36	Procedimiento actualizado, capacitación realizada y revisión periódica documentada

Para modificar correctamente los puntos en los ejes del robot que estaban desfasados, se tenían que localizar las posiciones en las que se repetían las piezas defectuosas. La Figura 30 muestra un Heat

map del soporte en el que van las botoneras en el proceso de pintura, este diagrama se creó con el propósito de identificar las posiciones en las cuales se repetían las piezas defectuosas. Después de recolectar datos y vaciarlos en un gráfico dinámico de monitoreo de defectos, se identificó que la posición que repetía el defecto eran la A6, B6, C6, A7, B7 y C7.

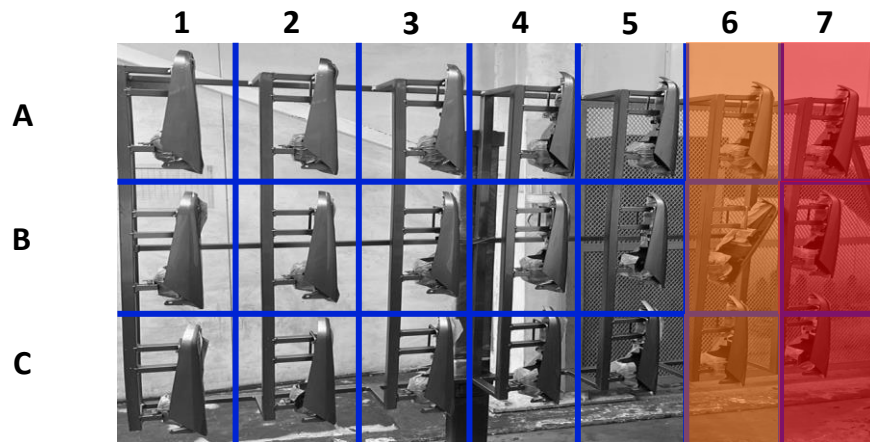


Figura 29. Heat map de los soportes de las botoneras.

Una vez reconociendo las posiciones afectadas, se modificaron los puntos de aplicación en los ejes del robot y se disminuyó la velocidad de aplicación del barniz (Figura 31).



Figura 30. Panel de control del robot del barniz.

Para confirmar la mejora se recolectaron los datos de scrap del producto y del defecto de los meses de septiembre y octubre. En el siguiente grafico se muestra la caída del scrap a partir del mes de septiembre, identificando una disminución aun mayor de piezas defectuosas por el escurrimiento de barniz, resultando tan solo 69 piezas en el último mes. Con base a estos datos, se estima que el ahorro anual debido a la implementación de esta mejora es de \$53,628 dólares (Figura 32).

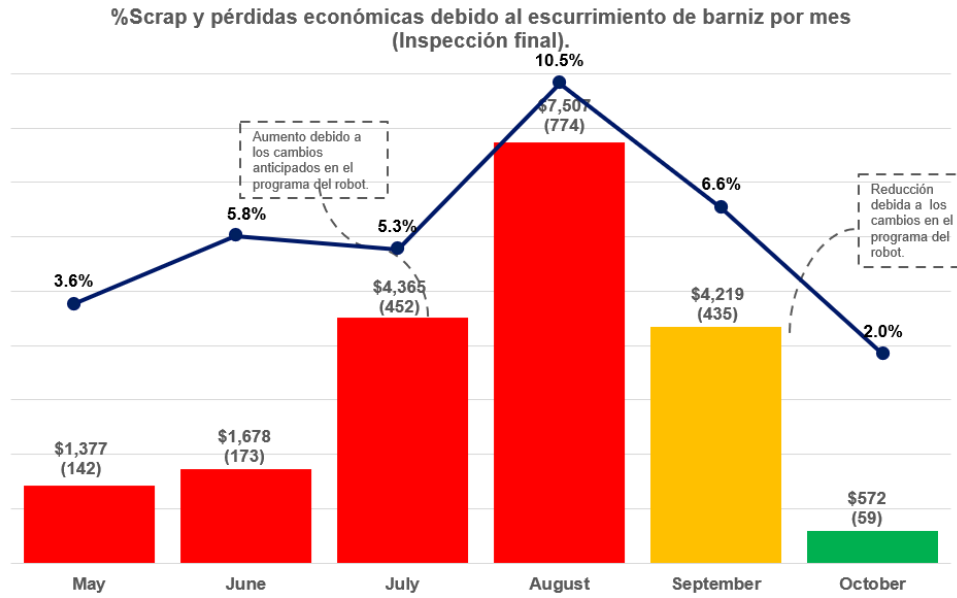


Figura 31. Gráfica mensual de la evolución del defecto escurrimiento de barniz.

Asimismo, los datos recopilados antes y después de la implementación de las mejoras se presentan en el gráfico de control tipo P (Figura 33). En este se observa un cambio significativo en el comportamiento del proceso, ya que el porcentaje de scrap se redujo del 7.3% al 2.9%. Además, todos los puntos se encuentran dentro de los límites de control, lo que indica que el proceso se ha estabilizado.

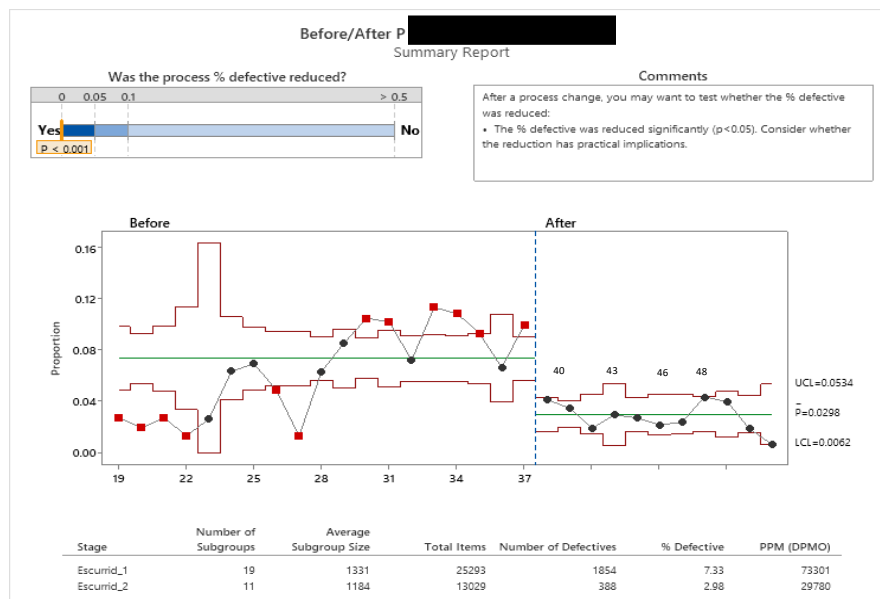


Figura 32. Gráfico de control tipo P, comparación del antes y después de la mejora.

Los resultados de la prueba estadística Z de comparación de dos proporciones, correspondiente a la cantidad de piezas defectuosas por el escurrimiento de barniz antes y después de una mejora en el proceso se muestran en la Figura 34. La primera proporción corresponde a las piezas defectuosas por el escurrimiento de barniz antes de la mejora, mientras que la segunda proporción representa las piezas defectuosas después de aplicar la mejora.

Planteándose la siguiente hipótesis nula (H_0): no existe diferencia entre ambas proporciones. Es decir, la proporción de defectos se mantiene igual antes y después de la intervención. La hipótesis alternativa (H_1) indica que sí existe una diferencia entre ambas proporciones. El resultado de la prueba arroja un valor p de 0.0, lo cual es significativamente menor al umbral común de 0.05. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa.

Con base a lo anterior, se comprueba que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las proporciones de piezas defectuosas antes y después de la mejora. Específicamente, la proporción de defectos antes de la mejora es significativamente mayor que después de la mejora, lo que indica que la mejora implementada tuvo un efecto positivo en la reducción del escurrimiento de barniz.

Test and CI for Two Proportions				
Method				
p ₁ : proportion where Sample 1 = Event				
p ₂ : proportion where Sample 2 = Event				
Difference: p ₁ - p ₂				
Descriptive Statistics				
Sample	N	Event	Sample p	
Sample 1	25293	1854	0.073301	
Sample 2	13029	388	0.029780	
Test				
Null hypothesis		H ₀ : p ₁ - p ₂ = 0		
Alternative hypothesis		H ₁ : p ₁ - p ₂ ≠ 0		
Method	Z-Value	P-Value		
Normal approximation	19.65	0.000		
Fisher's exact		0.000		

Figura 33. Prueba Z para dos proporciones (comparación entre piezas defectuosas por escurrimiento de barniz antes y después de la mejora).

3.5 Controlar

Una de las acciones preventivas implementadas en la línea de pintura fue la creación de un gráfico dinámico de monitoreo de los diversos defectos del proceso de pintura, pero particularmente para

el escurrimiento de barniz. Este gráfico se crea a partir de una base de datos (Figura 35), las posiciones se obtienen del Heat map del soporte para pintar las botoneras creado previamente (Figura 30).

Fecha ▼	Turno ▼	CW ▼	Mes ▼	Version ▼	Posición ▼	Defecto ▼	Cantidad ▼
22/08/2024	1	34	agosto	FR	A5	Escurreda	1
22/08/2024	1	34	agosto	FR	A6	Escurreda	1
22/08/2024	1	34	agosto	FR	A5	Escurreda	1
22/08/2024	1	34	agosto	FR	A6	Escurreda	1
22/08/2024	1	34	agosto	FR	A2	Escurreda	1
22/08/2024	2	34	agosto	FR	B6	Caída	1
22/08/2024	2	34	agosto	FR	B4	Caída	1

Figura 34. Base de datos para crear gráfico de monitoreo de defectos dinámico.

A partir de una tabla dinámica es posible la generación de un grafico de barras el cual permite visualizar de manera clara y ordenada la frecuencia del defecto según su posición (Figura 36). En este caso, se observa que las posiciones donde más se repite el defecto son B7, A6 y A7.

Se considera un gráfico dinámico porque, gracias a los controles interactivos vinculados a la tabla dinámica (como los segmentadores o filtros), es posible analizar los datos desde diferentes perspectivas. Por ejemplo, se puede pasar de una visión general a un análisis más específico, como filtrar por semanas determinadas, turnos de trabajo o versiones específicas de las piezas (Figura 37). Esta funcionalidad facilita la identificación rápida de patrones o anomalías, lo que permite tomar decisiones de manera más ágil y eficiente.

Esta herramienta fue implementada de forma permanente en el área de pintura. El responsable de su gestión es el ingeniero de calidad, quien debe utilizarla cada vez que se detecten anomalías en el proceso, e incluso de forma preventiva, para monitorear tendencias y anticiparse a posibles problemas. Su aplicación es flexible, ya que puede adaptarse para el análisis de distintos tipos de defectos, facilitando así la identificación de causas y la toma oportuna de decisiones correctivas.

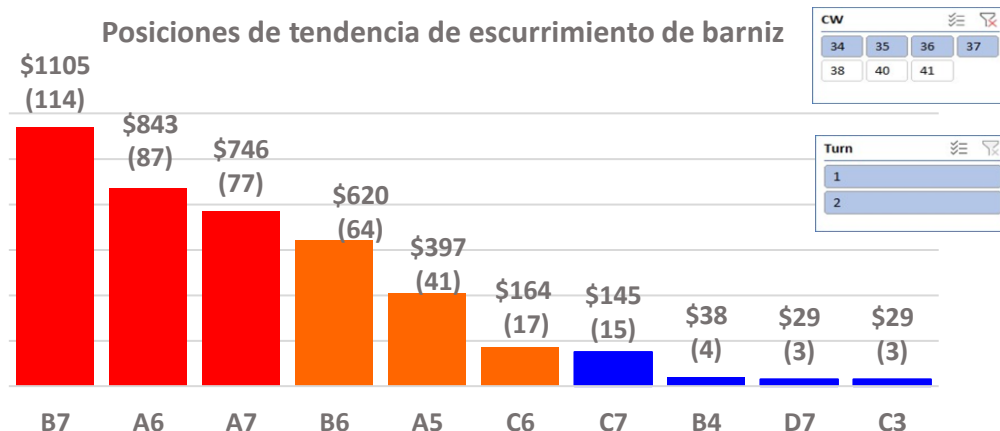


Figura 35. Gráfico de tendencia de posiciones con escurrimiento de barniz en el soporte de las botoneras.

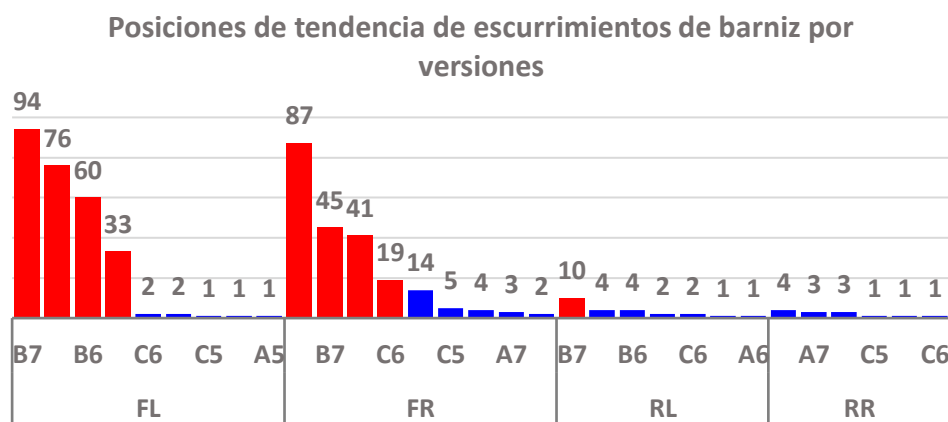


Figura 36. Gráfico de tendencia de posiciones en el soporte con escurrimiento de barniz por versiones de las botoneras.

A partir de una base de datos que contiene el registro de piezas defectuosas y piezas producidas (Figura 38), se elaboró el gráfico de control tipo P en Excel (Figura 39). Este gráfico fue implementado en la línea de pintura, y su gestión está a cargo del ingeniero de calidad. La herramienta permite monitorear el comportamiento del proceso a lo largo del tiempo, ayudando a determinar si se mantiene dentro de los límites de control o si se están presentando anomalías que requieren atención.

Es importante que esta base de datos se actualice semanalmente, de modo que el gráfico refleje de manera oportuna la situación actual del proceso y facilite la toma de decisiones en caso de

desviaciones. Además, esta herramienta es versátil, ya que puede aplicarse para el seguimiento de cualquier tipo de defecto que se desee analizar.

CW	Turno	Piezas defectuosas	Piezas producidas
49	1	68	913
50	1	52	1327
51	2	70	986
52	1	66	1244
1	1	51	1305
2	1	69	1011
3	1	59	997
4	3	60	1340
5	2	66	1189
6	2	54	1311
7	3	68	1123
8	3	63	1296
9	3	55	1275
10	1	67	1249
11	1	62	1338
12	1	53	1167
13	2	70	1078
14	2	58	935

Figura 37. Base de datos para gráfico de control de monitoreo de piezas defectuosas del proceso de pintura de las botoneras.

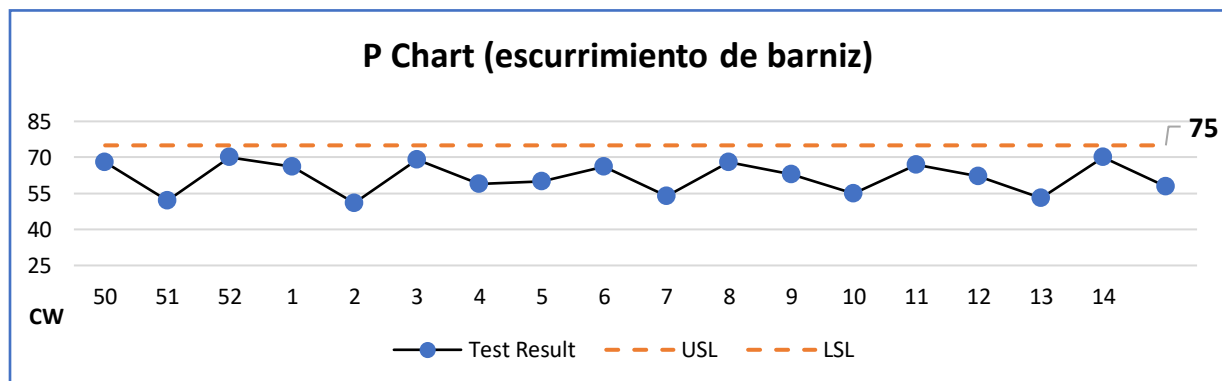


Figura 38. Gráfico de control P Chart, monitoreo de piezas defectuosas en el proceso.

Conclusiones

Tras la aplicación de cada una de las etapas del Ciclo DMAIC de la metodología Lean Six Sigma en la línea de pintura de las botoneras con el propósito de abordar el problema del escurrimiento de barniz, se obtuvieron a las siguientes conclusiones:

- A través de la implementación del gráfico dinámico de monitoreo de defectos y del Heat map, se logró mejorar el control de calidad en las botoneras, debido a que estas herramientas facilitaron una detección precisa de los defectos, lo que permitió una toma de decisiones rápida, eficaz y principalmente basada en datos.
- Como resultado de las acciones correctivas implementadas (como los ajustes en la velocidad y los puntos de aplicación del programa del robot), se logró una reducción significativa en el porcentaje del scrap generado por el escurrimiento de barniz en el producto (del 7% al 2.9%). Esta mejora impactó positivamente los costos operativos, ya que el ahorro anual fue de \$53,628 dólares para la empresa.
- Se comprobó mediante el gráfico de control P que tras la implementación de la mejora, la proporción de piezas defectuosas por escurrimiento de barniz se mantuvo dentro de los límites de control establecidos. Esto indica que el proceso opera actualmente con mayor estabilidad y previsibilidad. Además, al incorporar este gráfico como herramienta permanente en la etapa de inspección final, se refuerza la sostenibilidad de las mejoras alcanzadas.
- Al implementar herramientas preventivas en el área de pintura, junto con la participación activa del equipo, se logró establecer una cultura de mejora continua. Esto no solo mejoró los resultados, sino que fortaleció el compromiso del personal con la excelencia operativa.
- Finalmente, se concluye que la implementación de la metodología Lean Six Sigma permitió optimizar el proceso de pintura en las botoneras, ya que a través del análisis estructurado y el uso de herramientas estadísticas, se identificaron las causas raíz del escurrimiento de barniz y se aplicaron soluciones efectivas que contribuyeron a mejorar la eficiencia del proceso

Bibliografía

- [1] Fabbe-Costes, N., Lechaptois, L. (2022). Automotive supply chain digitalization: lessons and perspectives. En B. L. MacCarthy & D. Ivanov (Eds.), *The Digital Supply Chain* (pp. 289-304). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91614-1.00017-4>
- [2] Consejo Nacional de Logística (CONALOG). (2023, 28 de septiembre). *Industria automotriz mexicana en 2025: Cifras, competitividad y desafíos*. <https://conalog.org.mx/noticias/industria-automotriz-mexicana-en-2025-cifras-competitividad-y-desafios/>
- [3] Frost, P. (2022). *Pintura automotriz: acabados para tu industria*. Frost Automation. <https://frostaautomation.com/pintura-automotriz/>
- [4] Oladipupo, O., Adeyinka, A. M., Durodola, O. (2023). *Exploring lean six sigma: A comprehensive review of methodology and its role in business improvement*. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 4(6), 939–947. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2023.4.6.939-947>
- [5] De La Garza, I. (2024). *Sector automotriz: importancia y principales retos en sostenibilidad*. BBVA CIB. <https://www.bbvacib.com/es/insights/news/bbva-cib-sector-automotriz-importancia-y-principales-retos-en-sostenibilidad/>
- [6] Zozaya, J. (2022). *La importancia de escuchar a la industria*. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/la-importancia-de-escuchar-a-la-industria/>
- [7] Curiel Corona, N. (s.f.). *Principales procesos y operaciones unitarias realizadas en la industria automotriz*. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. https://www.stps.gob.mx/DGIFT_STPS/PDF/Principales%20procesos%20y%20operaciones%20en%20la%20Ind%20Automotriz.pdf
- [8] OTC Industrial. (s.f.). *Glossary of paint defect terms*. <https://otcindustrial.com/glossary-of-paint-defects-terms>

-
- [9] Eines Vision Systems. (2024). *Automotive paint defects in production processes vs. advanced defects detection*. Eines Vision Systems. <https://eines.com/automotive-paint-defects-in-production-processes-vs-advanced-defects-detection/>
- [10] Keyence Corporation. (s.f.). *Robot Painting, Coating & Dispensing Methods*. KEYENCE. <https://www.keyence.com/ss/products/measure/sealing/coater-type/robot.jsp>
- [11] Ingar Medina, C. A. (2016). *Mejoramiento de la calidad aplicando Six Sigma en el servicio de reparación de cilindros hidráulicos en una empresa metalmecánica* [Tesis de pregrado, Universidad de San Martín de Porres]. <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/2148>
- [12] Evans, J. R., & Lindsay, W. M. (2017). *Managing for Quality and Performance Excellence* (10th ed.). Cengage Learning.
- [13] Vargas-Hernández, J. G. (2018). Gestión de la calidad total en la industria automotriz: una revisión teórica. *Revista Internacional Administración & Finanzas*, 11(1), 55–72.
- [14] Kaizen Institute. (s.f.). Construye una cultura de mejora continua. <https://kaizen.com/es/insights-es/cultura-mejora-continua/>
- [15] International Lean Six Sigma Institute. (2022). *Manual Yellow Belt*.
- [16] Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2013). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma* (3.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- [17] 6Sigma.us. (s.f.). *Normal distribution in Lean Six Sigma: The bell curve*. <https://www.6sigma.us/six-sigma-in-focus/normal-distribution-lean-six-sigma-bell-curve/>
- [18] Purdue University. (2024, 15 de marzo). *Six Sigma Belt Level Rankings*. Purdue University – Lean Six Sigma Online. <https://www.purdue.edu/leansixsigmaonline/blog/lean-six-sigma-belt-levels/>
- [19] Fortunio Cortez, R. (2019). *Aplicación de metodología Six Sigma hasta fase de mejora para la reducción de variación de espesor en la producción de láminas de vinil en empresa de autopartes* [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio

Institucional BUAP. <https://ecosistema.buap.mx/ecoBUAP/handle/ecobuap/2809>

[20] Rodríguez Aparicio, I. (2016). *Lean Six Sigma, una metodología para la mejora de procesos* [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional BUAP. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/14472>

[21] Rojas Jauregui, A. P., & Gisbert Soler, V. (2017). *Lean manufacturing: herramienta para mejorar la productividad en las empresas*. 3C Empresa – Edición Especial Diciembre 2017, 116–124. <https://3ciencias.com/articulos/articulo/lean-manufacturing-herramienta-mejorar-la-productividad-las-empresas/>

[22] Guerra Silva, M. A. (2019). *Mejora de procesos mediante metodología Lean Six Sigma (Yellow Belt) aplicada a una línea de manufactura de amortiguadores electromagnéticos* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de Tesis DGBSDI. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000789343>

[23] García Vázquez, D. (2019). *Aplicación de la metodología DMAIC en los procesos de pintado de carrocerías con mejora continua* [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional BUAP. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/22701>

[24] Rendón Castaño, H. D. (2013). *Control estadístico de calidad*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. https://minas.medellin.unal.edu.co/images/Centro-Editorial/Control_estadistico_de_calidad.pdf

[25] AnyChart. (s.f.). *Mapa de calor (heatmap)*. AnyChart Chartopedia. <https://www.anychart.com/es/chartopedia/chart-type/heatmap/>

[26] Minitab Inc. (s.f.). *Interpretar los resultados clave para 2 proporciones*. Soporte de Minitab. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/2-proportions/interpret-the-results/key-results/>