

Mejora de la calidad de ensamble de carrocería a través del cálculo inverso y control de variables para la aplicación de adhesivos

Julio Emmanuel Ramírez Flores¹, Mayra Del Ángel Monroy² y Raúl Bustamante³

¹ Posgrado CIATEQ A.C. Sede Aguascalientes, Dirección de Posgrado e Investigación, Circuito Aguascalientes Norte No. 135, Parque industrial de Valle de Aguascalientes, C.P. 20358 Aguascalientes, Ags., México, emmanuel.rflores90@gmail.com

² CIATEQ A.C., Eje 126 No. 225, Zona industrial, C.P. 78395 San Luis Potosí, SLP., México, mayra.delangel@ciateq.mx

³ CONAHCYT-COMIMSA, Eje 126 No. 225, Zona industrial, C.P. 78395 San Luis Potosí, SLP., México, raul.perez@ciateq.mx

Resumen

El artículo aborda la búsqueda constante de excelencia en la industria automotriz, destacando la optimización de calidad y costos como objetivos fundamentales para un equilibrio sostenible. Se enfoca en la optimización integral a través del cálculo inverso en juntas adhesivas y un riguroso control del proceso. La implementación de la metodología Six Sigma se destaca por mejorar la eficiencia de la cadena de producción y redefinir la correlación entre calidad y costos. Esto se logra mediante la adquisición de datos, análisis y determinación de factores clave para reducir la variación estándar, mejorando la calidad del producto final y reduciendo el costo de reparación. Se hace uso del método de cálculo inverso para determinar eficientemente el volumen de material necesario, generando ahorros significativos por pieza producida. Los resultados obtenidos en este caso de estudio muestran que estas metodologías permitieron un ahorro de 8.74 millones de pesos mexicanos por reducción de defectos y 3.19 millones de pesos mexicanos por optimización del material aplicado en juntas adhesivas, lo que demuestra el potencial de incrementar la rentabilidad en la industria automotriz.

Palabras clave— Adhesivo, optimización, suministro, epóxico.

Abstract

The article addresses the constant pursuit of excellence in the automotive industry, highlighting quality and cost optimization as fundamental objectives for sustainable balance. It focuses on comprehensive optimization through reverse calculation in adhesive joints and rigorous process control. The implementation of the Six Sigma methodology stands out for improving the efficiency of the production chain and redefining the correlation between quality and costs. This is achieved through data acquisition, analysis, and determination of key factors to reduce standard variation, enhance the quality of the final product, and reduce repair costs. The reverse calculation method is employed to efficiently determine the volume of material needed, resulting in significant savings per produced piece. The results shown in this case of study demonstrate that these methodologies led to savings of 8.74 million Mexican pesos due to defect reduction and 3.19 million Mexican pesos through optimization of material applied in adhesive joints, showcasing the potential to increase profitability in the automotive industry.

Keywords— Adhesive, optimization, supply, epoxy.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la industria automotriz se encuentra en una intensa competencia, donde se prioriza la optimización de los sistemas de producción, la eficiencia operativa y la reducción de costos de fabricación. Alcanzar una sostenibilidad económica en la fabricación de automóviles es un desafío constante [1]. Para lograrlo, es necesario crear un conjunto de indicadores clave de rendimiento (KPI, por sus siglas en inglés), que ayudan a evaluar la eficacia del proceso de producción [2]. Dos KPI de gran importancia son la calidad y el costo de producción, ya que estos indican la cantidad de retrabajo necesario para alcanzar la calidad deseada. Las empresas líderes están inmersas en un ciclo interminable de mejora continua, implementando nuevos métodos de trabajo estandarizados para mejorar la calidad del producto final y reducir los costos requeridos [3]. Un ejemplo de ello es la reducción del peso del vehículo, mejora en su funcionamiento u optimización del proceso de ensamble, lo que se ve reflejado en el indicador de costo. Al reducir el peso del vehículo se logra reducir las emisiones de CO₂ e incrementar la eficiencia energética, además se reduce el costo de fabricación de cada vehículo [4].

En relación con el proceso de ensamble de carrocería, existen varios métodos para reducir el peso vehicular siendo uno de ellos la creación de uniones de láminas de acero mediante la aplicación de adhesivo epóxico o juntas adhesivas [5]. El proceso de aplicación de adhesivos epóxicos está directamente relacionado con el indicador de desempeño de Defectos Por Unidad (DPU) de la planta en conjunto con el indicador de Costo Por Unidad (CPU). Estos indicadores señalan que pueden presentarse niveles de desperdicio de hasta un 15% de material adicional por unidad. Como respuesta ante esta problemática y con el objetivo de incrementar el porcentaje de mejora en la calidad y la capacidad del proceso, se hace uso de la metodología Six Sigma y del cálculo inverso en el material por junta epóxica para reducir su costo.

El primer enfoque se centra en analizar el proceso productivo, calcular la Capacidad Potencial (Cp) y Variabilidad (Cpk) que permitan determinar actividades para optimizar o mejorar los indicadores [6]; el segundo enfoque consta de determinar el patrón de aplicación para reducir el desperdicio de aplicación excedente de adhesivo y, por ende, reducir la cantidad de defectos que se generan [7].

A. DPU

Actualmente, en la planta de carrocería de una empresa automotriz, el proceso de aplicación de adhesivos epóxico puede generar un DPU promedio anual de 28.45 puntos. Este valor es medido en el área de inspección de calidad al sumar el total de defectos existentes en un mes de producción y dividirlo entre el total de unidades producidas durante dicho mes y representa el 37.9% del total, en comparación con el valor objetivo establecido en 75.00 puntos (el cual abarca todos los tipos de defectos existentes en planta carrocería, como lo son, abolladas, adhesivo epóxico, rayas, etcétera) con objeto de mejorar la percepción de fabricación de los vehículos en planta carrocería y en planta pintura, como se muestra en la Fig. 1.

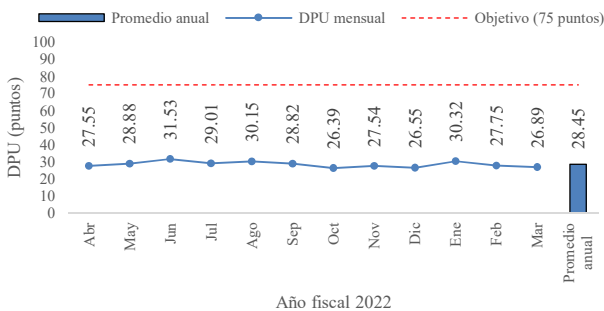


Fig. 1 - Resultados de DPU adhesivos epóxicos del año fiscal 2022.

Como parte de la propuesta para reducir la cantidad de defectos en un sistema productivo se implementa la metodología de *six sigma*, una metodología cuyo objetivo es analizar exhaustivamente un sistema de producción y aplicar contramedidas en el proceso para evitar los errores y reducir la desviación estándar [8].

B. CPU

Con respecto al indicador de costo, el resultado del año fiscal 2022, se obtuvo un costo promedio anual de 60.66 MXN, es decir, un incremento de 7.98 MXN por unidad tomando como referencia el costo estándar de 52.68 MXN. Este valor es calculado mediante el análisis del diseño vehicular y determinando la cantidad de adhesivo epóxico requerido para la fabricación de una unidad. Como se puede observar en la Fig. 2, existe un incremento del CPU en un 15.15% contra el valor estándar.

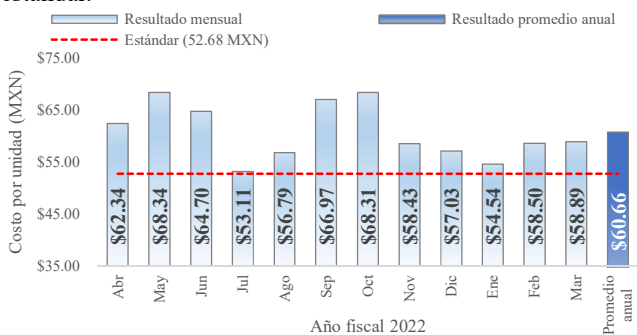


Fig. 2 - Costo de manufactura de vehículos por selladores adhesivos año fiscal 2022.

La propuesta para solucionar esta desviación de costo es la implementación del cálculo inverso de material epóxico para juntas adhesivas desarrollada por Florian Flaig, la cual tiene por objetivo determinar el cálculo de material adhesivo necesario para unir dos piezas y evitar desperdicio [7].

II. METODOLOGÍA

En el proceso de aplicación de adhesivos epóxicos en planta carrocería se puede generar un defecto al impregnarse el material en las partes exteriores o de vista de los vehículos, que al ser curado a una temperatura de 180°C, se solidifica y daña las partes metálicas, siendo requerida una reparación inmediata. Por lo anterior, es de alta relevancia que el cordón de adhesivo mantenga una magnitud del diámetro uniforme para evitar que el material sobre fluya de la parte metálica y genere el defecto que se muestra en la Fig. 3.



Fig. 3 - Adhesivo excedente en planta carrocería y adhesivo impregnado en panel de vista en planta pintura.

La aplicación de adhesivos epóxicos es realizada en una celda de manufactura en un proceso automático colocando un panel en un escantillón que lo mantiene fijo, el adhesivo es suministrado por una bomba de succión y es aplicado a través de una boquilla que se encuentra ensamblada en un robot. El robot a su vez, es programado para seguir una ruta, se determinan los parámetros de velocidad y ángulo de aplicación para que el diámetro del cordón sea aplicado de manera uniforme.

A. DPU

El método *six sigma* para el análisis de problemáticas de control de calidad se conforma por 5 etapas principales como se muestra en la Fig. 4. Mediante el uso de herramientas estadísticas (como lo son el histograma y diagrama de Pareto) y de control de calidad (SIPOC, diagrama de Ishikawa y control estadístico del proceso) se busca lograr la mejora del proceso [8].

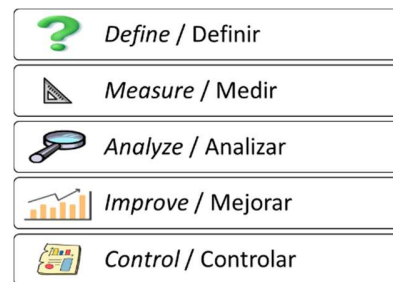


Fig. 4 - Etapas de metodología *six sigma*, elaboración propia.

Etapa 1: Definir.

Se debe comenzar con la definición de la variable o variables de salida que se estarán monitoreando para su mejora a lo largo del proyecto; siendo el diámetro de cordón la variable de salida para el proceso de aplicación del adhesivo epóxico. En esta etapa es esencial el uso de la herramienta SIPOC (*Suppliers, Inputs, Process, Output, Clients*) para identificar las variables de entrada, cómo se procesan y si afectan o no a la variable de salida.

Se determinó la variable de salida (O) como el diámetro de cordón y se analizó mediante el uso de la herramienta SIPOC para identificar sus proveedores (S), variables de entrada (I), proceso (P) y clientes (C), como se puede ver en la Tabla I. Se enlistaron los proveedores de las partes vehiculares, sistema de suministro y el material adhesivo epóxico dentro del proceso de aplicación. En la sección de variables de entrada se encuentra la viscosidad del material epóxico, los paneles estampados, subensamble de panel interior y el caudal del sistema de suministro. Para la etapa de “proceso” se considera las celdas de aplicación de adhesivo epóxico. Como variable de salida única se considera al diámetro de cordón y como cliente afectado al proceso posterior a carrocerías, planta pintura [9].

Tabla I
SIPOC DE PROCESO DE APLICACIÓN DE ADHESIVOS EPÓXICOS.

S	I	P	O	C
Dupont (adhesivo)	Viscosidad			
Estampado	Panel Outer	Aplicación de adhesivo epóxico	Diámetro de cordón de adhesivo epóxico	Planta pintura
Línea de subensamble	Subensamble interior			
Dosificador de adhesivo	Caudal			

Etapa 2: Medir.

Los datos obtenidos para conocer el panel de estudio con mayor incidencia de defecto fueron representados en un diagrama de Pareto, con un intervalo de abril 2022 a marzo 2023. Se analizó el diagrama de Pareto con el *software* Minitab para identificar la parte de estudio que tiene mayor incidencia de defectivo, requiriendo la implementación de contramedidas para evitar generar más defectos en el proceso productivo.

Como se puede observar en la Fig. 5, los datos recabados en el intervalo seleccionado muestra que el panel con mayor incidencia de defectivo fue la puerta trasera derecha con el 21.7% de la incidencia total de planta carrocería.

La adquisición de datos para medir el diámetro de cordón se realizó utilizando calibradores digitales para mediciones de alta precisión, contando con características importantes como su rango de medición de 0 a 150mm, resolución de 0.01mm y un error máximo de ±0.02mm, así como con certificado de calibración vigente para evitar variación a las medidas tomadas. La toma de datos para la medida del diámetro de cordón se generó en el panel con mayor incidencia de defectos de acuerdo con la gráfica de Pareto, los datos fueron analizados con el uso

de las siguientes herramientas estadísticas: histograma, diagrama de caja y la distribución de la media y mediana, considerando intervalos de confianza del 95%, esto permitió conocer la situación actual del proceso de aplicación de adhesivos en la planta de carrocería.

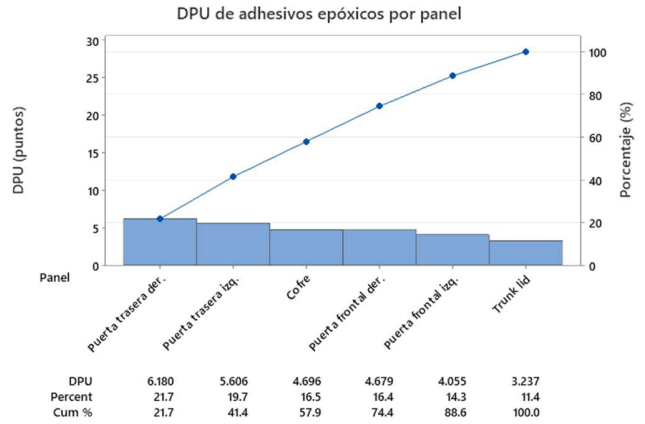


Fig. 5 - DPU de adhesivos epóxicos distribuido por panel. Elaboración propia.

Una vez definido el panel de aplicación con mayor incidencia de defectos, se realizaron las mediciones del diámetro de cordón, concluyendo que el proceso de aplicación cuenta con un diámetro promedio de 4.6 milímetros (mm), una desviación estándar de 0.453 mm en la muestra de 63 datos. Mediante el uso del diagrama de caja se determinó que el primer cuartil de la distribución de datos se encuentra en 4.28 mm, la mediana en 4.56 mm y el tercer cuartil en 4.99 mm, siendo este el intervalo en el que más se encuentran los datos distribuidos. El diagrama de intervalo de confianza muestra la ubicación de la media y mediana en la muestra de datos tomada, ver Fig. 6.

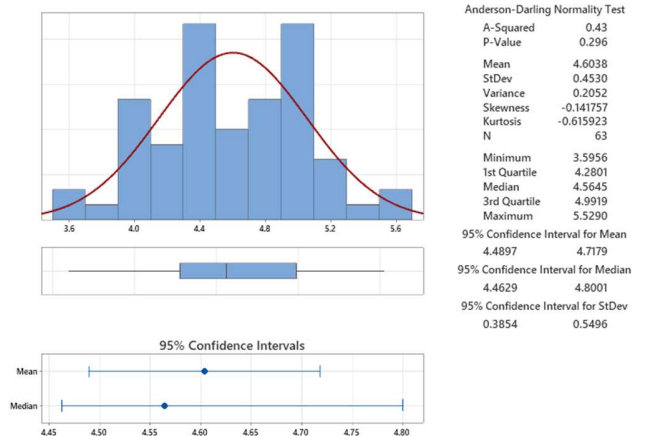


Fig. 6 - Histograma, diagrama de caja e índice de confiabilidad de las mediciones de diámetro de cordón. Elaboración propia.

Dos factores que pueden modificar la viscosidad del adhesivo epóxico y a su vez el diámetro de cordón en el proceso de aplicación, son la temperatura y la humedad. Conocer el comportamiento de estas dos variables y su correlación con el diámetro de cordón es importante para establecer las actividades para su control. Se utilizaron 4 termómetros para conocer la temperatura en 4 ubicaciones clave de forma

simultánea (zona exterior de planta, interior de almacén de procesivos, almacén interno de planta carrocería y cabina de suministro de adhesivo) y un higrómetro gravimétrico para medir la humedad relativa del área en donde se aplica el adhesivo.

Las mediciones de temperatura y diámetro de cordón fueron realizadas cada 2 horas por 30 días consecutivos durante los meses de mayo a agosto del año 2022 para determinar la correlación con la variable de salida. En Fig. 7 se muestran las medidas obtenidas para temperatura (°C) en los 4 puntos de medición (exterior, almacén de procesivos, planta carrocería y cabina de suministro), se puede observar que en cada horario medido la diferencia de temperatura (°C) entre la zona con el valor más alto y la más baja tiene un valor de 5°C. Adicionalmente, se muestran los límites de control de temperatura establecidos por el proveedor fabricante del material adhesivo en el cual el material mantiene una viscosidad constante [10] y, por ende, al trabajar dentro del intervalo establecido facilita el control de aplicación. Se puede observar que existen valores mayores al límite superior de especificación (LSE = 30°C) y menores al límite inferior de especificación (LIE= 25°C).

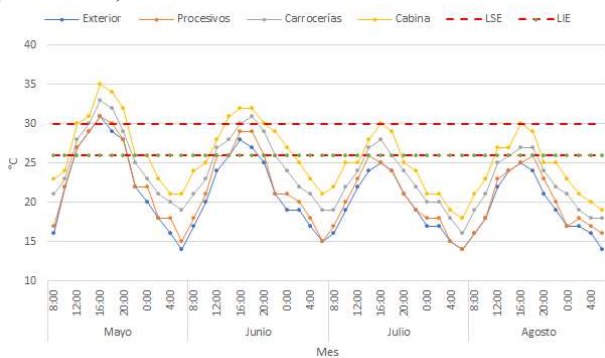


Fig. 7 - Medidas de temperatura (intervalo mayo a agosto 2022).

En la Fig. 8 se muestran los datos recabados de la medición del diámetro de cordón en el mismo intervalo de tiempo en el que la temperatura fue medida. Se pueden observar en líneas punteadas los límites de control especificados (LSE=5 mm, LIE=3 mm) mediante el diseño vehicular inicial y en el gráfico lineal azul se puede observar el comportamiento del diámetro de cordón en los diferentes horarios de los meses seleccionados, pudiendo observar datos fuera de especificación.



Fig. 8 - Medidas de diámetro de cordón (intervalo mayo a agosto 2022).

En la Fig. 9 se muestran los datos de humedad presentados en la gráfica lineal naranja y su limite de control (LSE =

45%HR) representado con líneas punteadas, se puede observar que la humedad relativa existente en la cabina de suministro durante el mes de mayo contó con valores promedio del 5%, elevándose a 17% como valor promedio en el mes de junio, la tendencia de incremento en el porcentaje de humedad relativa se mantiene constante hasta alcanzar valor promedio de 38% en el mes de julio y en el mes de agosto alcanzando valores mayores al 45% que sugiere el proveedor fabricante del material [10].



Fig. 9 - Medidas de humedad (intervalo mayo a agosto 2022).

Tomando como base el indicador de CPU, se realizó una medición del volumen de aplicación de cada uno de los paneles de estudio y se realizó la comparación contra el cálculo original establecido al inicio de producción del modelo vehicular para conocer las desviaciones de cada uno, los resultados se pueden observar en la Tabla II, en ella se denota que las puertas traseras cuentan con mayor índice de desperdicio con un valor máximo de 21.77% y que en promedio se puede tener un sobre uso de material del 12.04%.

Tabla II
COMPARATIVA DE VOLUMEN (GALONES) CÁLCULO ORIGINAL Y USO REAL DE MATERIAL ADHESIVO EPÓXICO.

Parte	Cálculo original (CO)	Consumo actual (CA)	Diferencia porcentual
Puerta frontal RH	0.0039	0.0046	18.45%
Puerta trasera RH	0.0034	0.0042	21.77%
Puerta frontal LH	0.0039	0.0043	11.07%
Puerta trasera LH	0.0034	0.0041	20.34%
Cofre	0.0063	0.0070	10.61%
Cajuela	0.0047	0.0042	-10.01%
Total	0.0257	0.0285	12.04%

Etapas 3: Analizar.

Para realizar el análisis de la Capacidad de Proceso (Cp) y Variabilidad (Cpk) se usó la herramienta de “análisis de capacidad” dentro del menú de “herramientas de calidad” del software Minitab. La entrada de datos para esta etapa se generó con los datos de diámetro de cordón tomados en la etapa anterior y se buscó conocer el nivel sigma del proceso.

Al adquirir los datos en la etapa de medición, se procedió a obtener la variabilidad de proceso (Cpk) tomando en cuenta el LSE (5 mm) y LIE (3 mm). Se determinó que el proceso actual cuenta con un valor de Cpk de 0.27, además de que los productos generados en el dispensado de adhesivos se encuentran ubicados hacia el LSE o USL (Upper Specification

Limit), obteniendo, por ende, datos fuera de los límites de control y teniendo un nivel sigma de 0.81, ver Fig. 10.

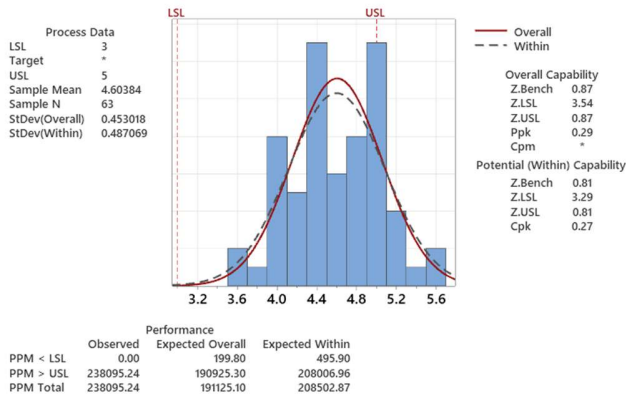


Fig. 10 - Análisis de capacidad de proceso de aplicación de cordón de adhesivo epóxico en puerta trasera derecha.

Las medidas obtenidas durante la etapa de medición para los factores de temperatura y humedad se analizaron utilizando regresión lineal, determinando el efecto en la variable de salida.

Para determinar la correlación de la temperatura y la humedad con la variable de salida se utilizó la regresión lineal en el software Minitab. Como se puede observar en la Fig. 11 el efecto con mayor correlación es la temperatura de la cabina de suministro, los demás factores no son relevantes para la variable de salida, por lo que se puede descartar el control de temperatura en las zonas ajenas a la cabina de suministro, así como se descarta la humedad como factor relevante.

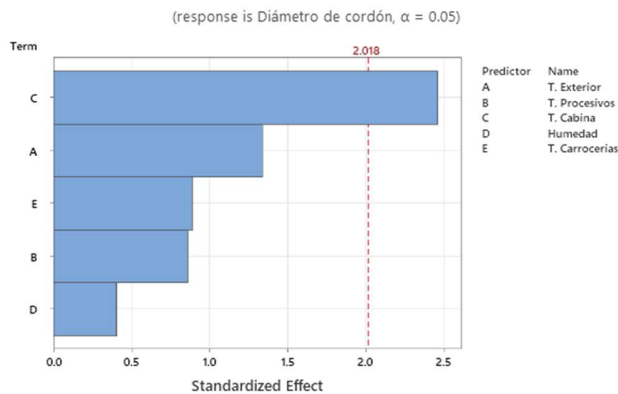


Fig. 11 - Correlación de temperatura y humedad con diámetro de cordón.

Analizar la programación del robot para la ruta de aplicación de adhesivos es de suma importancia, ya que, una programación errónea de los movimientos de los ejes del robot puede resultar en giros inesperados en la boquilla de aplicación, generando defectos de diferencias de diámetro de cordón. Se realizó un diseño de experimentos de factorial completo, con un total de 64 corridas, 2 repeticiones, corridas aleatorias, tomando 5 factores y 1 variable de salida, como se puede observar en la Tabla III, se muestran los diferentes niveles para los factores considerados. Se utilizó un factor de confianza del 95% para poder mejorar el proceso de aplicación de adhesivo y mejorar la repetibilidad de aplicación.

TABLA III
FACTORES DE ENTRADA Y SUS VALORES PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

Factores	Niveles	
Velocidad de paso de robot (mm/s)	500	1500
	1000	2000
Parámetro de precisión de interpolación entre puntos	CNT40	CNT80
	CNT50	CNT100
	CNT60	
Ángulo de aplicación (referencia: panel de acero)	85 °	95 °
	90 °	
Altura de aplicación (referencia: panel de acero)	2 mm	3 mm
Cantidad de puntos programados en zona curva	3	5

Al realizar el diseño de experimentos y las corridas requeridas para el programa de aplicación en zonas rectas, se ingresaron los datos al software Minitab para generar una optimización de solución, en la que se establece como respuesta deseada el diámetro de cordón estándar de 4 mm. De acuerdo con los valores de correlación de las variables utilizadas se obtiene el resultado de optimización mostrado en la Tabla IV.

TABLA IV
TABLA DE PARÁMETROS OPTIMIZADOS PARA PROGRAMA DE APLICACIÓN DE ADHESIVOS EPÓXICOS EN ZONAS RECTAS.

Velocidad (mm/s)	CNT	Ángulo (°)	Altura (mm)	Diámetro optimizado (mm)
1500	60	90	3	3.6

Se generó el mismo diseño de experimentos, pero para zonas curvas, considerando un factor adicional, la cantidad de pasos en curva. Al terminar de ingresar los datos de medidas de diámetro de cordón, se determinan los siguientes valores de los parámetros para la programación de aplicación de adhesivo epóxico en zonas curvas, ver Tabla V.

TABLA V
TABLA DE PARÁMETROS OPTIMIZADOS PARA PROGRAMA DE APLICACIÓN DE ADHESIVOS EPÓXICOS EN ZONAS CURVAS.

Velocidad (mm/s)	CNT	Ángulo (°)	Cantidad de pasos en curva	Diámetro(mm)
2000	40	90	3	4.2

Etapa 4: Mejorar.

Se realizó una lluvia de ideas acerca de actividades para mejorar el proceso de aplicación de adhesivos. Las ideas fueron evaluadas en dos factores y dos niveles para catalogarlas correctamente. Mediante el uso de una matriz de priorización se determinó cuáles actividades se realizarían y el orden de ejecución para obtener una mejora sustancial en el proceso.

Durante la etapa de análisis, se determinó el área de oportunidad existente en el programade robot para la aplicación de adhesivo y se obtuvieron los parámetros para aplicación en zonas rectas y curvas. Al realizar la reprogramación de los pasos de aplicación de adhesivo epóxico del robot, se obtienen los resultados mostrados en la Fig. 12. Analizando la gráfica de

capacidad de proceso, se puede notar que el Cpk aumenta a 0.41 y la desviación estándar reduce a 0.34, claramente observando una mejora en el proceso, incrementando el nivel sigma a 1.24, sin embargo, los datos aún se encuentran con tendencia hacia el LSE.

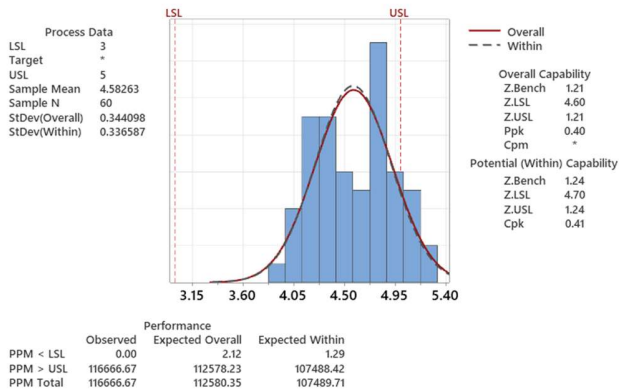


Fig. 12 - Capacidad de proceso de aplicación de adhesivo al reprogramar con parámetros optimizados.

Etapa 5: Controlar.

La etapa de control es la de mayor importancia para una aplicación de metodología de *six sigma*, esto debido a que al implementar contramedidas para mejorar un proceso es clave que estas se encuentren documentadas en controles administrativos o cuenten con controles automáticos dentro del proceso que eviten una variación en algún factor.

Para controlar la variación de diámetro de cordón dentro del proceso generada por el cambio de temperatura en la cabina de suministro de material epóxico se planteó el control de temperatura en las mangueras de transporte de material epóxico, en el dispensador y en la boquilla de aplicación evitando que el material sea aplicado fuera del intervalo recomendado de 26°C a 30°C [10]. Se seleccionó un equipo de dispensado de adhesivo que cuenta con un circuito cerrado de agua desde el regulador hasta la boquilla de aplicación, para regular la temperatura del material epóxico mediante el calentamiento o enfriamiento del agua, reduciendo la variación por cambios en la temperatura ambiente. Además, el equipo cuenta con un dosificador controlado mediante servomotor, facilitando el control de flujo de material adhesivo epóxico, ver Fig. 13.

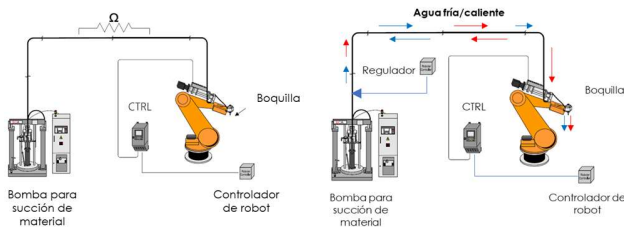


Fig. 13- Componentes de equipo de dispensado actual (izquierda) y equipo de dispensado mejorado (derecha). Elaboración propia.

B. CPU

El cálculo de las secciones de aplicación de adhesivo parcial se generó utilizando el PFGM (*Partially Filled Gap Model*), el cual está diseñado para simular el llenado de las holguras de una junta adhesiva. Un método de estimación es el de simulación

inversa, en el cual, teniendo como base una sección transversal de la junta adhesiva especificada por el diseño vehicular, se determina el área a cubrir con el adhesivo midiendo la longitud de contacto (l) y la altura entre los dos sustratos (h_i), después se calcula la altura de aplicación inicial sobre el sustrato de aplicación o inferior (h_i), para que en el momento en que se compacte con el sustrato de unión o superior, abarque la totalidad del área deseada, tal como se esquematiza en la Fig. 14 [7].

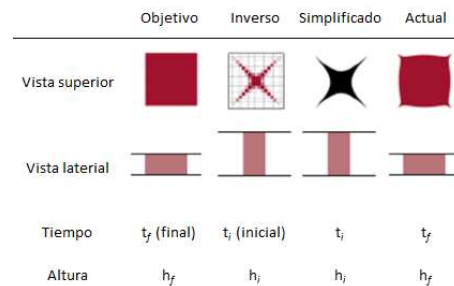


Fig. 14 - Método de simulación inversa [7].

Adicionalmente, se hace el diseño de una posible solución para una aplicación de adhesivo en forma de cordón lineal y se establece una fórmula simple de cálculo de volumen para una aplicación rectangular y así buscar una disminución de material utilizado. Para esta sección de inicio y fin de cordón se utilizan las Ecuaciones (1) y (2) en su forma simplificada, se determina la variable (a) que es la longitud de contacto del adhesivo con los dos sustratos, (b) siendo la longitud de cambio de diámetro de cordón y (c) el diámetro de cordón para la sección de inicio y fin. ver Fig. 15 [7].

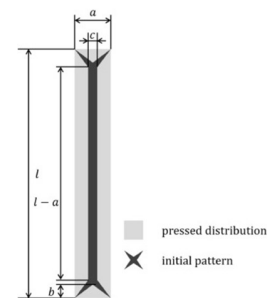


Fig. 15 -Secciones de una aplicación de adhesivo rectangular [7].

$$b = \frac{a}{2} \cdot \frac{h_i - h_f}{h_i} \tag{1}$$

$$c = a \cdot \frac{h_f}{h_i} \tag{2}$$

Utilizando el método previamente descrito, es necesario analizar el diseño de las juntas adhesivas en cada panel de estudio que son generadas al realizar la unión de 2 paneles mediante el doblado de la lámina exterior y sin generar una unión visual como la soldadura por resistencia [9]. Se particionó cada panel de estudio en 4 secciones transversales de engargolado como se puede observar en la Fig. 16.

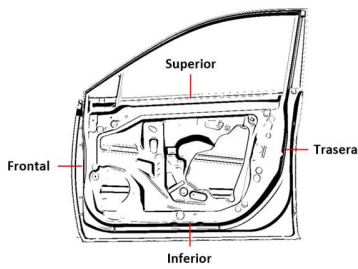


Fig. 16 - Ejemplo de partición de secciones en puerta frontal derecha, elaboración propia.

Al contar con las secciones transversales de cada panel de estudio, se requirió definir con base al diseño vehicular, qué tipo de junta adhesiva existe en cada sección (A o B), como se puede observar en la Fig. 17, el tipo A se refiere a que el material adhesivo abarca desde la unión de paneles hasta el fin de pestaña del panel exterior, el tipo B abarca desde la unión de paneles hasta el fin de pestaña del panel interior, teniendo esta la característica de contar con menor cantidad de adhesivo requerido.

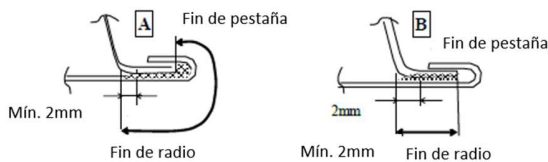


Fig. 17 - Tipos de junta adhesiva "A" y "B" en paneles engargolados, elaboración propia.

Para el análisis de una sección transversal de engargolado de cualquier panel de estudio se definieron 3 áreas principales: área excedente interior (1), área de engargolado (2) y área excedente exterior (3), dependiendo esta última del tipo de junta adhesiva existente, ver Fig. 18.

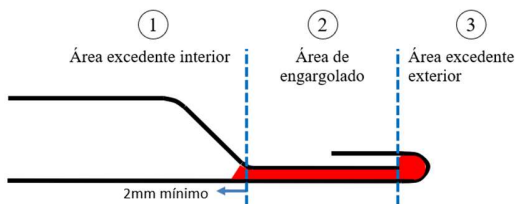


Fig. 18 - Áreas principales de una sección transversal de engargolado. Elaboración propia.

Una vez definidas las áreas a analizar de cada panel, se utiliza el software NX de SIEMENS para generar las secciones transversales y medir, de acuerdo con el diseño vehicular, la longitud y altura de cada una de las 3 zonas principales de un engargolado, obteniendo el área y multiplicando por la longitud de cada sección, determinando así el volumen, ver Fig. 19.

En la Tabla VI se puede observar el volumen requerido en cada una de las zonas de la junta adhesiva y en sus respectivas secciones de cada panel, en la última columna se muestra el volumen total requerido para cada sección y el total para cada panel.

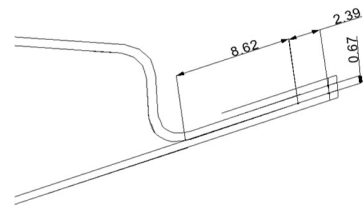


Fig. 19 - Medidas de sección transversal trasera de puerta trasera derecha e izquierda.

TABLA VI
TABLA PARA CALCULAR EL VOLUMEN DE ADHESIVO EPÓXICO POR PANEL.

Parte	Sec.	Tipo de junta	Zona	Zona	Zona	Total	Total
			1	2	3	por sec.	
			Vol. (cm ³)	Vol. (cm ³)	Vol. (cm ³)	Vol. (cm ³)	Vol. (cm ³)
Puerta frontal derecha	1	A	1.620	0.376	2.645	4.641	14.006
	2	A	1.988	0.194	1.121	3.303	
	3	B	1.308	0.302	0.985	1.610	
	4	A	2.640	0.450	1.362	4.452	
Puerta trasera derecha	1	B	1.625	0.098	1.817	1.723	9.635
	2	A	1.250	0.110	0.645	2.005	
	3	A	1.388	0.239	0.796	2.423	
	4	B	2.600	0.885	1.760	3.485	
Puerta frontal izquierda	1	A	1.620	0.376	2.645	4.641	14.006
	2	A	1.988	0.194	1.121	3.303	
	3	B	1.308	0.302	0.985	1.610	
	4	A	2.640	0.450	1.362	4.452	
Puerta trasera izquierda	1	B	1.625	0.098	1.817	1.723	9.635
	2	A	1.250	0.110	0.645	2.005	
	3	A	1.388	0.239	0.796	2.423	
	4	B	2.600	0.885	1.760	3.485	
Cofre	1	B	3.125	0.574	1.538	3.699	16.648
	2	B	2.500	0.420	1.266	2.920	
	3	A	4.125	0.955	2.030	7.110	
	4	B	2.500	0.420	1.266	2.920	
Cajuela	1	B	5.250	0.736	2.533	5.986	10.755
	2	B	0.750	0.096	0.385	0.846	
	3	B	3.375	0.547	1.644	3.922	

Una vez calculado el volumen que debe existir en cada una de las secciones de engargolado, se utilizaron las fórmulas propuestas por Florian Flaig (Fig. 15) para la determinar de inicio y fin de cordón lineal. En la Tabla VII, se muestra la altura final que deberá cumplir cada junta adhesiva (hf), la altura inicial se calcula realizando un despeje para obtener el radio (r) de la fórmula de cálculo de volumen de un cilindro y a partir de este obtener el diámetro en milímetros.

TABLA VII
CÁLCULO DE PARÁMETROS DE DIÁMETRO DE CORDÓN.
Cálculo de diámetro de cordón Cálculo de inicio y fin de cordón

Parte	Sec.	Cálculo de diámetro de cordón			Cálculo de inicio y fin de cordón			Vol. (cm³)
		h _f (cm)	r (cm)	d o h _i (mm)	a (cm)	b (cm)	c (cm)	
Puerta frontal der.	1	0.01	0.15	3.02	1.48	0.71	0.12	0.13
	2	0.01	0.11	2.30	0.72	0.35	0.08	0.08
	3	0.01	0.10	1.98	1.16	0.55	0.15	0.19
	4	0.01	0.12	2.32	1.07	0.51	0.12	0.06
Puerta trasera der.	1	0.01	0.09	1.84	0.30	0.14	0.04	0.00
	2	0.01	0.11	2.26	0.66	0.31	0.07	0.03
	3	0.01	0.12	2.36	1.10	0.53	0.12	0.07
	4	0.01	0.10	2.07	1.70	0.81	0.21	0.28
Puerta frontal izq.	1	0.01	0.15	3.02	1.48	0.71	0.12	0.13
	2	0.01	0.11	2.30	0.72	0.35	0.08	0.08
	3	0.01	0.10	1.98	1.16	0.55	0.15	0.19
	4	0.01	0.12	2.32	1.07	0.51	0.12	0.06
Puerta trasera izq.	1	0.01	0.09	1.84	0.30	0.14	0.04	0.00
	2	0.01	0.11	2.26	0.66	0.31	0.07	0.03
	3	0.01	0.12	2.36	1.10	0.53	0.12	0.07
	4	0.01	0.10	2.07	1.70	0.81	0.21	0.28
Cofre	1	0.01	0.10	1.94	0.92	0.44	0.12	0.09
	2	0.01	0.10	1.93	0.84	0.40	0.11	0.00
	3	0.01	0.12	2.34	1.36	0.65	0.15	0.00
	4	0.01	0.10	1.93	0.84	0.40	0.11	0.00
Cajuela	1	0.01	0.10	1.91	0.70	0.33	0.09	0.04
	2	0.01	0.09	1.90	0.64	0.30	0.08	0.00
	3	0.01	0.10	1.92	0.81	0.38	0.11	0.00

III. RESULTADOS

Con el objetivo de parametrizar los cordones de adhesivo epóxico para cada uno los paneles de estudio, fue necesario realizar ajustes mínimos en el diámetro de cordón y longitud para facilitar la programación de *robot teaching* y la medición en el proceso productivo, ver Tabla VIII:

Esto resulta en un ajuste en el volumen aplicado. En la Tabla IX se muestra la reducción total por cada parte de estudio con respecto al cálculo generado previo a la elaboración de este proyecto de investigación:

Al cambiar los parámetros de aplicación, los límites de control (LSE y LIE) e integrar el control la temperatura de suministro y aplicación del adhesivo epóxico, se mejora la capacidad de proceso real (Cpk) a 1.18, obteniendo una media aritmética para el diámetro de cordón de 2.9 mm. Con estos resultados se obtuvo un nivel sigma de 3.39 ver Fig. 20.

TABLA VIII
PARÁMETROS DE APLICACIÓN PARA CORDONES DE ADHESIVO EPÓXICO DESPUÉS DE CÁLCULO INVERSO.

Parte	Sección	Cordón		Inicio/fin		Total
		Diámetro (mm)	Longitud (cm)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Volumen (cm³)
		h	l	a	b	
Puerta frontal derecha	1	3.0	641.0	1.0	7.0	4.5
	2	2.3	781.0	1.0	3.5	3.3
	3	2.0	512.0	1.5	5.5	1.6
	4	2.3	1051.0	1.0	5.0	4.4
	Total		2985.0		3022.0	13.8
Puerta trasera derecha	1	1.8	647.0	0.5	1.5	1.6
	2	2.3	494.0	1.0	3.0	2.1
	3	2.4	550.0	1.0	5.0	2.5
	4	2.1	1032.0	2.0	8.0	3.6
	Total		2723.0		2745.0	9.8
Puerta frontal izquierda	1	3.0	641.0	1.0	7.0	4.5
	2	2.3	781.0	1.0	3.5	3.3
	3	2.0	512.0	1.5	5.5	1.6
	4	2.3	1051.0	1.0	5.0	4.4
	Total		2985.0		3022.0	13.8
Puerta trasera izquierda	1	1.8	647.0	0.5	1.5	1.6
	2	2.3	494.0	1.0	3.0	2.1
	3	2.4	550.0	1.0	5.0	2.5
	4	2.1	1032.0	2.0	8.0	3.6
	Total		2723.0		2745.0	9.8
Cofre	1	2.0	1241.0	1.0	4.5	3.9
	2	1.9	1000.0			2.8
	3	2.3	1650.0			6.9
	4	1.9	1000.0			2.8
	Total		4891.0		4900.0	16.4
Cajuela	1	1.9	2093.0	1.0	3.5	5.9
	2	1.9	300.0			0.9
	3	1.9	1350.0			3.8
	Total		3743.0		3750.0	10.6

TABLA IX
COMPARATIVA DE VOLUMEN. INICIAL Y FINAL

Parte	Cálculo original	Florian Flaig parametrizado	Mejora final
	gal	gal	
Puerta frontal derecha	0.0039	0.0036	-6.88%
Puerta trasera derecha	0.0034	0.0026	-24.32%
Puerta frontal izquierda	0.0039	0.0036	-6.88%
Puerta trasera izquierda	0.0034	0.0026	-24.32%
Cofre	0.0063	0.0043	-31.58%
Cajuela	0.0047	0.0028	-40.30%
Promedio			-22.38%

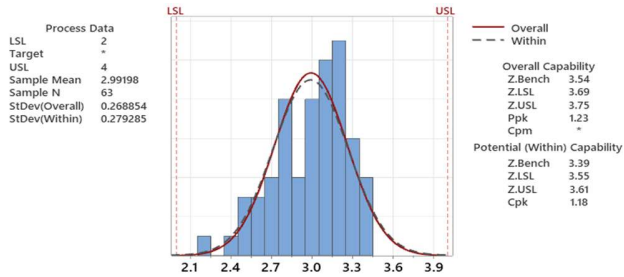


Fig. 20 - Capacidad de proceso de aplicación de adhesivo con nuevo equipo y nuevos parámetros de aplicación.

Una vez se implementadas las actividades de mejora de proceso, se obtuvo una mejora de reducción del DPU de 6.99 puntos (28.3%) con respecto al valor de DPU del mes de diciembre. En la Fig. 21 se muestra el resultado del DPU de planta carrocería de adhesivos epóxicos, en esta gráfica se puede observar que el valor promedio del DPU en el intervalo del mes de abril a diciembre del año 2023 fue de 28.07 puntos y a partir del mes de enero del año 2024 existe una reducción del DPU de 10.33 puntos con respecto al promedio, debido a que en este mes inició operaciones el equipo nuevo de control de temperatura de aplicación de adhesivo epóxico.

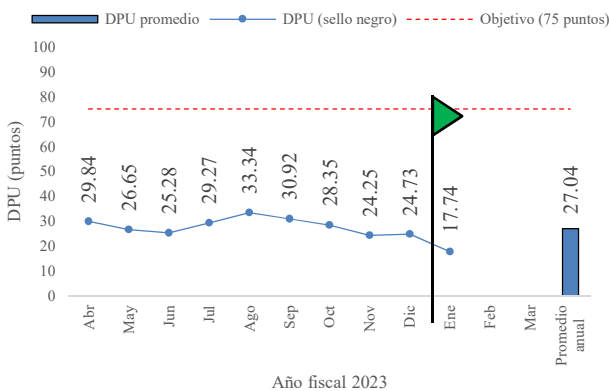


Fig. 21 - Mejora de DPU en aplicación de adhesivos epóxicos a partir del mes de enero 2024.

En la planta de carrocería, se realizó un estudio para conocer el costo de reparación de los defectos en los que el adhesivo epóxico se adhiere a la carrocería y pasan con este defecto a planta pintura. Como resultado de esta actividad se determinó que el costo de reparación es de 393.70 MXN por defecto reparado. Con esta información, se puede concluir que, para una planta con la capacidad de producir anualmente 215,004 unidades, se puede obtener un ahorro por mejora de calidad de 8.7 millones de pesos anuales, el cual se obtiene de la multiplicación de la diferencia de DPU por el costo de reparación y el volumen anual total dividido sobre 100.

Como se puede observar en la Fig. 22 el promedio de costo de la aplicación de adhesivo epóxico por unidad del mes de abril a diciembre del año 2023 fue de 57.89 MXN, contando con todos los datos fuera de la norma 47.64 MXN, a partir de la parametrización, se mejoró la repetibilidad de aplicación de adhesivos mediante la reprogramación de ruta de pasos de robot y la instalación del nuevo equipo, con lo que el costo por unidad de aplicación de adhesivo epóxico se redujo a partir del mes de enero (18,654 vehículos) a 45.75 MXN, lo que significa una

reducción de 12.14 MXN (20.97%) en relación con el valor promedio de abril a diciembre de 57.89 MXN.

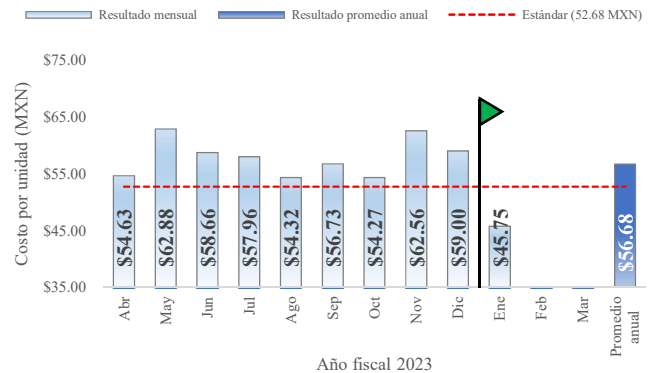


Fig. 22 - Mejora de CPU en aplicación de adhesivos epóxicos a partir del mes de enero 2024.

En el caso del CPU, el resultado anual que se obtiene de esta reducción de aplicación de adhesivo epóxico es la multiplicación de la diferencia del costo anterior y nuevo por el volumen anual total, dando un ahorro de 3.1 millones de pesos.

A continuación, se muestra la Tabla X en la que se muestran los ahorros obtenidos de la implementación de este proyecto de investigación para una planta automotriz con capacidad de producción de 215,004 vehículos anuales:

TABLA X
AHORRO TOTAL POR PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Concepto	KPI	Anterior MXN	Actual MXN	Ahorro MXN
Reducción de material adhesivo aplicado	CPU	60.66	45.78	3,198,624.23
Control de variación de aplicación de adhesivos	DPU	28.07	17.74	8,744,042.83
Total				11,942,667.05

IV. CONCLUSIONES

A través de la implementación de la metodología para mejora de procesos de *six sigma*, se incrementa la capacidad de proceso mediante la adquisición de datos, análisis y determinación de principales factores relevantes para reducir la variación estándar. Al lograrlo, se mejora la calidad del producto final, ya que existen menor cantidad de defectos en cada unidad, reduciendo el costo de los materiales auxiliares utilizados para la reparación. Un efecto añadido, es el incremento de capacidad de producción de los procesos, siendo necesaria menor cantidad de tiempo para reparación de defectos o retrabajo de piezas en la estación de aplicación de adhesivos para evitar la fuga de defecto.

Por otra parte, la aplicación del método de cálculo inverso permite determinar más eficientemente el volumen de material requerido para una junta adhesiva, optimizando el cálculo generado actualmente y generando ahorro por pieza producida.

Utilizando estas dos metodologías es posible incrementar la rentabilidad del proceso productivo en la industria automotriz ya que en el caso de estudio fue posible generar un ahorro por

reducción de defectos de 8.74 millones de pesos y por optimizar el material aplicado por junta adhesiva de 3.19 millones de pesos.

REFERENCIAS

- [1] A. Al-Zaher, «RMS design methodology for automotive framing systems BIW,» *Journal of Manufacturing Systems*, p. 13, 2013.
- [2] V. Swarnakar, «Evaluation of key performance indicators for sustainability assessment,» *Materials Today: Proceedings*, p. 5, 2021.
- [3] J. Skrzypek, «Cost-competitiveness and structural change in value chains –vertically-integrated analysis of the European automotive sector,» *Structural Change and Economic Dynamics*, p. 12, 2020.
- [4] F. Jesche, «Hem flange bonding: a challenging joining process in automotive body construction,» *Fraunhofer-Gesellschaft*, 2019.
- [5] A. Pizzi, «Adhesives in the automotive industry,» de *Handbook of adhesive technology*, Florida, Taylor & Francis Group, LLC, 2018, pp. 619-634.
- [6] H. G. Pulido, «Control estadístico de la calidad y seis sigma,» D.F., México, McGraw Hill, 2009, pp. 98-132.
- [7] F. Flaig, «How to Find the Perfect Application Pattern for Adhesively Bonded Joints?,» 2023.
- [8] P. A. K. T. Pyzdek, «The Six Sigma Handbook, A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels,» New York, The McGraw-Hill Companies, 2010, pp. 3-42.
- [9] DUPONT, «BETAMATE 73305GB,» [En línea]. Available: <https://dupont.materialdatacenter.com/products/datasheet/SI/BETAMATE%E2%84%A2%2073305GB>.
- [10] S. S. Kim, «Recent developments in the manufacturing technologies of composite components and their cost-effectiveness in the automotive industry: A review study,» *Composite Structures*, p. 18, 2021.