

Herramientas estadísticas Seis Sigma aplicadas a procesos en la industria de los adhesivos

Six Sigma statistical tools applied to processes in the adhesives industry

Miguel Angel Langle Flores¹ , Jaime Gerardo Malacara Navejar¹, María de Lourdes Castillo Carrillo¹ 

¹Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Reynosa, Tamaulipas, México

RESUMEN

En la industria manufacturera o intensiva en transformación de materia prima se utiliza la métrica sigma, en donde, a la distribución estadística de un producto en cuya parte central le corresponda una distancia de seis sigmas o seis desviaciones estándar se le considera eficiente en términos de calidad. A manera de caso de estudio, se aplicó la metodología Seis Sigma con el objetivo de reducir las variaciones en distintas propiedades fisicoquímicas (densidad, viscosidad y porcentaje de sólidos) pertenecientes a cuatro distintos adhesivos para calzado elaborados por una industria química mexicana. Los indicadores iniciales mostraron un desempeño superior a 2 sigmas, mismos que fueron ajustados mediante un procedimiento tipo DMAIC constituyente de la manufactura delgada. Si bien en la mayoría de los casos se corrigieron las alteraciones (métrica sigma superior a 3), la variabilidad fuera de los parámetros Seis Sigma persistió en determinadas ocasiones al evidenciarse la presencia de perturbaciones de mayor profundidad. Dado lo anterior, en la industria química correspondiente a los adhesivos y los acabados para el cuero, la elección de la propiedad sujeta a los parámetros de calidad es fundamental para cumplir la métrica sigma y determinar los errores aleatorios y sistemáticos.

PALABRAS CLAVE: Seis Sigma; Manufactura Delgada; industria química; México.

ABSTRACT

In the manufacturing industry or industry intensive in raw material transformation, the sigma metric is used, where the statistical distribution of a product in whose central part corresponds a distance of six sigmas or six standard deviations is considered efficient in terms of quality. As a case study, the Six Sigma methodology was applied with the objective of reducing the variations in different physicochemical properties (density, viscosity and percentage of solids) belonging to four different adhesives for footwear manufactured by a Mexican chemical industry. The initial indicators showed a performance greater than 2 sigmas, which were adjusted by a DMAIC type procedure, which is a constituent of lean manufacturing. Although in most cases the alterations were corrected (sigma metric greater than 3), the variability outside the Six Sigma parameters persisted on certain occasions when the presence of deeper disturbances became evident. Given the above, in the chemical industry corresponding to adhesives and leather finishes, the choice of the property subject to quality parameters is essential to meet the sigma metric and determine random and systematic errors.

KEYWORDS: Six Sigma; Lean Manufacturing; chemical industry; Mexico.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Miguel Angel Langle Flores
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Tamaulipas / Unidad Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe
DIRECCIÓN: Carretera Reynosa-San Fernando, cruce con canal Rodhe, col. Arcoiris, C. P. 88779, Reynosa, Tamaulipas, México
CORREO ELECTRÓNICO: miguel.langle@uat.edu.mx

Fecha de recepción: 8 de marzo de 2024. **Fecha de aceptación:** 30 de agosto de 2024. **Fecha de publicación:** 12 de septiembre de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las empresas se encuentran sujetas a procesos de libre comercio y deslocalización de los factores de producción, y ante ello se ha vuelto primordial la necesidad de incrementar de manera constante su productividad y eficiencia ^[1].

La industria manufacturera se caracteriza por una serie de procesos sucesivos y repetitivos para ensamblar productos intermedios o finales ^[2]. En dichos procesos, el control de la variación es un factor central en materia de calidad. Ejemplo de ello son las propiedades físicas y químicas de los insumos, mismas que añaden incertidumbre durante los sucesivos procesos de transformación. En consecuencia, el ignorar la existencia de estas alteraciones deriva en una asignación ineficiente e ineficaz de la producción final conforme varía la calidad de los bienes y servicios ofertados.

Dado lo anterior, las herramientas para mejorar la calidad de los procesos contribuyen a abatir las actuales problemáticas empresariales en materia de competitividad ^[3]. Ante ello, surge la necesidad de utilizar metodologías de mejoramiento continuo, como Seis Sigma (SS), Manufactura Delgada o Lean Manufacturing (LM) y Lean Seis Sigma (LSS).

En el primer caso, esta herramienta, desarrollada en la compañía Motorola en la década de los ochenta, reduce los desperdicios hasta un nivel de 3.4 partes por millón de oportunidades o eventos, esto es, el 0.00034 % de la producción, métrica que se sostiene mediante la optimización continua de la producción. Por su parte, LM tiene como objetivo la disminución de los tiempos de espera a través de la eliminación de los residuos, mientras que LSS combina ambos de los planteamientos anteriores para mejorar tanto la calidad como los costos del proceso de manera simultánea ^[4].

Así, el ciclo de mejora continua característico de Seis Sigma, que es Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC, por sus siglas en inglés), involucra, secuencialmente, diversas herramientas de la filosofía Lean enfocadas en la eliminación de los desperdicios y la optimización de la producción ^[5].¹

¹ De acuerdo con ^[6], existen ocho tipos de desechos: exceso de inventario, transporte innecesario, tiempo de espera, exceso de procesamiento, producción excesiva, productos no conformes, talento no utilizado y falta de estandarización.

Ante ello, Lean Seis Sigma ha tomado una relevancia significativa en las últimas dos décadas por la eficiencia y magnitud de sus resultados ^[7], ^[8], ^[9], ^[10]. Los esfuerzos de Seis Sigma se concentran en tres áreas principales: 1) mejorar la satisfacción del cliente, 2) reducir el tiempo del ciclo y 3) disminuir los defectos. Las mejoras en estos rubros significan, principalmente, la reducción de costos, el aumento de la cartera de clientes y el mejoramiento de la imagen de la empresa ^[11].²

Bajo dicho escenario, el presente trabajo aplica la metodología Seis Sigma con la finalidad de reducir la variación de un conjunto de propiedades fisicoquímicas correspondientes a cuatro distintos adhesivos para calzado elaborados por una pequeña empresa química mexicana, especializada en acabados para la piel (pigmentos y resinas), como es el caso de la densidad, la viscosidad y el porcentaje de sólidos.³ Además de reducir la variabilidad identificada a parámetros cercanos a los estándares de Seis Sigma, se implementan un conjunto de herramientas pertenecientes a la manufactura delgada para aplicar la mejora continua de procesos productivos al interior de la planta a través del cumplimiento y seguimiento constante de un plan de acción específico.

ANCLAJE EMPÍRICO Y TEÓRICO

Empíricamente, la metodología Seis Sigma se desarrolla alrededor de tres grandes categorías: 1) reducción de merma manufacturera, 2) optimización de la atención a clientes ^[13], ^[14], ^[15], ^[5], ^[16], ^[17], ^[18], ^[19], ^[20], ^[21], ^[22] y 3) mejoramiento de la precisión en análisis clínicos. En ^[23] se señala que las herramientas de la manufactura delgada resultan idóneas para mejorar en más de dos terceras partes la eficiencia, mientras que en ^[24] se aplicó la metodología Seis Sigma en la atención farmacéutica a pacientes y los errores de selección de turno disminuyeron en 41,9 % y el 51.3 % de los pacientes que expresaron una mejoría en el tiempo de espera. En contraste, en ^[25] se planteó, para la etapa preanalítica de un laboratorio de análisis clínicos, una meta mínima de 4 sigmas, y se

² Existen organismos capacitadores certificados que otorgan constancias o cinturones, por ejemplo: blanco (capacitación teórica básica), amarillo (comprensión de las metodologías fundamentales), verde (realización de pruebas estadísticas mediante softwares), negro (empleo del diseño de experimentos), negro maestro (lidera el proceso general y capacita al personal), y campeón (actividades de dirección y alta gerencia) ^[12].

³ Por razones de confidencialidad inherentes a los intereses de la empresa, el nombre específico de la firma se mantiene anónimo en el presente artículo.

considera la elección del requisito de calidad como el factor más importante para satisfacer la métrica sigma.

Al interior de la industria manufacturera, en [26] se examinaron los defectos de una línea de ensamble de arneses automotrices mediante herramientas tipo Lean y se registró una mejora cercana al 20 % sobre el total de piezas producidas semanalmente. Por otra parte en [27] se abordó el tema del impulso a la productividad de la industria textil de Tehuacán, Puebla, sin embargo, los autores denotan la falta de precisión en los objetivos empresariales como el obstáculo principal para el plan de acción.

Por otra parte, en [11] se aplicó la metodología DMAIC a la fabricación de paneles modulares de poliestireno para la construcción y se reportó un incremento de la confiabilidad del proceso de 81 % a 98 %, además de una reducción del 66 % en los DPMO (Defectos Por Millón de Oportunidades). En contraparte, en [3] se analizó el proceso de confección de camisas y se logró reducir los tiempos de operación a través de Lean Six Sigma Logistics. Análogamente, en [28] se empleó la metodología DMAIC y la herramienta Seis Sigma en la elaboración de reguladores automotrices y se destaca una reducción del 77.5 % en la incidencia de fallas.

En [29] se implementó la metodología DMAIC en el ensamble de tablillas electrónicas y se redujo significativamente la merma al identificar los parámetros críticos. A su vez, en [30] se aplicó Seis Sigma en los procesos de pintura y se logró incrementar el nivel sigma del proceso de 2.4 a 3.6. Individualmente, en [31] se empleó Seis Sigma en la identificación de defectos en las tarjetas electrónicas de telecomunicaciones, mismos que se redujeron en más de dos terceras partes.

En contraste, en [32] se optimizó la continuidad y la automatización de una línea de envasado tipo PET (por sus siglas en inglés) en más de tres cuartas partes con la metodología DMAIC-Seis Sigma. Por su lado, en [33] se empleó Seis Sigma en la confección y distribución de material de intendencia y se redujo en 26 % los costos derivados de las fallas en la calidad. En la misma línea, en [34] se analizó los desperdicios generados en la producción de losas alveolares mediante Lean Seis Sigma y se recomienda que la métrica sigma de 3.5 debe mejorarse a 4.5 para sostener la optimización en el tiempo.

Análogamente, en [35] se implementó DMAIC-Lean Seis Sigma en la fabricación de tapas y botellas, construyen-

do su métrica sigma (2.6 equivalente a 138.042 DPMO) para disminuir los desperdicios. En este sentido, en [36] se analizó la productividad de la industria maquiladora de sombreros de Tehuacán, Puebla, y se focalizó la variación de la puntada como el factor clave para mejorar la calidad. Mientras que en [1] se minimizó los residuos existentes en el proceso de recuperación de envases de aluminio, al optimizar el nivel sigma de 2 a 3 (7 % de defectos).

En contraparte, en [37] se implementó Seis Sigma para optimizar el servicio técnico de una manufacturera. Sus resultados denotan un incremento en la eficiencia cercano al 10 %. Contemporáneamente, en [38] se combinaron herramientas de Lean Seis Sigma con la simulación discreta en una empresa colombiana de artes gráficas, lo cual representa contracciones en los tiempos de cambio en más de dos quintas partes. A su vez, en [39] se elaboró un manual para la elaboración de proyectos de tarjetas electrónicas a partir de encuestas especializadas y la metodología Seis Sigma y sus resultados demuestran un incremento de 50 % en el nivel de aceptación de proyectos. En tanto, en [40] se redujeron los productos defectuosos de una empresa textil con la implementación de Seis Sigma y se incrementó la eficiencia en 10 %. Bajo este enfoque, en [41] se logró mejorar los procesos de producción de cerveza artesanal al aumentar la productividad en un 25 %. Finalmente, en [42] se perfeccionó la gestión de las mediciones en el proceso de refinación de diésel, se llevaron a cabo estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad (R & R) y con los ajustes realizados se contrajo la variabilidad en dos terceras partes.

Teóricamente, en [43] se identificó la dirección, la estrategia institucional, la selección del personal y la comunicación como los factores críticos para la aplicación exitosa de Seis Sigma. No obstante, en [44] se señala la inexistencia de una guía para el uso secuencial de las herramientas Seis Sigma ante situaciones específicas. Por su parte, en [7] se evidencia tanto las principales limitaciones como las sugerencias centrales para la implementación exitosa de Seis Sigma en la industria mexicana. En el primer estudio sobresalen la falta de compromiso, la carencia de personal capacitado, el escaso apoyo de la alta dirección, la débil relación costo-beneficio y la falta de trabajo en equipo, mientras que en el caso ulterior destacan un sistema previo de gestión de calidad, el seguimiento de la alta dirección, la formación de coordinadores de proyectos, la capacitación sobre trabajo en equipo y uso de software y el sistema de información.

De acuerdo con [7, p. 67], implantar Seis Sigma, que incluye al menos veinte herramientas, puede tardar varios años aunque se usen buenos recursos computacionales, sin embargo, ese tiempo puede ser menor si la dirección tiene un compromiso real de impulsarla y darle seguimiento y si se capacita al personal en forma apropiada.

Por otro lado, en [45] se presenta una revisión literaria sobre la implementación de mejoras Seis Sigma en MIPYME (Micro, Pequeñas y Medianas Empresas). Si bien la innovación tecnológica y la experiencia en el ramo resaltan como factores centrales, los autores de este artículo abogan por la necesidad de comprometer a los empresarios mediante sus efectos en la reducción de los costos.

En el caso de las MIPYME manufactureras de corte químico, Seis Sigma reduce la variabilidad del producto final, especialmente en los procesos discontinuos o de tipo lote (*batch*, por su anglicismo), en donde los productos que no cumplen los requisitos del cliente se consideran defectuosos. Además, interviene en la regulación del proceso en pro de su diseño y optimización [46].

II. METODOLOGÍA

LEAN MANUFACTURING

El método de producción Lean Manufacturing o manufactura delgada tiene sus orígenes en la compañía Toyota durante la década de los sesenta y consiste en una colección de estrategias y prácticas de negocio enfocadas tanto a la eliminación de los desechos como a la mejora continua al interior de la organización. El método se conforma por diversos principios: 1) *visibilidad y organización de los desperdicios*: además de identificar las fuentes de desperdicios, es necesario identificar las actividades por su valor añadido; 2) *estrategia y flexibilidad*: implica el compromiso de la dirección para formar equipos, definir líderes y objetivos, así como la disposición al cambio y la orientación de la producción hacia la demanda (sistema Pull); 3) *simplicidad*: los problemas complejos se descomponen en problemas simples para tratar de encontrar sus soluciones más sencillas y, en consecuencia, mejores; y 4) *mejora continua*: al hacer uso de la filosofía Kaizen de mejora continua, la implementación de constantes optimizaciones se traduce en resultados estables y de largo plazo. Lo anterior implica sujetarse a las premisas siguientes: desechar las ideas fijas, reflexionar en lugar de negar, aplicar inmediata-

mente las propuestas de mejoras, conformarse con la obtención de ganancias superiores a dos terceras partes, corregir los errores en el momento, fomentar la innovación ante la dificultad, identificar la causa real, priorizar las ideas grupales, probar y validar, y la mejora es permanente [47, pp. 13-14].

SEIS SIGMA

De acuerdo con [7], Seis Sigma es una metodología que reduce la variabilidad de los procesos. En una distribución normal, la capacidad del proceso es el número de veces que el valor de la desviación estándar cabe en la distancia comprendida por entre la media y el límite de especificaciones (inferior [LIE] o superior [LSE]) más cercano a esta (Tabla 1). Por ejemplo, un proceso con capacidad de 3 sigma tiene 3 sigmas de distancia entre cada límite de especificación (para cierta característica) y su media, por tanto, puede originar 0.27 % de defectos sobre esa característica [7, p. 61].

En un nivel elevado de sigma, los defectos tienen menor probabilidad de ocurrir, no obstante, si la producción en el corto plazo (un día o un turno) tiene una capacidad de 6 sigma, en el largo plazo (un mes o más) la media del proceso se moverá máximo 1.5 sigma por distintas circunstancias de variación normal en los procesos y la capacidad a largo plazo quedará en solo 4.5 sigma [7, p. 62]. Dicho ajuste brinda una idea más adecuada de la capacidad real del proceso conforme continúan los subsecuentes ciclos repetitivos de manufactura [48].

TABLA 1 [49, p. 25]

EQUIVALENCIA ENTRE NIVEL SIGMA, DPMO, RENDIMIENTO Y LA REPRESENTATIVIDAD DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL

NIVEL EN SIGMA	DEFECTOS POR MILLÓN DE OPORTUNIDADES	RENDIMIENTO (%)	DISTRIBUCIÓN NORMAL (%)
6	3.4	99.9997	99.999999
5	233	99.977	99.9999
4	6210	99.379	99.99
3	66 807	93.32	99.73
2	308 537	69.27	95.45
1	690 000	31	68.27

En síntesis, en [50] se resumen las características centrales del modelo Lean Seis Sigma como sigue: 1) priorizar las necesidades de los clientes, 2) introducir fluidez en

los procesos, 3) añadir valor a través de reducir desechos, 4) eliminar la variabilidad, 5) participación integral, 6) mejora continua de la toma de decisiones y la sistematización y 7) control estadístico de los procesos. El modelo LSS sigue las fases del ciclo DMAIC descrito en los siguientes párrafos.

Fase 1. Definir

En [49, p. 43], la primera etapa de la fase de definición consiste en determinar las variables críticas para la calidad del proceso a través de la retroalimentación, esto es, los atributos o características relacionados con la calidad de un producto o servicio que son importantes para el cliente. Para determinar dichos elementos se tiene que conocer la Voz del Cliente (VOC, por sus siglas en inglés) interna o externa acerca del producto o servicio proporcionado con la finalidad de identificar su grado de satisfacción.

Posteriormente, se selecciona el problema a resolver, el cual debe considerar criterios como la seguridad, la calidad, el costo, la entrega y el servicio.⁴ Es decir, además de explicitar los antecedentes, la importancia y la prioridad del problema, se anuncia, contrafactualmente, cómo impactaría la mejora del proceso sobre los intereses del negocio. Si bien la realización de los proyectos se direcciona a través del líder (Green Belt), el cual verifica el cumplimiento de la metodología y se asesora por un experto certificado (Black Belt), es necesario conformar un equipo de trabajo, seleccionando a las personas clave tanto por su nivel de conocimiento y experiencia como por su ubicación en el proceso [12].

De acuerdo con [47], las herramientas utilizadas en esta etapa son las siguientes: 1) los árboles de Requisitos Críticos para la Calidad (CTQ, por sus siglas en inglés) para encontrar los requisitos de los clientes; 2) el mapeo de procesos mediante diagramas de Proveedores, Entradas, Procesos, Salidas y Clientes (SIPOC, por sus siglas en inglés) o diagramas de flujo (Tabla 2); 3) el cuadro de proyecto conformado por un resumen ejecutivo de los procedimientos a seguir y 4) la estadística descriptiva del proceso productivo en vías de optimización (Tabla 5).

⁴ Aunque, por razones de espacio, el mapeo del proceso y los diagrama de Ishikawa y Pareto, así como los gráficos de dispersión e histogramas de frecuencias no se muestran en el presente artículo, dichos elementos pueden ser solicitados a los autores.

TABLA 2 [47, p. 58]
EJEMPLO DE DIAGRAMA SIPOC: MANUFACTURA, REPARACIÓN DE MOTOR

PROVEEDORES	ENTRADAS	PROCESO	SALIDAS	CLIENTES
¿Quién suministra lo que se necesita del proceso?	¿Cuáles son los insumos requeridos?	¿Qué hace el proceso?	¿Cuál es el resultado del proceso?	¿Qué clientes necesitan la salida del proceso?
Bodeguero	Herramientas	Retiro de materiales de bodega	Motor reparado	Jefe de área
Jefe de área	Repuestos	Selección de herramientas	Informe de trabajo	
Planificador	Materiales	Solicitud de permisos de trabajo	Permiso de trabajo realizado	
Prevencionista de riesgos	Motor en mal estado	Evaluación de riesgos		
	Orden de trabajo	Reparación de motor		
	Permiso de trabajo	Generación de informe		

Fase 2. Medir

En esta fase se toman datos para validar el problema y con esta información crítica se refina el desarrollo del plan de mejora, al facilitar la identificación de las causas raíz. Los objetivos de esta fase son identificar las herramientas de medición, determinar las mediciones relevantes, determinar las causas de la variabilidad, recolectar y adecuar la información, realizar un Análisis del Sistema de Medición (ASM) y cuantificar la incidencia de los defectos. Entre las citadas herramientas destacan los diagramas de causas y efectos (diagramas de Ishikawa y de Pareto), los estudios R & R y el análisis de la capacidad del proceso.

De acuerdo con [49, p. 113], la *capacidad del proceso* (CP) es la capacidad para producir productos dentro de los límites de especificaciones de calidad y para calcularla se utiliza la fórmula siguiente:

$$CP = \frac{LSE-LIE}{6\sigma} \tag{1}$$

Además, la Capacidad Real del Proceso (CPk) se estima como el valor mínimo absoluto, ya sea de Zs o Zi entre 3, donde $Zs = \frac{LSE-media}{\sigma}$ y $Zi = \frac{LIE-media}{\sigma}$. Ambas capacidades deben ser superiores a 1 para que el proceso cumpla con las especificaciones [49, p. 114].

En el caso del diagrama de Ishikawa (Figura 1), además de plantear los principales factores involucrados en la columna vertebral del proceso productivo o de las etapas de elaboración del producto, así como sus principales elementos secundarios, deben determinarse aquellos elementos que inciden en el problema o en la producción defectuosa categorizando tanto las causas del inconveniente (color rojo) como los puntos a favor (color verde) y el resto de los elementos (color negro) [51].

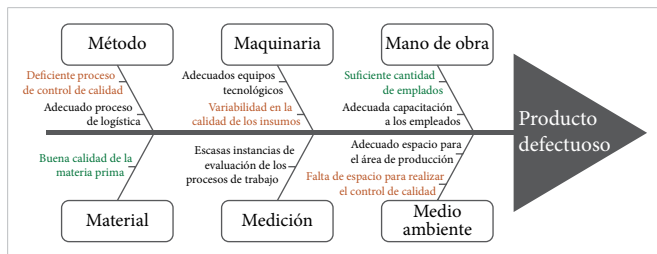


Figura 1. Ejemplo de diagrama de Ishikawa: manufactura [51].

En contraste, el diagrama de Pareto (Figura 2) identifica las probables causas de los defectos para centrarse en las más importantes para el proceso. A partir del principio de Pareto, en donde la mayor parte del beneficio (cerca del 80 %) se debe a un número limitado de acciones (alrededor del 20 %), así se determinan las principales causas generadoras de los defectos [47].

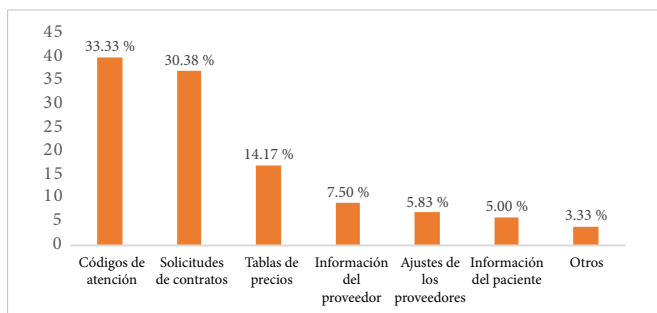


Figura 2. Diagrama de Pareto: servicios y seguros de gastos médicos [52].

Fase 3. Analizar

En esta fase se analizan los datos obtenidos en la etapa de medición para conocer las relaciones de causalidad o causas raíz del problema. La información de este análisis proporciona evidencias de las fuentes de variación, a través de las pruebas de hipótesis y el análisis de regresión (Tabla 7).⁵

⁵ En resumen, la regresión lineal cumple con los siguientes supuestos: linealidad en los parámetros, aunque no necesariamente en las variables; los regresores son independientes del término de error; y no existe autocorrelación entre las perturbaciones, las cuales tienen media cero e idéntica varianza [53].

También puede recurrirse al análisis correlacional con gráficos de dispersión (Figura 3) y al Análisis de Modos de Fallas y Efectos (AMEF) para componentes de diseño de equipos y procesos de manufactura o ensamble.

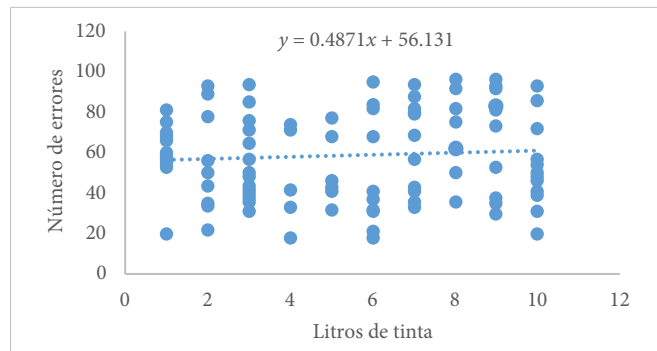


Figura 3. Ejemplo de gráfico de dispersión: servicios e impresión.

Fase 4. Mejorar

Después de seleccionar las características de desempeño del producto para alcanzar la meta de mejora, en esta fase se utiliza el Diseño de Experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) a partir del árbol CTQ con el objeto de profundizar sobre el comportamiento del proceso e incidir en su optimización. Entre las herramientas centrales empleadas en esta fase destaca la caracterización estadística y gráfica del conjunto de variables tanto endógenas como explicativas, así como el análisis contrafactual de las mejoras implementadas al proceso a través del Método de Superficie de Respuesta (MSR), el análisis de varianza (Tabla 9) y la estimación del rendimiento (Ecuación (2)) (Tabla 10).

$$\text{porcentaje de eficiencia} = \left[\frac{\text{datos incorrectos (fuera de rango o sobre el límite)}}{\text{tamaño de la muestra}} - 1 \right] (100) \quad (2)$$

Fase 5. Controlar

La última fase consiste en aplicar los controles pertinentes para asegurar el mantenimiento de los logros, mediante herramientas como la capacitación, los recursos Poka Yoke, las 5S, las técnicas de comunicación y el plan de control. Por tanto, los objetivos de la fase de control se centran tanto en la optimización como en la lógica tipo Kaizen.

Por ejemplo, las 5S emplean el sentido común enfocado al orden con disciplina para organizar las actividades de trabajo (Tabla 3). Además de eliminar la tendencia a

conservar elementos no necesarios, busca clasificar las cosas de acuerdo con su grado de necesidad al ordenar lo necesario y mantener limpio el entorno de trabajo, así como estandarizar y sostener de manera rutinaria y sistemática los procedimientos anteriores [47].

TABLA 3 [47, p. 147]
EJEMPLO DE 5S: MANUFACTURA

SUPRIMIR (SEIRI)	Suprimir lo no necesario, al clasificar las cosas conforme a su necesidad y quedarnos con las necesarias siempre o frecuentemente.
ORDENAR (SEITON)	Ordenar lo necesario y evitar errores, fallos o retrasos al realizar las tareas. Sistematizar la colocación de objetos y señalar.
LIMPIAR (SEISO)	Establecer rutinas de limpieza / revisión para contribuir al orden y descubrir desajustes, faltas o roturas que pueden originar defectos.
ESTANDARIZAR (SEIKETSU)	Estandarizar la aplicación sistemática y rutinaria de las técnicas anteriores.
MANTENER (SHITSUKE)	Mantener y supervisar diariamente para asegurar que los estándares se están aplicando según lo previsto.

En contraste, en el plan de control es necesario especificar tanto las características del proceso optimizado como los requerimientos para garantizar el control su desempeño bajo los nuevos estándares ajustados de mejora (Figura 4). Además, se indica la frecuencia y el modo de muestreo, así como las formas de detección de anomalías y las medidas a tomar sujetas a dichas alteraciones [47].

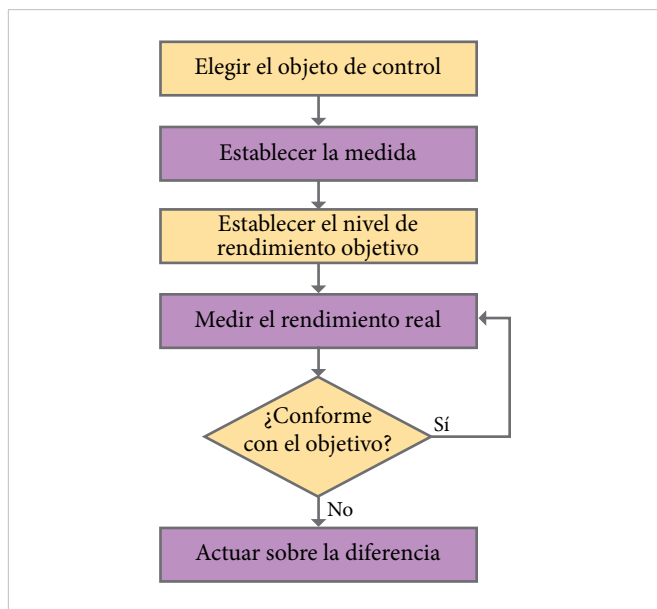


Figura 4. Ejemplo de la dinámica del plan de control de un proceso: manufactura [47, p. 157].

Una vez aplicadas las mejoras, se vuelven a estimar las métricas sigma del proceso, en donde, de tener lugar un proceso o etapa del proceso sin control y/o sin cumplir los requerimientos, se regresa a la fase correspondiente del método DMAIC con la intención de repetir y cerrar el ciclo. En caso contrario, se reportan los logros y el equipo se diluye [49, p. 204]. En este caso, la Tabla 4 esquematiza las veinte herramientas estadísticas utilizadas en cada una de las distintas cinco fases, con la intención de crear un ambiente de manufactura de alto desempeño y reducir el desperdicio en la citada firma.

TABLA 4
HERRAMIENTAS UTILIZADAS DE LEAN SEIS SIGMA - DMAIC

DEFINIR	MEDIR	ANALIZAR	MEJORAR	CONTROLAR
Mapeo del proceso	Diagrama de Pareto	ASM	DOE	Plan de control
Estadística descriptiva	Diagrama de Ishikawa	Regresión lineal	Análisis de varianza	Gráficos de control
Sistema de calidad	Muestreo y recolección	Pruebas de hipótesis	MSR	Kaizen
VOC	Histogramas de frecuencias	Gráficos de dispersión	Capacidad y rendimiento	5S

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

FASES 1 Y 2: DEFINIR Y ANALIZAR

Ante la necesidad explícita de la empresa por reducir la variabilidad en los parámetros de calidad de sus productos y con ello disminuir la proporción de productos considerados no adecuados por los propios clientes, se identificaron las áreas de oportunidad del proceso de elaboración de adhesivos para calzado.⁶ Tal es el caso del producto arrojado por los tanques de mezclado una vez integrados los insumos intermedios al proceso de producción. Dicho producto cuasi final debe verificarse alrededor del cumplimiento de varias propiedades físico-químicas antes de su subsecuente proceso de envasado y etiquetamiento, entre ellas el porcentaje de sólidos, viscosidad y la densidad.

Dado lo anterior, se recurrió a la recopilación periódica (mensual) de la información disponible sobre los cuatro pegamentos elaborados (PVC2000, PM370, PM1001 y

⁶ Los datos de la presente sección son producto de estimaciones propias a partir de la información arrojada por el proceso y el uso del software Minitab (versión 18).

PM7080) por la empresa en el transcurso de seis meses, a través del personal del área correspondiente; constituido por tres operarios de producción (Ecuación (3)).

$$n = \frac{(Z^2)(P)(N)}{e(N-1)+Z^2*P} \quad (3)$$

Al aplicar la Ecuación (3) [54] para un intervalo de confianza del 95 % ($P; e = 0.05; Z = 1.96$) y una población (N) de 60 lotes semestrales (2.5 semanales) para cada uno de los cuatro pegamentos, se obtuvo un tamaño mínimo de muestra por pegamento de 34, mismo que se cuatriplicó en la estimación final debido a la toma unitaria de muestra semanal de cada uno de los tres operarios sobre el mismo lote por cada tipo de adhesivo, para un total semestral de 180 muestras por pegamento.

En síntesis, para producir un lote de 40 latas (18 litros cada una) de los pegamentos de contacto (PM1001, PM7080, PM370 y PVC2000) para el montado del zapato, se cargó el mezclador con 240 litros de hexano (400 litros de acetona en el caso del PVC2000), 300 litros de tolueno, 7 kilogramos de resina específica, 75 kilogramos de neopreno (poliuretano en el caso del PVC2000) y 100 gramos de dióxido de silicio en polvo (5 kilogramos en el caso del PVC2000). Finalmente, después de 6 (primeros tres casos) y 2 horas (último caso), se tomó una muestra para analizar en el viscosímetro con la aguja 4 a 20 revoluciones por minuto. El rango adecuado para tener un adhesivo de calidad a 25 °C es de 4310 a 4290 centipoise y si la temperatura del producto no es la adecuada hay que enfriar o evaporar. En el caso de la densidad, se verificó mediante la fórmula: $densidad = masa/volumen$, mientras que el $porcentaje\ de\ sólidos = (masa\ de\ sólidos / masa\ de\ muestra) (100)$.

En la [Tabla 5](#) se presenta un análisis estadístico descriptivo respecto al porcentaje de sólidos, viscosidad y densidad para los cuatro tipos de adhesivos analizados en el presente estudio, con base en las 34 mediciones individuales correspondientes realizadas por cada uno de los tres operarios. Se observa las disparidades al interior de las tres propiedades analizadas para los cuatro adhesivos bajo estudio, respecto a los valores de la desviación estándar individual y agregada.

FASE 3: MEDIR

Las tres propiedades bajo estudio (porcentaje de sólidos, viscosidad y densidad) en los cuatro tipos de adhesivos,

muestran una disparidad en las mediciones reportadas por los tres operarios disponibles en el único turno laboral de la firma (diurno), en términos tanto de su media aritmética como de los límites de la distribución (desviaciones estándar). Lo anterior sugiere un escenario en línea con la hipótesis alternativa implícita, es decir, la existencia de variabilidad en los procedimientos de medición. En otras palabras, al examinar la situación actual de las tres propiedades de los pegamentos producidos por la firma, se aprecia cómo la mayoría de los datos se encuentra fuera de los rangos establecidos para obtener las condiciones 6 sigma.

Además, se realizó el Análisis del Sistema de Medición mediante la obtención de los valores de repetibilidad y reproducibilidad ([Tabla 6](#)). Los resultados muestran que el porcentaje de variación del sistema de medición total se encuentra en 93.91 y, a su vez, la contribución al error se sitúa en 81.14 %. De acuerdo con [49, p. 95], ambos parámetros se consideran no aceptables, al superar los márgenes de 30 y 10 %, respectivamente.

A su vez, los Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) con ANOVA (Análisis de Varianza Factorial [intra e intergrup]) permiten verificar la estabilidad de los parámetros de los cuatro adhesivos al tener valores muy similares en sus tres propiedades ([Tabla 7](#)).

En consecuencia, se muestra la relación entre las propiedades de los productos, al emplear el adhesivo PVC2000 como variable dependiente y el resto (PM370, PM1001, PM708) como independientes. No obstante, las estimaciones solo muestran significancia estadística al 5 % en los casos del adhesivo PM370, en las tres propiedades, y en la viscosidad del pegamento PM1001.

FASE 4: MEJORAR

Una vez analizadas las principales variables del proceso y haber capacitado intensivamente al personal acerca de los procedimientos adecuados para la toma de muestra, especialmente, en materia de eliminación de residuos sólidos y exceso de solvente, tiempo de lectura y temperatura de la muestra, se inició el procedimiento de mejora al replicar el ASM ([Tabla 8](#)). Los resultados indican que el porcentaje de variabilidad del sistema de medición total transita de 93.91 a 17.64 % y, de igual forma, la contribución al error se reduce hasta 1.44 %, lo cual significa que la mayor parte de la variación se debe a la diferencia entre las partes.

Por tanto, las adecuaciones realizadas sobre el sistema de medición contribuyeron a reducir la variabilidad de este, al mejorar (de forma significativa) la repetitividad y reproducibilidad de los análisis e incrementar la confiabilidad y la consistencia de mecanismos. Entre dichas mejoras o adecuaciones sobresale la supervisión del procedimiento de medición, la calibración de los instrumentos, la estandarización de los mecanismos, la incorporación de instrumentos idóneos y la capacitación y selección del personal.

Colateralmente, con el DOE se profundizó en los impactos de los cambios en las variables sobre el proceso productivo. Así, se seleccionó el DOE de superficie de respuesta como el mecanismo adecuado. Dicho método se constituye por el análisis de la varianza, utiliza los niveles mínimos y máximos de las variables del proceso y permite determinar si las modificaciones realizadas inciden en la variabilidad del proceso productivo.

TABLA 5
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA INICIAL: PORCENTAJE DE SÓLIDOS, VISCOSIDAD, DENSIDAD

PORCENTAJE DE SÓLIDOS							
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Producto	<i>n</i>	Media	Sigma
Factor	3	3.853	1.284	PVC2000	180	35.170	0.744
Error	176	168.869	0.474	PM370	180	34.943	0.677
Total	179	172.721	F: 2.71	PM1001	180	34.906	0.649
R2 = 2.23 %	R2 ajustada = 1.41 %	Desviación estándar agrupada = 0.689	PM7080	180	34.954	0.681	
VISCOSIDAD							
Factor	3	918	306	PVC2000	180	4301.2	2.5
Error	176	40442	114	PM370	180	4303.6	8.8
Total	179	41360	F: 2.69	PM1001	180	4301.0	11
R2 = 2.22 %	R2 ajustada = 1.40 %	Desviación estándar agrupada = 4.73	PM7080	180	4299.1	10	
DENSIDAD							
Factor	3	0.00028	0.00009	PVC2000	180	0.8509	0.0065
Error	176	0.01491	0.00004	PM370	180	0.8493	0.0063
Total	179	0.01519	F: 2.25	PM1001	180	0.8485	0.0064
R2 = 1.86 %	R2 ajustada = 1.04 %	Desviación estándar agrupada = 0.00647	PM7080	180	0.8492	0.0065	
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95 %							

TABLA 6
ESTUDIO R & R DEL SISTEMA DE MEDICIÓN. MÉTODO XBARRA/R

% CONTRIBUCIÓN			DESVIACIÓN ESTÁNDAR		
Fuente	Variación de componente	% variación de componente	DE (Desviación estándar)	6*DE	% variación de estudio
R & R del sistema de medición total	3.12398	81.14	1.86749	8.34187	93.91
Repetibilidad	3.00808	78.13	1.84381	8.2341	92.22
Reproducibilidad	0.1159	3.01	0.02413	0.10776	17.22
Parte a parte	0.72591	18.86	0.67279	3.0047	35.74
Variación total	3.84989	100	2.54028	11.3449	100
Número de categorías distintas = 3					

TABLA 7
MCO: PORCENTAJE DE SÓLIDOS, VISCOSIDAD, DENSIDAD

PORCENTAJE DE SÓLIDOS							
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Producto	Coefficiente	Sesgo estadístico	Estadístico T
Factor	3	6.6018	2.2006	Constante	57.003	6.97	9.05
Error	176	42.6222	0.4956	PM370	-0.3673	0.1130	-3.25
Total	179	49.2240	F: 4.44	PM1001	-0.2255	0.1405	-1.60
R2 = 13.4 %	R2 ajustada = 10.4 %	S = 0.703994	PM7080	-0.0323	0.1317	-0.25	
VISCOSIDAD							
Factor	3	2308.2	769.4	Constante	1301.5	916.7	1.42
Error	176	11595.4	134.8	PM370	0.4348	0.1494	2.91
Total	179	13903.7	F: 5.71	PM1001	0.2219	0.1233	1.80
R2 = 16.6 %	R2 ajustada = 13.7 %	S = 11.6117	PM7080	0.0405	0.1299	0.31	
DENSIDAD							
Factor	3	0.00047121	0.00015707	Constante	0.4488	0.1277	3.51
Error	176	0.00336439	0.00003912	PM370	0.3093	0.1070	2.89
Total	179	0.00383560	F: 4.01	PM1001	0.0774	0.1073	0.72
R2 = 12.3 %	R2 ajustada = 9.2 %	S = 0.00625467	PM7080	0.0869	0.1073	0.81	
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95 %							

TABLA 8
ESTUDIO R & R DEL SISTEMA DE MEDICIÓN. MÉTODO XBARRA/R

% CONTRIBUCIÓN			DESVIACIÓN ESTÁNDAR		
Fuente	Variación de componente	% variación de componente	DE (Desviación Estándar)	6*DE	% variación de estudio
R & R del sistema de medición total	0.06428	1.44	0.25454	1.5220	17.64
Repetibilidad	0.03628	1.38	0.24004	1.49030	17.42
Reproducibilidad	0.00157	0.06	0.05189	0.26030	3.58
Parte a parte	2.59178	98.56	1.61168	10.61006	97.77
Variación total	2.62965	100	1.63162	10.72871	100
Número de categorías distintas = 3					

TABLA 9
ANÁLISIS DE VARIANZA FINAL: PORCENTAJE DE SÓLIDOS, VISCOSIDAD Y DENSIDAD

PORCENTAJE DE SÓLIDOS							
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Producto	Tamaño de muestra	Media	Desviación estándar
Factor	3	1.051	0.350	PVC2000	180	35.108	0.400
Error	176	56.825	0.160	PM370	180	34.967	0.423
Total	179	57.876	F: 2.19	PM1001	180	34.996	0.405
R2 = 1.82 %	R2 ajustada = 0.99 %	Desviación estándar agrupada = 0.400	PM7080	180	34.993	0.368	

TABLA 9 (CONT.)
ANÁLISIS DE VARIANZA FINAL: PORCENTAJE DE SÓLIDOS, VISCOSIDAD Y DENSIDAD

PORCENTAJE DE SÓLIDOS							
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Producto	Tamaño de muestra	Media	Desviación estándar
VISCOSIDAD							
Factor	3	271.5	90.5	PVC2000	180	4303.05	3.79
Error	176	7970.4	22.4	PM370	180	4303.05	4.57
Total	179	8241.9	F: 4.04	PM1001	180	4301.02	5.19
R2 = 2.22 %	R2 ajustada = 1.40 %	Desviación estándar agrupada = 4.73	PM7080	180	4301.79	5.23	
DENSIDAD							
Factor	3	0.0000158	0.0000053	PVC2000	180	0.84917	0.00355
Error	176	0.0044373	0.0000125	PM370	180	0.84941	0.00346
Total	179	0.0044531	F: 0.42	PM1001	180	0.84882	0.00351
R2 = 1.86 %	R2 ajustada = 1.04 %	Desviación estándar agrupada = 0.0035	PM7080	180	0.84916	0.00360	
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95 %							

TABLA 10
CAPACIDAD Y RENDIMIENTO (% EFICIENCIA) DEL PROCESO ANTES Y DESPUÉS DE SEIS SIGMA

CAPACIDAD									
ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
PORCENTAJE DE SÓLIDOS									
Producto	LIE	LSE	Media	Desviación estándar (sigma)	6 sigma	CP	Zi	Zs	PCK
PVC2000	34.50	35.84	35.17	0.74	4.46	0.30	-0.90	0.90	No aceptable
PM370	34.35	35.54	34.94	0.68	4.06	0.29	-0.88	0.88	No aceptable
PM1001	34.31	35.50	34.91	0.65	3.89	0.31	-0.92	0.92	No aceptable
PM7080	34.36	35.55	34.95	0.68	4.09	0.29	-0.87	0.87	No aceptable
VISCOSIDAD									
PVC2000	4288.95	4313.45	4301.20	12.50	75.00	0.33	-0.98	0.98	No aceptable
PM370	4295.06	4312.14	4303.60	8.80	52.80	0.32	-0.97	0.97	No aceptable
PM1001	4290.11	4311.89	4301.00	11.00	66.00	0.33	-0.99	0.99	No aceptable
PM7080	4289.60	4308.60	4299.10	10.00	60.00	0.32	-0.95	0.95	No aceptable
DENSIDAD									
PVC2000	0.84	0.86	0.85	0.01	0.04	0.31	-0.94	0.94	No aceptable
PM370	0.84	0.85	0.85	0.01	0.04	0.28	-0.85	0.85	No aceptable
PM1001	0.84	0.85	0.85	0.01	0.04	0.28	-0.84	0.84	No aceptable
PM7080	0.84	0.86	0.85	0.01	0.04	0.32	-0.95	0.95	No aceptable
DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
PORCENTAJE DE SÓLIDOS									
PVC2000	34.55	35.67	35.11	0.40	2.40	0.47	-1.40	1.40	Aceptable
PM370	34.37	35.56	34.97	0.42	2.54	0.47	-1.40	1.40	Aceptable
PM1001	34.45	35.55	35.00	0.41	2.43	0.45	-1.36	1.36	Aceptable
PM7080	34.49	35.50	34.99	0.37	2.21	0.46	-1.38	1.38	Aceptable

TABLA 10 (CONT.)
CAPACIDAD Y RENDIMIENTO (% EFICIENCIA) DEL PROCESO ANTES Y DESPUÉS DE SEIS SIGMA

DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
VISCOSIDAD									
PVC2000	4297.55	4308.55	4303.05	3.79	22.74	0.48	1.45	1.45	Aceptable
PM370	4296.24	4309.86	4303.05	4.57	27.42	0.50	-1.49	1.49	Aceptable
PM1001	4294.01	4308.03	4301.02	5.19	31.14	0.45	-1.35	1.35	Aceptable
PM7080	4294.21	4309.37	4301.79	5.23	31.38	0.48	-1.45	1.45	Aceptable
DENSIDAD									
PVC2000	0.84	0.85	0.85	0.00	0.02	0.44	-1.33	1.33	Aceptable
PM370	0.84	0.85	0.85	0.00	0.02	0.44	-1.31	1.31	Aceptable
PM1001	0.84	0.85	0.85	0.00	0.02	0.49	-1.46	1.46	Aceptable
PM7080	0.84	0.85	0.85	0.00	0.02	0.49	-1.47	1.47	Aceptable
RENDIMIENTO									
ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
PROPIEDAD	PORCENTAJE DE SÓLIDOS		VISCOSIDAD		DENSIDAD				
Producto	Datos incorrectos	Eficiencia (%)	Datos incorrectos	Eficiencia (%)	Datos incorrectos	Eficiencia (%)			
PVC2000	112	62.10	122	67.62	117	64.86			
PM370	109	60.72	120	66.93	106	58.65			
PM1001	114	63.48	123	68.31	104	57.96			
PM7080	108	60.03	118	65.55	118	65.55			
Promedio	111	61.58	121	67.10	111	61.76			
DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS									
PROPIEDAD	PORCENTAJE DE SÓLIDOS		VISCOSIDAD		DENSIDAD				
Producto	Datos incorrectos	Eficiencia (%)	Datos incorrectos	Eficiencia (%)	Datos incorrectos	Eficiencia (%)			
PVC2000	167	92.89	162	90.21	149	82.74			
PM370	157	87.10	167	92.70	147	81.50			
PM1001	152	84.61	151	83.99	163	90.83			
PM7080	155	85.85	162	90.21	165	91.45			
Promedio	158	87.61	161	89.28	156	86.63			

Los resultados de la [Tabla 9](#) confirman la reducción significativa en la desviación estándar de las tres propiedades analizadas. Por lo tanto, las nuevas distribuciones ajustadas del proceso productivo permiten hacer inferencias estadísticamente representativas para un nivel de significancia del 95 %. En consecuencia, las funciones de densidad de probabilidad de las tres propiedades correspondientes denotan un nuevo ajuste lineal con mayor robusticidad, sujeto a los citados parámetros, para los cuatro tipos de adhesivos de calzado bajo estudio.

FASE 5: CONTROLAR

En resumen, después de definir el problema y las variables críticas, medir las capacidades del proceso, analizar

la información e identificar la causa raíz y mejorar de forma significativa el desempeño mostrado, fue necesario controlar y sostener la nueva proporción de defectos en el mediano y largo plazo, con el objeto de asegurar su nuevo comportamiento. Ante ello, la implementación tanto de las 5S y la filosofía Kaizen como del plan de control (alrededor de la toma correcta de muestra) posibilitaron la mejora continua mediante la elaboración de las gráficas de control (histogramas y gráficas de dispersión), al delimitar un esquema de seguimiento de mejoras sobre el grado de variabilidad en las propiedades analizadas.

De mantenerse los citados valores se tendría certidumbre sobre las contribuciones específicas realizadas al

proceso, pero en caso contrario, habría que reiniciar el método DMAIC de acuerdo con la lógica de mejora continua tipo Kaizen para regresar el proceso productivo a los citados parámetros adecuados (identificados y estimados de manera previa) y, posteriormente, verificar su cumplimiento de forma continua, constante e indefinida. Además, al repetir el ciclo anterior, se contribuye a enriquecer el control estadístico del proceso.

Así las cosas, en la [Tabla 10](#) se observa que, de forma general, en los tres casos el proceso transita de niveles inferiores a 2 sigmas a métricas cercanas a las 3 sigmas, especialmente en lo referente a la viscosidad y la densidad, cuyas respectivas desviaciones estándar se contraen en promedio alrededor de 50 % para los cuatro adhesivos bajo estudio. A su vez, en la citada tabla se evidencia cómo la gran mayoría de las estimaciones para las citadas tres propiedades presentes en los adhesivos del calzado examinados se encuentran dentro de los parámetros de control, lo cual implica una nueva métrica sigma cercana a 3 en promedio para, prácticamente, todos los casos analizados.

Así, al eliminar la variabilidad se especifican los nuevos límites de control para cada parte del proceso, el cual mejoró en las recuperaciones aun cuando se trabajó en los valores medios. En promedio, su eficiencia general transita del rango de 57 a 68 % hasta los márgenes de 81 a 92 % para los cuatro adhesivos analizados y, en consecuencia, la capacidad real del proceso se traduce en cifras superiores a uno en todos los casos ([Tabla 10](#) y Ecuación (2)). Finalmente, el cabal seguimiento de las mejoras implementadas a través del control estadístico de la operación permite cumplir con el plan de calidad tipo Kaizen.

En este escenario, los resultados se encuentran en línea con lo obtenido en ^{[11], [42]}, donde se exponen estudios de repetibilidad y reproducibilidad en el sector manufacturero, de acuerdo con el diseño experimental correspondiente, además del uso de la metodología DMAIC, y se logró reducir la variabilidad promedio en más de una cuarta y dos terceras partes, respectivamente.

A su vez, los resultados también se sitúan en la línea de ^{[32], [33]}, donde se mejoró la eficiencia en la capacidad de sus respectivas líneas manufactureras de producción al aplicar la metodología DMAIC – Seis Sigma, y se efficientizó el proceso en más de tres y dos cuartas partes, respectivamente. Ambos enfoques inciden sobre la

satisfacción de la demanda y la utilización eficiente de los recursos disponibles, ya que los índices de capacidad del proceso mejoran de forma general al reducirse significativamente los errores cometidos por el personal.

En la misma línea, los resultados en ^[41] respecto a las mejoras en la productividad del sistema manufacturero coinciden con los reportados por el presente trabajo, mismos que se sitúan alrededor de 25 % de mejoría en cuanto a la eficiencia general del proceso se refiere. Si bien en aplicaciones manufactureras, en ^[35] se han señalado métricas sigmas cercanas a 3 como aceptables, lo cual se repite en el presente estudio, otros trabajos ^{[34], [25]} señalan la necesidad de mejorar dicha métrica como mínimo a 4.5 para sostener dichos beneficios en el tiempo, así como no dejar de lado la vulnerabilidad de la propiedad elegida para medir la calidad.

RELEVANCIA DE SEIS SIGMA EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

Si bien la manufactura ligera y pesada ^[55] (debido al grado de intensidad de los sucesivos procesos productivos de transformación de materia prima involucrados) se encuentra relacionada con la industria química en mayor o menor grado como ofertante o demandante de insumos y/o productos intermedios o finales. En términos estrictos, el núcleo de la industria química se sitúa al interior del subsector denominado fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón, industria química, industria del plástico y del hule, de acuerdo con el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) ^[55].⁷

En dicha industria, ante los reducidos márgenes de utilidad debido a la creciente competencia, la rentabilidad de los productos de química fina ^[56] (industria farmacéutica y cosmética, fabricación de pigmentos, colorantes, llantas, plásticos térmicos, resinas y adhesivos, entre otras) ha provocado un interés constante en los procesos discontinuos como resultado de los volúmenes de producción comparativamente reducidos y la maximización de la rentabilidad de las inversiones a través de la elaboración consecutiva o simultánea de diversos pro-

⁷ Dicho subsector se integra por diez ramas de actividad económica: 1) fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón; 2) productos químicos básicos; 3) resinas y hules sintéticos, y fibras químicas; 4) fertilizantes, pesticidas y otros agroquímicos; 5) productos farmacéuticos; 6) pinturas, recubrimientos y adhesivos; 7) jabones, limpiadores y preparaciones de tocador; 8) otros productos químicos; 9) productos de plástico; y 10) productos de hule ^[55].

ductos, al flexibilizar las líneas de producción y reducir el ciclo de vida del diseño de los productos ^[46].

Así, al introducir etapas discontinuas durante los procesos de reacción, mezcla y separación, entre otros, e intercalarlas entre etapas continuas de fácil control (movimiento de materiales, calentamientos o enfriamientos, etc.), se incrementa la versatilidad de las plantas multiproducto, herramienta de gran relevancia tanto en situaciones económicas de incertidumbre sobre la demanda como para eficientizar la atención al cliente sin descuidar la calidad del producto ^[46].

En virtud de lo anterior, las plantas discontinuas pertenecientes a la industria de química fina, como es el caso de la fabricación de adhesivos y acabados para la piel (pigmentos y resinas), se encuentran en línea con la generación de productos con alto valor añadido y uso intensivo del factor tecnológico, baja demanda, procesos de síntesis complicados y/o líneas de producción flexibles, que son condiciones presentes dentro (industria farmacéutica y petroquímica) y fuera (industria alimentaria y de las bebidas e industria textil y de la madera) del ámbito de la industria química en general ^[46].

Bajo dicho escenario, el conjunto de herramientas estadísticas empleadas en la Manufactura Delgada y Seis Sigma se concibe como un instrumento funcional para la optimización de los procesos de producción en términos de su simplicidad, versatilidad y rendimiento, especialmente, en el caso de las plantas multiproducto con procesos discontinuos correspondientes a la industria de química fina. De acuerdo con ^[56], al involucrar etapas de extracción, síntesis y purificación, además de utilizar subproductos no deseados de otras actividades económicas y permitir la integración vertical de su producción dado el bajo coeficiente de importaciones de su materia prima, dichas industrias se consolidan como demandantes de insumos intermedios de origen local, lo cual refuerza sus encadenamientos productivos hacia atrás al interior del tejido productivo y, consecuentemente, estimula el desarrollo de proveedurías locales que determinan el tamaño tanto de los establecimientos como de la industria de química fina con estándares de calidad.

En estas circunstancias, el potencial de los márgenes de utilidad presentes en estas actividades se incrementa al reducir sus costos de producción e incrementar sus rendimientos mediante la implementación de las

citadas herramientas estadísticas pertenecientes a la Manufactura Delgada. Si bien cada proceso químico de carácter industrial tiene sus particularidades, principalmente en función de las características de la materia prima, la tipología, magnitud y seriación de los procesos fisicoquímicos empleados y las especificaciones de los productos finales, existe una oferta de insumos locales escasamente procesados para ser industrializados, especialmente en países abundantes en recursos minerales, así como una derrama de conocimiento acumulado (de libre acceso) respecto a la producción y demanda del producto, componentes necesarios para impulsar su gestión productiva y comercial ^[56].

En el caso de México, las actividades económicas correspondientes a la fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón, industrias química, del plástico y del hule, representan el 3.19 % de la economía nacional (Producto Interno Bruto), mismas que han vuelto a incrementar su presencia en el territorio durante el último lustro de manera constante (a partir de un valor de 2.94 % en 2018), y han sostenido una tasa media de crecimiento promedio de la producción de 5.04 % durante los últimos tres años de información oficial (2020-2022), lo cual sitúa al sector en una dinámica de recuperación económica pospandemia superior a la de la economía nacional (3.08 %) ^[57].

En el caso de las MIPYME manufactureras de corte químico, en países con dichas características, en donde, como se mencionó de forma previa, Seis Sigma reduce la variabilidad del producto final, especialmente en los procesos discontinuos de la industria química fina, cabe reiterar lo reportado en ^[35] para Colombia, donde se mejoró el rendimiento y la calidad en la fabricación de garrafas en la empresa Colfoplas mediante la implementación de estrategias Lean Seis Sigma, entre ellas el seguimiento de métricas mediante cartas de control y un tablero de indicadores (*dashboard*, por su anglicismo) y se impulsó la estandarización del proceso y su métrica operacional. Particularmente, además de generar diagramas de SIPOC, Pareto e Ishikawa y aplicar el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP, por sus siglas en inglés) a través de la metodología 5S y la creación de formatos para la recopilación de frecuencias de anomalías, estimaron indicadores acerca del grado de calidad de los productos elaborados y la disponibilidad y el rendimiento de los equipos con el objeto de estimar la Efectividad General del Equipo (OEE, por sus siglas en inglés), factor clave junto con el error humano de muestreo y ma-

nejo de los insumos de producción que incide sobre la capacidad estadística de los procesos.

Por ejemplo, en Cuba ^[42] se aplicó la metodología Seis Sigma durante la hidrogenación discontinua de diésel en la industria petroquímica, con la finalidad de examinar los estudios de R & R de la medida (porcentaje de azufre) a partir del diseño experimental. Además, se determinó el coeficiente de variación presente en los ensayos y el número de categorías o frecuencias de anomalías distintas, distinguidas de manera confiable por el sistema de medición. Una vez implementados los ajustes correspondientes por la empresa reportados en la primera corrida, se realizó un segundo ciclo cuya variabilidad fue menor en más de dos terceras partes.

En Ecuador, en ^[58] se presentaron los resultados de mejora en la productividad de la fabricación del alga espirulina, a partir del empleo de Seis Sigma en los procesos productivos con biorreactores. Además de identificar variables físicas y químicas que influyen directamente en la productividad y probar y escalar distintos medios de cultivo para su producción industrial, se controló la incorporación de carbono a través de la regulación del potencial de hidrógeno (pH) y se lograron mejoras en la productividad cercanas al 66 % sin comprometer los márgenes de calidad del producto final.

Finalmente, en ^[11] se menciona que, si bien existen diferentes herramientas para la optimización de la calidad en los sistemas de producción, Lean Seis Sigma ha centrado la atención en los últimos años por la eficiencia y la magnitud de sus resultados y, en este sentido, la industria química mexicana no es la excepción. Así, se orientó el enfoque hacia la fabricación de paneles modulares para la construcción con el propósito de reducir los desperdicios y se identificaron tanto las variables críticas como las mejores herramientas para optimizar y controlar el proceso, incrementando la confiabilidad de este (de 81 a 98 %) con los estudios de R&R y las mejoras aplicadas y estableciendo nuevos parámetros para las principales frecuencias de anomalías a través del uso de programas de simulación en el diseño de experimentos, los cuales reducen en dos terceras partes la incidencia de defectos medida en DPMO.

IV. CONCLUSIONES

Ante la creciente escalada de economías abiertas y libre mercado, las corporaciones deben continuar el im-

pulso constante de sus estándares de calidad debido al aumento de la competencia a consecuencia de la deslocalización de los factores de producción. La estrategia Seis Sigma incluye el uso de herramientas estadísticas dentro de una metodología estructurada incrementando el conocimiento necesario para lograr de una mejor manera, más rápido y al más bajo costo, productos y servicios más competitivos. La metodología Seis Sigma involucra una medida, para determinar el grado en que los diferentes procesos alcanzan sus metas, además de ofrecer una gran variedad de estrategias para realizar las mejoras correspondientes.

Aunque cada empresa tiene sus necesidades particulares, la metodología Seis Sigma se puede adaptar a cualquier tipo de organización y en este trabajo se aborda su aplicación general en una industria manufacturera mexicana, como es el caso de la manufactura de adhesivos y calzados para la piel, con la finalidad de impactar en la calidad de los productos elaborados, mismo que resalta además por su carácter pionero en este tipo específico de actividad económica, de acuerdo con la amplia revisión de la literatura. Además de mostrar con claridad y detalle la secuencia de pasos específicos a seguir para la implementación de este tipo de herramientas de calidad sobre los procesos productivos, el número de pruebas y análisis realizados mediante el seguimiento de las distintas fases de la metodología Seis Sigma permite el control estadístico de los citados procesos bajo estudio y su optimización, así como el incremento simultáneo de la eficiencia y la calidad de los productos manufacturados por la empresa. En consecuencia, se otorga un mejor servicio al cliente mismo que se traduce en beneficios económicos para la firma.

Entre las principales ventajas que tiene esta metodología se encuentran las siguientes: contiene una serie de pasos generales para llevar a cabo la implementación en cualquier tipo de empresa, las herramientas que la conforman pueden ser utilizadas por usuarios de diferentes disciplinas y niveles dentro de la organización y representa un desafío para las empresas que lo llevan a cabo, ya que la meta es alcanzar un nivel de variación mínimo.

Si bien la metodología Seis Sigma contribuye a mejorar la variabilidad en las tres propiedades fisicoquímicas analizadas (porcentaje de sólidos, viscosidad y densidad), los resultados demuestran la certera identificación de la causa raíz del problema, ya que el proceso transita de niveles inferiores a 1.5 sigma a parámetros cercanos a los 3 sig-

ma. En otras palabras, el núcleo del proceso productivo muestra a grandes rasgos un rendimiento adecuado con un porcentaje de defectos aceptable para todos los casos.

No obstante, es necesario realizar un análisis con mayor profundidad tanto en aquellos productos en donde sus propiedades analizadas no alcanzan el nivel de 3 sigma, como en las demás causas raíz del proceso que impiden su acercamiento aun mayor al nivel de 3.4 defectos por millón o Seis Sigma. De acuerdo con la revisión de literatura, en este escenario se vislumbra el uso de herramientas pertenecientes a la simulación de procesos, así como el empleo de técnicas multicriterio, para optimizar aún más, de manera respectiva, el rendimiento del proceso y la toma de decisiones sobre el control estadístico del mismo en el largo plazo, con la finalidad de eficientizar los recursos disponibles y su impacto sobre la calidad de los productos finales elaborados por la firma.

REFERENCIAS

- [1] M. Dubé-Santana, F. Hevia-Lanier, E. Michelena-Fernández, D. Suárez-Ordaz y O. Puerto-Díaz, "Procedimiento de mejora de la cadena inversa utilizando metodología seis sigma", *Ing. Ind.*, vol. 38, n.º 3, pp. 247-256, 2017.
- [2] M. A. Langle, "El Aparato Productivo de Tamaulipas y sus Regiones: Especialización y Encadenamientos", en *Desarrollo Regional y Capital Humano: Estudios de Caso*, M. A. Langle, coord., 1.ª ed., Ciudad de México: Analéctica, 2022, cap. 1, sec. 1, pp. 1-35.
- [3] D. Díaz-Sanchidrian, V. Figueroa-Fernández, J. A. Jiménez-García y S. Hernández-González, "Lean Six Sigma Logistics en una Línea de Producción Tradicional", *Pistas Educativas*, vol. 44, pp. 331-342, 2023.
- [4] O. Celis-Gracia, J. García-Alcaraz y F. Estrada-Orantes, "Metodología basada en Lean Six Sigma para incrementar el nivel sigma de procesos de manufactura", *Mem. Cientif. y Tecnol.*, vol. 2, n.º 1, 2023, pp. 37-39.
- [5] R. C. Garza-Ríos, C. N. González-Sánchez, E. L. Rodríguez-González y C. M. Hernández-Asco, "Aplicación de la metodología DMAIC de Seis Sigma con simulación discreta y técnicas multicriterio", *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 22, pp. 19-35, 2016.
- [6] E. Guilherme-Satolo, L. de Souza-Hiraga, G. Antiqueira-Goes y W. Luiz-Lourenzani, "Lean production in agribusiness organizations: multiple case studies in a developing country", *Int. J. Lean Six Sigma*, vol. 8, n.º 3, pp. 1-30, 2017, doi: [10.1108/IJLSS-03-2016-0012](https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2016-0012).
- [7] P. Reyes-Aguilar, "Manufactura Delgada (Lean) y Seis Sigma en empresas mexicanas: experiencias y reflexiones", *Contaduría y Administración*, n.º 205, pp. 51-69, 2002.
- [8] R. A. Gómez, P. D. Medina y A. A. Correa, "El Seis Sigma en La Cadena de Suministro", *Entre Ciencia e Ingeniería*, año 6, n.º 12, pp. 36-42, 2012.
- [9] F. Bribiescas-Silva, J. A. Hernández-Gómez, E. R. Poblano-Ojinaga, A. Valles-Chávez y S. A. Noriega-Morales, "Factores Críticos del Éxito de Proyectos Seis Sigma y de Manufactura Esbelta", *RIDE*, vol. 13, n.º 26, pp. 1-31, 2023, doi: [10.23913/ride.v13i26.1497](https://doi.org/10.23913/ride.v13i26.1497).
- [10] J. Gamboa-Cruzado, E. Huaraz-Saldaña, C. Gallegos-Herrera, Á. Hernando-Gómez, A. Hidalgo-Sánchez y M. Aquino-Cruz, "Mejora de procesos y su impacto en la entrega de productos en empresas manufactureras: una exhaustiva revisión sistemática", *Apunt. Univ.*, vol. 13, n.º 2, pp. 1-26, 2023, doi: [10.17162/au.v13i2.1418](https://doi.org/10.17162/au.v13i2.1418).
- [11] A. V. Marín-Calderón, M. Valenzuela-Galván, G. Cuamea-Cruz y A. Brau-Ávila, "Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para disminuir desperdicios en una unidad de fabricación de paneles modulares de poliuretano", *Ing. Invest. y Tecnol.*, vol. 34, n.º 1, pp. 1-12, 2023, doi: [10.22201/i.25940732e.2023.24.1.007](https://doi.org/10.22201/i.25940732e.2023.24.1.007).
- [12] Asociación Española para la Calidad. "Seis Sigma Black Belt". AEC.es. Accedido: dic. 15, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.aec.es/formacion/catalogo-cursos/seis-sigma-black-belt/>
- [13] A. K. Soto-Aviles, M. F. Piña-Quintero, M. R. Ortiz-Posadas, "Innovación del Proceso de Dispensación de un Servicio de Farmacia Aplicando la Metodología Seis Sigma", en *Memorias del 44º Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*, 2022, pp. 275-278.
- [14] E. J. Delahoz-Domínguez, T. J. Fontalvo y O. M. Fontalvo, "Evaluación de la calidad del servicio por medio de seis sigma en un centro de atención documental en una universidad", *Formación Universitaria*, vol. 13, n.º 2, pp. 93-102, 2020, doi: [10.4067/S0718-50062020000200093](https://doi.org/10.4067/S0718-50062020000200093).

- [15] A. Mexicano-Santoyo, M. E. Hernández-Hinojosa, J. C. Carmona Frausto, S. Cervantes-Álvarez y P. N. Montes-Dorantes, “Mejora de procesos de laboratorio de mecánica de suelos aplicando herramientas de manufactura esbelta”, *RIDE. Rev. Iberoam. Investig. Desarro. Educ.*, vol. 14, n.º 27, pp. 1-33, 2023, doi: [10.23913/ride.v14i27.1641](https://doi.org/10.23913/ride.v14i27.1641).
- [16] M. Vergel-Ortega y J. J. Martínez-Lozano, “Filosofía gerencial seis sigma en la gestión universitaria”, *FACE*, vol. 15, n.º 2, pp. 99-106, 2015.
- [17] L. Martínez-Hernández, M. C. Martínez-Orencio, R. Rosales-Barrales, V. U. Velasco-Pérez, P. de Aquino-López y V. Jiménez-Franco, “Aplicación de seis sigma en una empresa de mantenimiento industrial para reducir el número de licitaciones incorrectas”, *S. F. J. of Dev.*, vol. 3, n.º 2, pp. 2826-2837, 2022, doi: [10.46932/sfjdv3n2-097](https://doi.org/10.46932/sfjdv3n2-097).
- [18] Z. Enciso-Acuña, “Mejora del cumplimiento de fechas programadas en servicios de calibración aplicando Seis Sigma”, *Industrial Data*, vol. 23, n.º 1, pp. 143-164, 2020, doi: [10.15381/idata.v23i1.16666](https://doi.org/10.15381/idata.v23i1.16666).
- [19] E. Delahoz-Domínguez, R. Zuluaga-Ortiz, A. Periñan-Luna y S. Mendoza-Brand, “Un enfoque de Seis Sigma para evaluar la calidad de la educación superior en Colombia”, *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 33, pp. 386-407, 2022, doi: [10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5313](https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.5313).
- [20] L. E. Vargas-Ortiz, M. S. Carrillo-Landazabal, M. I. Narváez-Escorcia, J. C. Vitola-Cabarcas y C. A. Severiche-Sierra, “Reducción de cancelaciones de cirugías programadas en IPS a través de la metodología DMAIC de Lean Six Sigma”, *Ingenierías USBMEd*, vol. 14, n.º 2, pp. 23-32, 2023, doi: [10.21500/20275846.5819](https://doi.org/10.21500/20275846.5819).
- [21] Y. S. Ochoa-Corona, I. Ruiz-Arroyo, U. Martínez-Rodríguez y O. F. Ramos-Ochoa, “Disminución del tiempo de respuesta vía telefónica a clientes y distribuidores de empresa desarrolladora de software para equipos de medición aplicando la metodología Seis Sigma”, *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo*, vol. 1, n.º 9, pp. 91-96, 2023.
- [22] R. Pérez-Campdesuñer, G. García-Vidal, A. Sánchez-Rodríguez y I. E. Campdesuñer-Almaguer, “La satisfacción de clientes en el sector turístico: metodología seis sigma”, *Ciencias Holguín*, vol. 24, n.º 1, pp. 1-14, 2018.
- [23] W. A. Lino-Villacreses, L. A. Lino-Villacreses y J. H. Guaman-Guanca, “Lean Seis-Sigma y su importancia en la mejora continua de la calidad en el laboratorio clínico”, *Multidisciplinary Health Educ. J.*, vol. 5, n.º 3, pp. 571-581, 2023.
- [24] M. Moro-Agud, M. A. González-Fernández, F. Moreno-Ramos, I. Jiménez-Nácher, M. de Sebastián-Rueda y A. Herrero-Ambrosio, “Aplicación de Lean Seis Sigma en la mejora de la calidad del proceso de atención farmacéutica a pacientes externos”, *Revista de la OFIL*, vol. 26, n.º 2, pp. 87-93, 2016.
- [25] S. M. Carchio, A. C. Cappella, C. Goedelmann, M. Pandolfo y D. Bustos, “Aplicación de Seis Sigma en el Laboratorio Clínico”, *Acta Bioquím Clín Latinoam*, vol. 53, n.º 4, pp. 525-537, 2019.
- [26] B. A. Esparza, F. Ricárdez e I. E. Garduño, “Reducción de defectos en una de línea de montaje de arneses eléctricos automotrices aplicando manufactura esbelta”, *AvaCient*, vol. 2, n.º 2, pp. 24-39, 2023.
- [27] R. G. González, S. J. León, C. G. Ortega y D. B. Parra, “Método de mejora para incrementar la productividad en la industria maquiladora del vestido en base a la herramienta PHVA, DMAIC, Lean y Six sigma”, *LATAM*, vol. 4, n.º 1, pp. 2181-2202, 2023, doi: [10.56712/latam.v4i1.407](https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.407).
- [28] J. Varela-Pérez, A. G. López-Ortega, A. Franco-Camargo y B. Y. García-Morales, “Aplicación de la metodología DMAIC para mejorar el proceso de fabricación de reguladores en la industria automotriz”, *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, n.º 1, pp. 3885-3902, 2023, doi: [10.37811/cl_rcm.v7i1.4699](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4699).
- [29] G. Vázquez-Silva, L. A. Rodríguez-Picón y R. Romero-López, “Implementación de metodología Seis Sigma para la solución de bolas de soldadura en tablillas electrónicas”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 19, n.º 3, pp. 41-54, 2022, doi: [10.20983/culcyt.2022.3.2.4](https://doi.org/10.20983/culcyt.2022.3.2.4).
- [30] J. Tolamatl-Michcol, D. Gallardo-García, J. A. Varela-Loyola y E. Flores-Ávila, “Aplicación de Seis Sigma en una Microempresa del Ramo Automotriz”, *Conciencia Tecnológica*, n.º 42, pp. 11-18, 2011.
- [31] S. Ramos-Lara, “Optimización del Análisis de Falla de Tarjetas Electrónicas con Seis Sigma”, *Conciencia Tecnológica*, n.º 57, pp. 1-24, 2019.

- [32] E. Pérez-López y M. García-Cerdas, “Implementación de la metodología DMAIC-Seis Sigma en el envasado de licores en Fanal”, *TM*, vol. 27, n.º 3, pp. 88-106, 2014.
- [33] N. Caicedo-Solano, “Aplicación de un programa seis sigma para la mejora de calidad en una empresa de confecciones”, *Prospect*, vol. 9, n.º 2, pp. 65-74, 2011.
- [34] R. M. Carrera, “Mejoramiento del proceso de producción de losas alveolares bajo metodología Lean Six Sigma en la empresa pública cementera EPCE”, *Novasinerгия*, vol. 2, n.º 2, pp. 94-103, 2019, doi: [10.37135/unach.ns.001.04.10](https://doi.org/10.37135/unach.ns.001.04.10).
- [35] A. J. Chinomey A. D. Torres, “Propuesta para la reducción de desperdicios en el proceso de garrafas en la empresa Colfoplas S.A. utilizando la metodología Lean Seis Sigma”, tesis de licenciatura, Fac. de Ing., Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, 2020.
- [36] R. García-González, J. A. Paredes-Castañeda y E. Bayona-Ibáñez, “DMAIC como herramienta para implementar un sistema de mejora para incrementar la productividad en la industria del sombrero”, *Rev. Ingenio*, vol. 20, n.º 1, pp. 8-15, 2023, doi: [10.22463/2011642X.3371](https://doi.org/10.22463/2011642X.3371).
- [37] J. R. Martínez, E. García y C. E. Carlos, “Efecto de Seis Sigma en el Almacén de una Empresa Manufacturera”, *Conciencia Tecnológica*, n.º 58, pp. 1-19, 2019.
- [38] I. G. Pérez-Vergara y J. A. Rojas-López, “Lean, Seis Sigma y Herramientas Cuantitativas: Una Experiencia Real en el Mejoramiento Productivo de Procesos de la Industria Gráfica en Colombia”, *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 27, pp. 259-284, 2019, doi: [10.46661/revmetodoscuanteconempresa.3218](https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.3218).
- [39] I. Estrada, “Gestión de proyectos distribuidos de introducción de tarjetas electrónicas a la manufactura a través de un sistema de comunicación”, tesis de maestría, Fac. de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, 2016.
- [40] R. E. Roque-Saavedra, “Reducción del producto no conforme en el proceso de manufactura aplicando el ciclo de Deming en una planta textil ubicada en Puente Piedra”, tesis de licenciatura, Fac. de Ing. Ind., Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2023.
- [41] M. J. Rodríguez, “Propuesta de mejora en los procesos de producción de cerveza artesanal”, tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2023.
- [42] A. Barrera-García, A. Cambra-Díaz y J. A. González-González, “Implementación de la metodología seis sigma en la gestión de las mediciones”, *Universidad y Sociedad*, vol. 9, n.º 2, pp. 8-17, 2017.
- [43] A. S. Albayatey, “Critical Success Factors for Applying Six Sigma in Transformative Industries in Iraq”, *Int. J. Prof. Bus. Rev.*, vol. 8, n.º 6, pp. 1-15, 2023, doi: [10.26668/businessreview/2023.v8i6.1917](https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i6.1917).
- [44] D. Montiel, G. E. Anaya y S. B. Ramírez, “Proceso para la toma de decisiones en la fase de definición de la metodología seis sigma”, *Ciencia Latina*, vol. 7, n.º 1, pp. 9121-9136, 2023, doi: [10.37811/cl_rcm.v7i1.5040](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5040).
- [45] R. García, P. Parroquin, R. Romero, R. Molina, I. Canales y A. Garza, “Reducción de costos en pequeñas y medianas empresas con un enfoque Seis Sigma: Revisión de Literatura”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 12, n.º 57, pp. 352-361, 2015.
- [46] A. Espuña, “Contribución al estudio de plantas químicas multiproducto de proceso discontinuo”, tesis de doctorado, Depto. de Ing. Quím., Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1994.
- [47] M. A. Martínez y J. Morales, *Lean Seis Sigma para la mejora de procesos*, Alicante, España: Universitas Miguel Hernández, 2022.
- [48] J. Irurita, “Sistemas de gestión de la calidad”, tesis de licenciatura, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España, 2012.
- [49] M. Bahena y P. Reyes, *Curso de Seis Sigma*, Ciudad de México: Universidad Iberoamericana, 2006.
- [50] J. Turner, *Lean Six Sigma: the Ultimate Beginner's Guide to Learn Lean Six Sigma Step by Step*, Los Ángeles, EUA: Publishing Factory LLC, 2019.
- [51] Editorial Etecé. “Diagrama de Ishikawa”. concepto. de. Accedido: dic. 10, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/diagrama-de-ishikawa/>

- [52] “Ejemplos del diagrama de Pareto - Ejercicios resueltos del análisis de Pareto”. *plandemejora.com*. Accedido: ag. 11, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.plandemejora.com/ejemplos-del-diagrama-de-pareto/>
- [53] J. M. Wooldridge, *Introducción a la Econometría: un Enfoque Moderno*, 4.ª ed. Ciudad de México: Cengage Learning Editores, 2010.
- [54] J. F. Hair Jr., R. P. Bush y D. J. Ortinau, *Marketing Research: In a Digital Information Environment*, Washington, D. C., EUA: McGraw Hill, 2000.
- [55] INEGI, *Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, México 2018, SCIAN México 2018 - Clasificación Industrial Internacional Uniforme Rev. 4*, Aguascalientes, México: INEGI, 2019.
- [56] J. Hernández, *La química fina: las empresas y sus principales características*, Montevideo, Uruguay: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 1991.
- [57] INEGI, “Producto Interno Bruto por Entidad Federativa”, *INEGI.org.mx*. Accedido: ag. 10, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/pibent/2018/>.
- [58] D. Freire, O. Flor y G. Álvarez, “Metodología Seis Sigma en el Incremento de Producción de Spirulina”, *Revista Minerva de Investigación Científica*, vol. 1, n.º 1, pp. 24-31, 2020, doi: [10.47460/minerva.V1i1.3](https://doi.org/10.47460/minerva.V1i1.3).