

Improvement Proposal to Reduce Defects in PET Bottle Blowing Using Lean Six Sigma: Case Study

León Castro, Rocío¹, Barahona Rodríguez, Diego Axel², Barahona Rodríguez, Sebastian Kiev³, Morocho Pérez, María Cristina⁴, Quispe Vara, Lucía Milagros⁵, Huancas Mitma, Carlos⁶.

¹Docente. Ingeniería Industrial. Universidad Privada Del Norte. Perú

²⁻⁶Estudiantes. Ingeniería Industrial. Universidad Privada Del Norte. Perú

Abstract– This study has a pre-experimental design, in which the application of the Lean Six Sigma methodology is proposed for the production process of 2.5L PET bottles in a mineral water and ice company. Through the DMAIC approach, it was identified that the most frequent defects arise in the preform blowing process, representing 55% of the total defects. Various tools were used to analyze the information, such as the SIPOC diagram to map the overall process, the VSM to visualize the production process and potential improvements, the Pareto diagram to identify the priority aspects to address, and the Ishikawa diagram and 5 Whys to analyze the root cause. It was determined that the lack of temperature and humidity control in preform storage is the main cause. As a proposal, it is recommended to install an environmental control system with dehumidifiers and climate control, as well as the implementation of an intelligent temperature control system to improve process efficiency. These actions are estimated to reduce blowing defects by 50%, significantly improving the sigma level from 4.13 to 4.35, and increasing the yield from 99.57% to 99.79%. Additionally, the use of Poka-Yoke sensors is suggested to maintain quality control throughout the process.

Keywords-- Lean six sigma, DMAIC, PET bottles, Process improvement, Defect reduction.

Propuesta de Mejora para Reducir Defectos en el Soplado de Botellas PET Utilizando Lean Six Sigma: Caso de Estudio

León Castro, Rocío del Carmen¹, Barahona Rodríguez, Diego Axel², Barahona Rodríguez, Sebastian Kiev³, Morocho Pérez, María Cristina⁴, Quispe Vara, Lucía Milagros⁵, Huancas Mitma, Carlos⁶.

¹Docente. Ingeniería Industrial. Universidad Privada Del Norte. Perú

²⁻⁶Estudiantes. Ingeniería Industrial. Universidad Privada Del Norte. Perú

Resumen– Este estudio tiene un diseño preexperimental, en el cual se propone la aplicación de la metodología Lean Six Sigma en el proceso de producción de botellas PET de 2.5 L en una empresa de agua mineral y hielo. A través del enfoque DMAIC, se identificó que los defectos más frecuentes se originan en el proceso de soplado de las preformas, representando un 55% de los defectos totales. Se utilizaron diferentes herramientas para el análisis de la información, como el diagrama SIPOC para mapear el proceso general, el VSM para visualizar el proceso productivo y las posibles mejoras, el diagrama de Pareto para identificar los aspectos prioritarios a tratar, y los diagramas de Ishikawa y 5 Whys para analizar la causa raíz, determinándose que la falta de control de temperatura y humedad en el almacenamiento de preformas es la principal causa. Como propuesta, se recomienda la instalación de un sistema de control ambiental con deshumidificadores y climatización, así como la implementación de un sistema inteligente de control de temperatura para mejorar la eficiencia del proceso. Se estima que estas acciones podrían reducir los defectos de soplado en un 50%, mejorando significativamente el nivel sigma, de 4.13 a 4.35, y aumentando de 99.57% a 99.79%. Además, se sugiere el uso de sensores para mantener el control de calidad en el proceso.

Palabras clave-- Lean six sigma, DMAIC, Botellas PET, Mejora de procesos, Reducción de defectos.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria del agua embotellada en el mercado peruano ha experimentado un crecimiento significativo, impulsado por varios factores, entre los que destacan el aumento de las temperaturas, el cambio en los hábitos de consumo y una mayor conciencia sobre la salud. El crecimiento del consumo de agua embotellada a nivel global ha sido constante, convirtiéndose en el sector de bebidas de más rápido crecimiento, con una tasa anual proyectada del 10% hasta 2026 [1]. Además, se estima que el consumo mundial de agua embotellada aumentará a 513 mil millones de litros para 2025 [2]. Este aumento en el consumo per cápita ha llevado a que gran parte del agua embotellada se comercialice en envases de PET. Como consecuencia, este crecimiento plantea importantes implicaciones económicas y ambientales, ya que la creciente demanda de envases plásticos genera preocupaciones sobre su impacto ecológico, lo que hace necesario buscar soluciones para reducir los desperdicios [2][3]. Este auge ha favorecido a la industria de bebidas no alcohólicas y fabricación de hielo, que se ha adaptado de manera constante a las nuevas demandas de los consumidores. La evolución de este sector ha sido clave no solo para satisfacer las necesidades de consumo

diario de la población, sino también para abastecer mercados comerciales que requieren productos en grandes volúmenes.

Entonces, al satisfacer tanta demanda, existen probabilidades que el producto sea defectuoso, lo que genera grandes impactos y pérdidas económicas directas hasta el impacto ecológico de recursos desperdiciados. Asimismo, impacta a nivel social, donde la imagen de la empresa se ve dañada por su mala calidad productos e insatisfacción del cliente [4] [5] [6]. En este sentido, la competencia en el sector industrial obliga a las organizaciones a adoptar estrategias eficaces que les permitan no solo superar estos desafíos, sino también mantenerse a la vanguardia en un mercado cada vez más competitivo [7].

En este contexto, la implementación de metodologías como Lean Six Sigma (LSS) cobra gran relevancia, siendo esta una estrategia eficaz de mejora de procesos de negocio. Lean Six Sigma, ha sido ampliamente respaldada por académicos. Lean se enfoca en aumentar la productividad y reducir el desperdicio mediante el uso de la experiencia y el juicio, mientras que Six Sigma busca mejorar la calidad de los productos y procesos mediante un enfoque basado en datos y el análisis estadístico [6][8]. La implementación de metodologías como Lean Six Sigma cobra gran relevancia en este contexto, ya que permite a las fábricas optimizar sus procesos de producción, reducir el desperdicio de recursos y mejorar la calidad. Ambas metodologías, aunque aborden diferentes aspectos, se complementan y apoyan mutuamente, proporcionando un enfoque integral para la mejora continua [9].

El objetivo principal de nuestra investigación es analizar y demostrar cómo se puede aplicar la metodología Lean Six Sigma en la empresa CONSORCIO FRAP S.A.C., con el fin de desarrollar una propuesta de mejora que reduzca el desperdicio de recursos y eleve la calidad de los productos. Para alcanzar este objetivo, se llevará a cabo un análisis detallado basado en la revisión de casos prácticos y estudios de problemas resueltos en empresas similares, lo que permitirá identificar las mejores prácticas y adaptar las soluciones a las necesidades específicas de CONSORCIO FRAP S.A.C. La investigación buscará examinar cómo las herramientas y técnicas de Lean Six Sigma, como el análisis de causa raíz, el mapeo de procesos y la mejora continua que pueden ser implementadas para resolver problemas en la producción.

II. METODOLOGÍA

A. Recopilación y análisis de datos

El presente estudio se llevará a cabo utilizando un enfoque cualitativo y cuantitativo para analizar los efectos de la estrategia lean six sigma (LSS) en la Industria. LSS es una estrategia combinada de mejora de procesos que ha sido ampliamente apoyada por académicos en las últimas dos décadas [10]. Lean optimiza el uso de recursos y produce productos de calidad a un costo eficiente, lo que resulta en ahorros significativos en la fabricación. Al mismo tiempo, Six Sigma gestiona la variabilidad y complejidad de los productos, facilitando la supervisión de los procesos de producción [11]. Entonces, al unir Six Sigma y Lean, se logran resultados más positivos y se optimiza el proceso, haciendo que su adopción sea más rápida y efectiva [12].

Este análisis se centrará en el uso de instrumentos concretos de LSS, para lograr una reducción efectiva de los defectos en los procesos. Es fundamental reconocer y eliminar las actividades que no aportan valor al proceso productivo, además de optimizar aquellas que generan ineficiencias o desperdicios, conocidas como MUDA [13], lo cual puede lograrse mediante metodologías como DMAIC y DMADV. DMAIC se enfoca en la mejora de sistemas existentes, DMADV se utiliza para el diseño y desarrollo de nuevos sistemas [14]. En este caso, se decidió emplear la metodología DMAIC la que se adoptará, dado que la empresa ya cuenta con un sistema existente. Esta metodología se divide en cinco etapas: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar.

Definir: En la fase de definición de la metodología DMAIC, se establecen claramente las oportunidades de mejora y se consolida un proyecto estructurado que detalla el problema, métricas, entregables y planificación, sirviendo como guía para todo el desarrollo del proyecto [15][16].

Medir: La fase de medición implica dos pasos principales, es decir, mapeo del proceso y recopilación de datos para conocer el nivel actual del rendimiento del proceso [15][17].

Analizar: En esta etapa, se examinan los datos recopilados para identificar las causas raíz de los problemas o defectos. El análisis puede incluir herramientas estadísticas y diagramas de causa y efecto (Diagrama de causa-efecto) para entender los factores que afectan el rendimiento del proceso [15][16][18].

Mejorar: En la fase de mejora, se desarrollan, verifican y estandarizan soluciones para eliminar las causas de variación, abarcando soluciones basadas en el diseño, la evaluación de la eficacia de las propuestas y la identificación de riesgos junto con estrategias de mitigación [16][17].

Controlar: En esta fase es crucial monitorear y analizar los resultados antes y después de las mejoras implementadas para asegurar que los avances se mantengan a lo largo del tiempo [15][16].

Según revisión de literatura de [19] acerca de la adopción de Lean Six Sigma con el propósito de analizar la literatura sobre la implementación en organizaciones europeas, elaborada por académicos y profesionales del continente, para obtener conclusiones sobre su adopción en empresas europeas y sugerir futuras investigaciones que promuevan un uso más amplio y eficaz de esta metodología, muestra la cantidad de

publicaciones que se realizaron según el sector de estudio, resaltando el sector de servicios y manufactura, categorizándolas en ocho sectores principales, con un enfoque en servicios y manufactura, que dominan el análisis con 32 y 31 artículos respectivamente, seguidos por los sectores públicos (11 artículos), educación superior (7), construcción (3), comercio minorista (2), agrícola (1) y energético (1). Este predominio del sector servicios revela el creciente interés en la implementación de LSS en esta área, destacando su penetración en las industrias de servicios y manufactura, como se muestra en la Fig. 1.

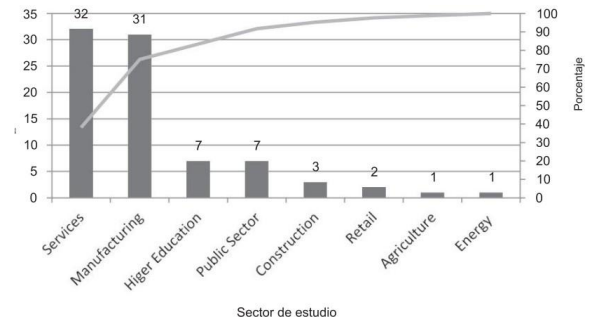


Fig. 1 Diagrama Pareto por categoría elaborado por Panayiotou, 2021.

También se resalta el uso de las herramientas LSS empleadas en estos proyectos, se destacan las siguientes por su frecuencia de uso: análisis crítico de calidad (CTQ) en 13 estudios, voz del cliente (VOC) en 11, diagrama de Pareto en 10, y tanto el diagrama de causa-efecto como SIPOC en 9 artículos cada uno. Otras herramientas comunes incluyen el mapeo de procesos y el mapeo de flujo de valor, utilizados en 8 publicaciones. Estas herramientas forman un marco sólido de apoyo para la implementación de LSS, combinando enfoques cualitativos y cuantitativos que facilitan la obtención de resultados confiables, como se señala en la Fig. 2. Además, el método DMAIC es el enfoque principal en el 92% de los artículos sobre implementación de Lean Six Sigma (LSS). En contraste, el 8% emplea el método DFLSS/DMADV.

Conocer las herramientas de Lean Six Sigma (LSS) más utilizadas nos permitirá identificar aquellas que han demostrado mayor relevancia en estudios previos nos ayudarán a enfocar la investigación en herramientas probadas, optimizando la probabilidad de éxito en la aplicación de nuestra empresa peruana. Es decir, destacar cómo este análisis de popularidad de herramientas respalda la selección de metodologías para optimizar procesos. Además, señalar el uso de las herramientas más comunes nos permite una comparación más directa con

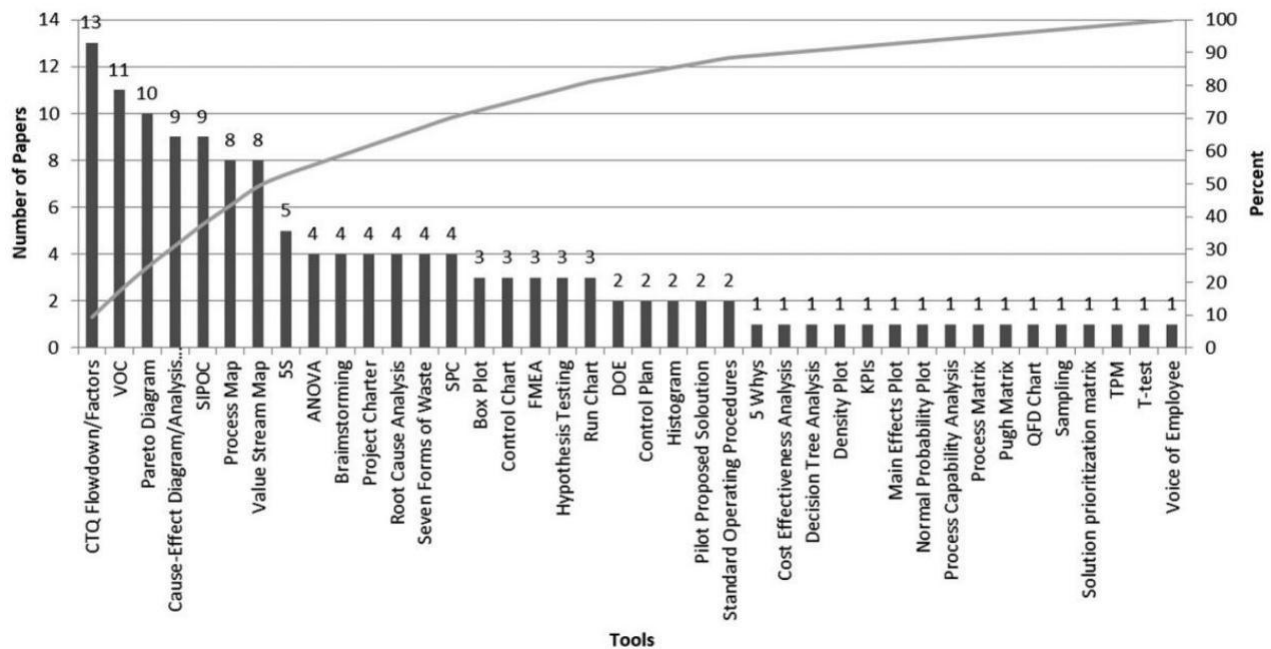


Fig. 2 Diagrama Pareto del número total de artículos recolectados elaborado por Panayiotou, 2021.

estudios previos, fortaleciendo la validez de tus resultados y su aplicabilidad en escenarios similares.

En la investigación, uno de los principales retos ha sido la falta de acceso directo a la retroalimentación o a las expectativas explícitas de los clientes. Dado que el enfoque de este estudio se centra en una propuesta para la mejora y reducción de desperdicios, no se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la Voz del Cliente (VOC). Por este motivo, no se incluyen los CTQ (Características Críticas para la Calidad), ya que la atención estuvo puesta principalmente en los aspectos operativos y los procesos internos que impactan directamente en el producto final y en la percepción del cliente. Cabe señalar que tanto los CTQ como el VOC serían elementos clave para un análisis posterior, una vez que se cuente con datos más específicos, lo que permitiría una evaluación más detallada de las expectativas del cliente y de las especificaciones de calidad del producto.

En nuestro presente trabajo, usaremos herramientas conocidas como el Value Stream Mapping (VSM), que es utilizada para identificar y eliminar desperdicios en los procesos de producción con el propósito principal de visualizar todo el proceso productivo, desde las materias primas hasta el producto final, con el fin de detectar ineficiencias y cuellos de botella [20][21]. Esta herramienta ha sido utilizada, por ejemplo, por [22]. Al aplicar un mapa de flujo de valor en el área de empaque, identificó un cuello de botella que acumulaba 11.6 días de trabajo en proceso; mediante la eliminación de esta restricción, logró reducir en un 84 % el retraso acumulado y mejorar en un 11% la disponibilidad de la línea.

El diagrama de Pareto, que es una técnica estadística que permite identificar las acciones o procesos más relevantes que contribuyen en gran medida a los resultados obtenidos, y los datos analizados se representan en barras dispuestas en orden

ascendente o descendente utilizando Excel [8][17], como en el trabajo de [23], en el que usó el diagrama para la identificación de parámetros críticos para el desperdicio de capacidad en un contexto medioambiental en el que detalló el tiempo de manejo de materiales de diferentes talleres/secciones e indicó que las áreas de ensamblaje y el taller de mecanizado eran las que más influían en la gestión ineficiente de materiales y en el desperdicio de capacidad dentro de la organización.

El diagrama causa-efecto Ishikawa, tiene forma de espina de pescado y muestra gráficamente la relación entre los efectos y sus posibles causas y permite identificar visualmente las causas y subcausas de un problema organizándolas en categorías clave como máquina mano de obra método material y entorno con el fin de analizar y resolver el efecto estudiado en un proceso [24].

Por último, usaremos el diagrama de SIPOC, que es una herramienta que proporciona información esencial sobre los elementos clave de los procesos de producción incluyendo proveedores entradas procesos resultados y clientes y facilita la comprensión de los insumos y productos en cada etapa [25]. Usado en el trabajo de [26] para captar la voz del cliente, facilitar la visualización y el mapeo del proceso completo en industrias de fabricación de prendas de vestir.

Para determinar en qué etapas de nuestro proceso DMAIC aplicaremos las herramientas correspondientes, nos basaremos en la organización propuesta por autores. Esta clasificación puede representarse de manera clara mediante un diagrama de flujo, que ilustra cómo las herramientas se distribuyen a lo largo de las distintas etapas, en nuestra Fig. 3 se observa nuestra elaboración en base a los autores.

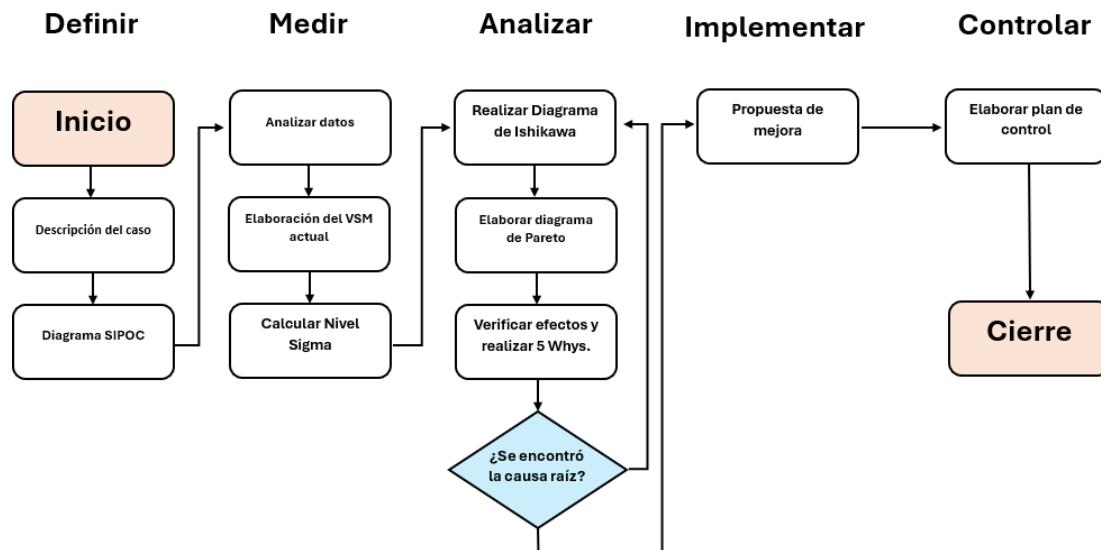


Fig. 3 Diagrama DMAIC utilizando el modelo de Widiwati y Jimenez Delgado

III. RESULTADOS

A. Fase definir

La empresa de producción de agua mineral y hielo cuenta con cinco líneas de productos: botellas PET de 2.5 L empaquetadas en grupos de 6, botellas de 625 ml empaquetadas en presentaciones de 15 y 6, botellas de 1 L en grupos de 6 y 12, cajas de 20 L, bidones de 7 L y bolsas de hielo de 3 kg. De acuerdo con esto, elegiremos la línea que más defectos tenga. Nos centraremos en la línea PET de botellas de 2.5 L, ya que posee una línea de procesos más larga y se cuentan con más datos disponibles. Para entender los elementos de cada proceso, utilizaremos el diagrama SIPOC. En la Fig. 4 se detallan las principales etapas del proceso de fabricación de botella de agua de 2.5 L y las interrelaciones con otros proveedores y clientes. Mediante el diagrama SIPOC se identificaron los pasos que no aportan valor dentro del proceso y que impactan en los tiempos de entrega al cliente y en la calidad de los productos.

B. Fase Medir

Recopilamos datos de la empresa para elaborar el Mapa de Flujo de Valor (VSM), consideramos información clave de proveedores, clientes y órdenes de compra, además de los tiempos de ciclo. En cada etapa del proceso de embotellado de agua de 2.5 L, registramos el tiempo mediante cronometraje, así como la cantidad de personas involucradas en cada proceso y el tiempo necesario para realizar el cambio de actividades. También tomamos en cuenta la jornada laboral, que incluye dos turnos de 11 y 8 horas, y la demanda diaria en cada turno, como se muestra en la Fig. 5. Todo esto con el fin de calcular el tiempo necesario para producir una unidad vendible, conocido como Takt Time, como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1
Cálculo del Takt Time

Datos		
Turno 1	7 am - 6pm (11 horas)	
Turno 2	11 pm - 7am (8 horas)	
Tiempo de almuerzo	1 hora	
Tiempo de arranque	1 hora	
Días laborales por mes	26 días	
Demanda mensual	848640 botellas	
Producción durante el Turno 1	19200 botellas	
Producción durante el Turno 2	13440 botellas	
Cálculo del tiempo disponible		
Turno 1	11 horas - 1 hora almuerzo - 1 hora arranque = 9 horas	
Turno 2 (8 horas)	8 horas	
Total en horas	17 horas por día	
Total en segundos	61200 segundos por día	
Cálculo del Takt Time		
Tiempo disponible	61200 segundos por día	
Demanda diaria	848640 botellas mensuales / 26 días laborales = 32640 botellas por día	
Takt Time	Tiempo disponible / Demanda diaria = 1.88 segundos por botella	

De acuerdo con el análisis de Mapeo de la Cadena de Valor (VSM), Fig. 5, la demanda diaria de botellas de 2.5 L es de 32,640 unidades, lo cual establece un Takt Time de 1.875 segundos por botella. Diariamente, se reciben 42,432 preformas de los proveedores. Esta cantidad supera la demanda diaria, ya que es necesario mantener un inventario de seguridad. El lead time es de 4.2 días (equivalente a 362,880 segundos). Esto representa el tiempo promedio que tarda un producto o pedido en completar todas las etapas del proceso, desde la recepción de la orden hasta la entrega final al cliente. Este valor permite alinear la producción con la demanda, mientras que el tiempo de valor agregado es de 67 segundos, evidenciando la eficiencia en el proceso. Cada una de las etapas cuenta con un operario, pero en los procesos de termoencogido, secado y codificado, solo se requiere la supervisión de colaboradores, ya que estos pasos están automatizados. Además, el análisis VSM indica que los defectos se concentran en las etapas de soplado, que presenta un 9% de defectos, y envasado, con un 5%, lo cual sugiere áreas críticas de mejora en el flujo de producción. Cabe destacar que el tiempo de ciclo es por botella y es un proceso continuo, por lo que el tiempo en cada proceso automático es relativamente menor en comparación a los otros que requieren de operarios. Además, el tiempo de ciclo del proceso de

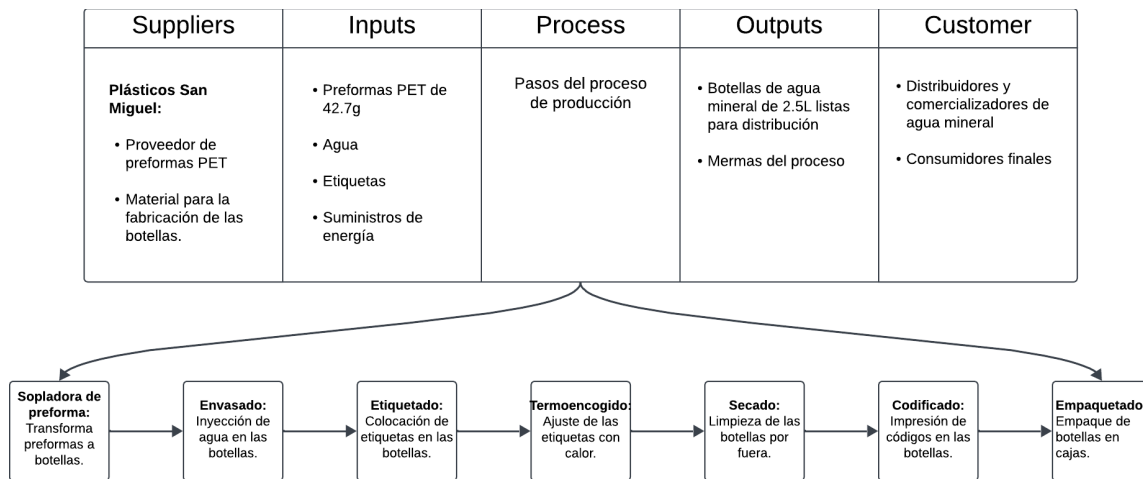


Fig. 4 Diagrama SIPOC de los procesos

soplado es particularmente alto debido al peso de la preforma, que es de 42.7 gramos; sin embargo, este valor puede variar en función del tipo de preforma utilizada, lo que a su vez impacta en la velocidad y precisión de esta fase.

C. Fase Analizar

Para el diagrama de Pareto, nos centramos en hacer una investigación de los defectos que ocurren en las categorías en la producción de la botella de 2.5 L, los eventos mensuales y el porcentaje acumulativo de cada una. Recopilamos datos en base a ello, anotando la cantidad de desperdicios que existe. En la Fig. 6, se explica que existe una gran cantidad de defectos de soplado. Se calculó que los defectos de soplado son responsables del 55% de los defectos (11880 botellas), seguido por el tapado incorrecto con un 20% (4320 botellas). La mayoría de los defectos se originan en la deformación en el soplado, lo cual indica que las acciones de mejora deben concentrarse en ese punto. En base a esto analizamos las posibles causas utilizando el diagrama de Ishikawa o diagrama de causa y efecto.

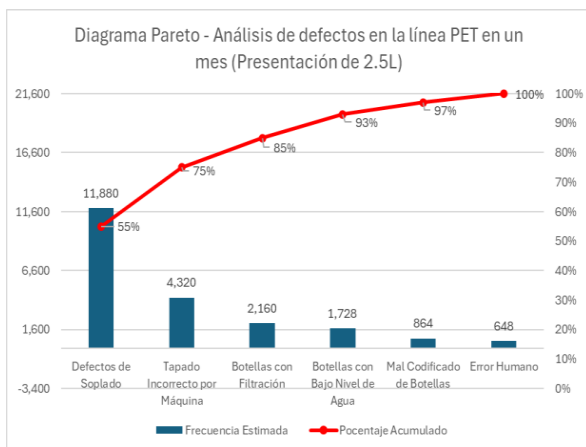


Fig. 6 Diagrama Pareto de los defectos en la línea PET

Para calcular el nivel sigma actual en el proceso de producción de botellas de 2.5L, primero identificamos 6 áreas de oportunidad de mejora, de acuerdo con el diagrama de Pareto. Estas áreas representan los distintos puntos donde es posible que se presenten defectos en el proceso de producción.

Mensualmente, se producen 848,540 botellas, generando un total de 5,091,840 oportunidades de defecto en estas unidades. Utilizando la cantidad de unidades defectuosas del mes, calculamos el DPO (Defectos por Oportunidad), que resultó en un valor de 0.00424208. Multiplicando este valor por un millón, obtuvimos el DPMO (Defectos por Millón de Oportunidades), que es de 4,242.08 defectos. A partir de estos valores, también calculamos el yield, que refleja un porcentaje de éxito en el proceso y alcanzó el 99.57%. Con estos resultados, determinamos un nivel sigma de 4.13. Todos los cálculos se realizaron utilizando los datos analizados previamente y herramientas de Excel como se ve en la Tabla 2.

TABLA 2
Cálculo del DPMO y nivel sigma

Variable	Valor
Defectos	21600
Unidades Producidas	848640
Oportunidades por Unidad	6
Oportunidades Totales	5091840
DPO	0.00424208
DPMO	4242.0815
Yield	0.99575792
Nivel Sigma	4.13

A partir del diagrama de Pareto, identificamos que el proceso con mayor incidencia de defectos es el de soplado. Para entender mejor las causas de estos defectos y encontrar áreas de mejora, realizamos un diagrama de Ishikawa (o Causa-Efecto). Este análisis nos ayuda a desglosar y visualizar los factores específicos que están contribuyendo a los problemas en el proceso de soplado, de manera que podamos enfocarnos en los puntos clave para mejorar la calidad y eficiencia en esta etapa de producción.

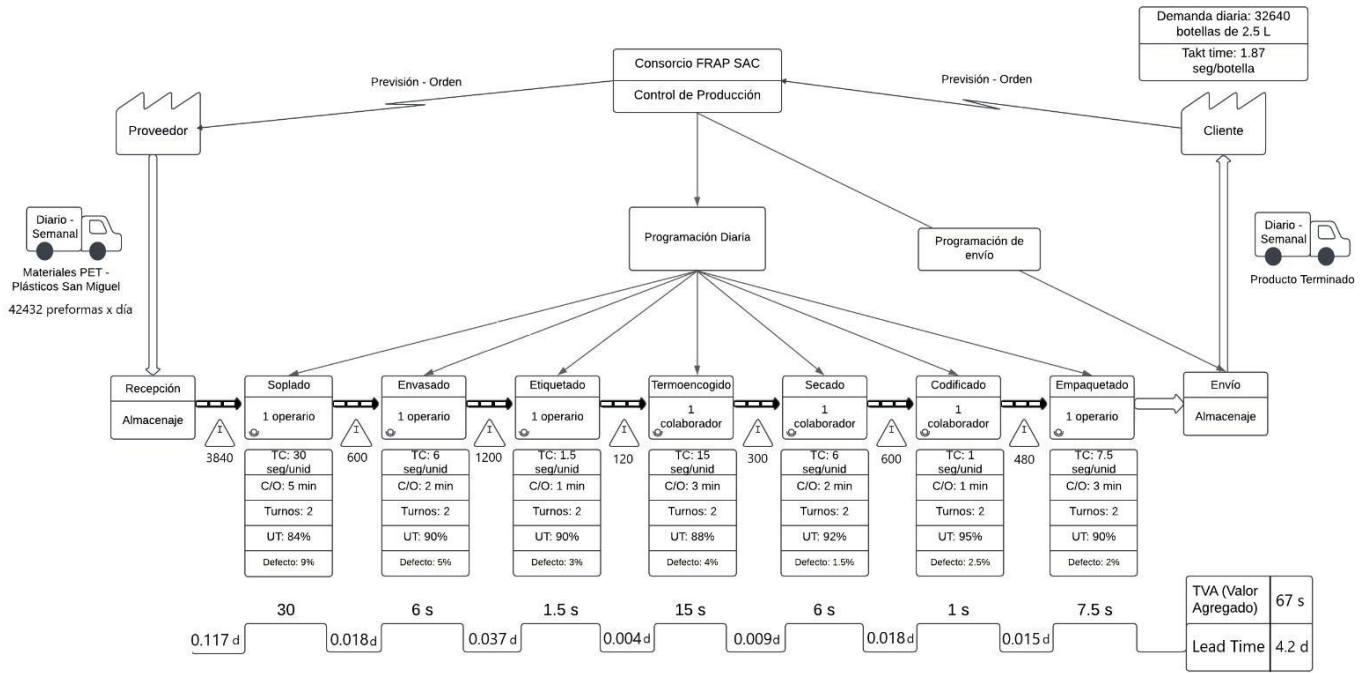


Fig. 5 gráfico de VSM actual

Según el análisis de la Fig. 7, sugiere que las deformaciones en las botellas del proceso de soplado pueden ser el resultado de múltiples factores, desde el desgaste y mantenimiento de la maquinaria hasta problemas con la calidad de los materiales y las condiciones ambientales. Cada una de estas causas puede ser abordada a través de mejoras en mantenimiento, capacitación y control de calidad, así como de la estandarización de los métodos operativos y un monitoreo ambiental adecuado.

Con una vista general de todos los defectos que pueden darse en el soplado, implementaremos la herramienta 5W que es comúnmente utilizada para identificar la causa fundamental del fracaso. Esta herramienta depende principalmente de entrevistas a técnicos y observaciones directas [27], por lo que es conveniente para nuestra investigación. Entonces, con esta metodología señalaremos cuál es el elemento crítico y fundamental para el desarrollo de una propuesta de mejora como se muestra en la Tabla 3.

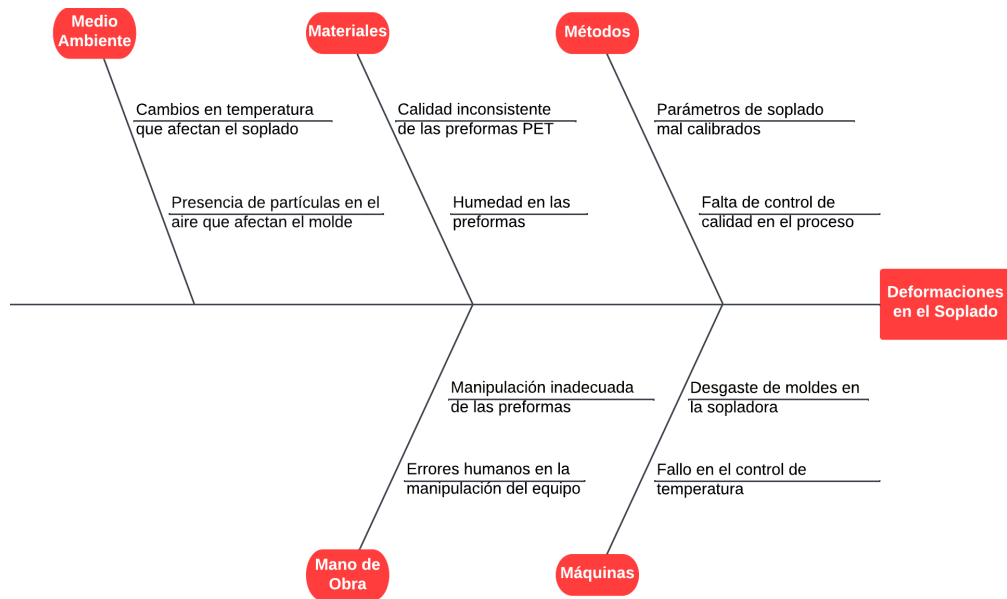


Fig. 7 Diagrama Ishikawa de los defectos en el soplado

El análisis de causa raíz comenzará con la definición del problema. Luego, se aplicarán 5 porqués para identificar la causa raíz. Una vez encontrada, se propondrá una acción correctiva que aborde la fuente del problema y prevenga su recurrencia.

TABLA 3
Metodología de los 5 porqués aplicado a deformación de soplado.

Análisis de Causa Raíz				
Causa principal				
<p>Definición del problema: En el proceso de soplado, se presentan deformaciones en los productos terminados, lo cual afecta la calidad y provoca rechazo de piezas. Estas deformaciones reducen la eficiencia del proceso y aumentan el desperdicio de material, impactando negativamente en los costos y en la satisfacción del cliente.</p>				
¿Por qué ocurre la deformación en el soplado?	¿Por qué las preformas PET tienen una calidad inconsistente?	¿Por qué hay humedad en las preformas?	¿Porque no se almacenan en condiciones óptimas?	¿Porque el área de almacenamiento no cuenta con control adecuado de temperatura y humedad?
Porque las preformas PET tienen una calidad inconsistente.	Porque hay humedad en las preformas.	Porque no se almacenan en condiciones óptimas antes del proceso de soplado.	Porque el área de almacenamiento no cuenta con control adecuado de temperatura y humedad.	Porque no se ha implementado un sistema de control ambiental en el almacén, posiblemente por falta de presupuesto o planificación.
<p>Causa raíz identificada: La falta de un sistema de control de temperatura y humedad en el área de almacenamiento provoca la acumulación de humedad en las preformas, lo que afecta su calidad y causa deformaciones durante el soplado.</p>				
<p>Acción correctiva: Proponer un sistema de control ambiental en el almacenamiento de preformas con deshumidificadores y climatización para regular temperatura y humedad. Monitorear en tiempo real con sensores, capacitar al personal en manejo adecuado y establecer mantenimiento preventivo, asegurando condiciones óptimas para reducir defectos en el proceso de soplado.</p>				

Se abarcó la parte de materiales y máquinas, debido a que son usualmente causas directas de defectos en la fabricación de botellas PET. Las preguntas elaboradas parten de una definición general del problema y mediante las respuestas, determinamos la causa específica. Esta causa raíz fue la falta de un sistema de control de temperatura y humedad en el área de almacenamiento.

D. Fase Mejorar

Ya identificada la causa fundamental mediante 5 por qué, se debe proponer un sistema de control ambiental en el almacenamiento de preformas con deshumidificadores y climatización para regular temperatura y humedad, además de monitorear en tiempo real con sensores, capacitar al personal en manejo adecuado y establecer mantenimiento preventivo para asegurar condiciones óptimas para reducir defectos en el proceso de soplado.

- Instalación de un sistema de climatización Integrado:

Se recomienda utilizar equipos de deshumidificación y climatización que mantengan condiciones ambientales óptimas, regulando la temperatura y humedad en el almacenamiento de preformas. Este enfoque es crucial para prevenir problemas de cristalinidad y microcavitación, como los señalados por [28], quienes destacaron que un manejo adecuado de las condiciones térmicas reduce defectos estructurales en el proceso de soplado.

- Implementación de control inteligente:

Se debe desarrollar un sistema inteligente de control de temperatura para máquinas de soplado estirado de PET para disminuir los desperdicios y mejorar la eficiencia del proceso como en la investigación de [29], que uso un aprendizaje profundo para ajustar automáticamente los parámetros de calentamiento en tiempo real. Su sistema mantuvo la temperatura de las preformas dentro de un rango de ± 2 °C respecto al objetivo, lo que redujo significativamente defectos como deformaciones y problemas de cristalinidad.

Con estas propuestas, se espera una reducción de al menos el 50% en la frecuencia de deformaciones en las botellas, lo que aumentará la calidad del producto y reducirá las pérdidas de producción. Los operarios estarán capacitados para ajustar los parámetros de manera óptima y detectar defectos con mayor precisión.

Dado que antes de la mejora teníamos un total estimado de 21,600 defectos mensuales en la producción de botellas, supondremos que la implementación de la metodología 5W y el control de parámetros ha logrado reducir los defectos en un 50%. Con los defectos reducidos a la mitad, tendríamos 10800 defectos mensuales y, usando los datos descritos anteriormente, calculamos el DPO (Defectos por Oportunidad), que resultará en un valor de 0.00212104. Multiplicando este valor por un millón, se obtendrá 2121.040 defectos, que vendría a ser el DPMO. El yield se elevaría de 99.57% a 99.79%. Con estos resultados obtendríamos un nivel sigma de 4.35. Este nuevo nivel Sigma de 4.35 indica una mejora significativa en la calidad del proceso de soplado de botellas PET tras la implementación de la metodología 5W. Esta mejora sitúa el proceso en un nivel más alto de calidad, reduciendo considerablemente los defectos y aproximándose al objetivo de 4.5 Sigma, ideal para manufactura de alto rendimiento.

E. Fase Controlar

En esta fase es necesario el uso de la herramienta Poka-Yoke para monitorear y prevenir automáticamente desviaciones en los parámetros críticos de temperatura y presión. Esto mediante sensores Poka-Yoke, lo cual ha demostrado eficacia en la manufactura de perfiles de aluminio y componentes de automoción.

La instalación de sensores que monitoreen en tiempo real las variables de temperatura y presión, activando alarmas en caso de desviaciones. Estos dispositivos permiten corregir parámetros antes de que se generen lotes defectuosos, siguiendo la metodología aplicada por [30].

La implementación de Poka-Yoke y auditorías continuas permite mantener el control de calidad a largo plazo, asegurando que las mejoras implementadas en la fase de mejora se mantengan efectivas y que no se presenten nuevos defectos.

IV. CONCLUSIONES

Para cumplir con el objetivo, se utilizaron herramientas Lean Six Sigma en cada fase y se aplicó el enfoque DMAIC para identificar la causa raíz de los defectos. Se determinó que la mayoría de los defectos ocurrían en el proceso de soplado de las preformas, lo que dio lugar a la creación de un plan de

mejora. La implementación de esta metodología fue de gran utilidad y contribuyó tanto a la comprensión teórica como a la aplicación práctica. Esta investigación podría ayudar a la empresa a conocer mejor su cultura laboral y fomentar la participación de los empleados en los esfuerzos para reducir los defectos en dicho proceso.

A. Limitaciones del Estudio:

- Aplicación limitada al proceso de soplado:

La investigación se centró únicamente en el proceso de soplado para botellas PET de 2.5L, limitando la generalización de las soluciones propuestas a otras líneas de producción o procesos.

- Falta de validación práctica:

Aunque las propuestas están fundamentadas en literatura científica y metodologías probadas, no se realizaron pruebas piloto en el entorno de la empresa, lo que genera incertidumbre sobre el impacto real en condiciones específicas.

- Datos históricos limitados:

La ausencia de datos históricos más amplios sobre defectos y parámetros del proceso en la empresa restringió la precisión del análisis y la estimación de mejoras potenciales. Esto puede influir en los resultados proyectados del nivel sigma y la reducción de DPMO.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Esta investigación ha sido realizada en la Universidad Privada del Norte – Sede Chorrillos, contando con el valioso asesoramiento de la Ing. Rocío Del Carmen León Castro De Quispe a quien expresamos nuestro profundo agradecimiento por su dedicación y apoyo durante el desarrollo de nuestro trabajo y a la empresa CONSORCIO FRAP S.A.C. por habernos brindado la oportunidad de ingresar a sus instalaciones y facilitarnos la información necesaria para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCES

[1] Y. Parag, E. Elimelech, and T. Opher, “Bottled Water: An Evidence-Based Overview of Economic Viability, Environmental Impact, and Social Equity,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 12, 2023, doi: 10.3390/su15129760.

[2] H. Aslani, P. Pashmtab, A. Shaghghi, A. Mohammadpoorasl, H. Taghipour, and M. Zarei, “Tendencies towards bottled drinking water consumption: Challenges ahead of polyethylene terephthalate (PET) waste management,” *Health Promot Perspect*, vol. 11, no. 1, pp. 60–68, 2021, doi: 10.34172/hpp.2021.09.

[3] I. Gambino et al., “Pet-bottled water consumption in view of a circular economy: The case study of Salento (South Italy),” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 19, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/su12197988.

[4] F. Psarommatis, J. Sousa, J. P. Mendonça, and D. Kiritsis, “Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0: a position paper,” *Int J Prod Res*, vol. 60, no. 1, pp. 73–91, 2022, doi: 10.1080/00207543.2021.1987551.

[5] D. Powell, M. C. Magnanini, M. Colledani, and O. Myklebust, “Advancing zero defect manufacturing: A state-of-the-art perspective and future research directions,” *Comput Ind*, vol. 136, 2022, doi: 10.1016/j.compind.2021.103596.

[6] N. Abbes, N. Sejri, J. Xu, and M. Cheikhrouhou, “New Lean Six Sigma readiness assessment model using fuzzy logic: Case study within clothing

industry,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 11, pp. 9079–9094, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.02.047.

[7] F. E. Achibat, A. Lebkiri, E. M. Aouane, H. Lougraimzi, N. Berrid, and A. Maqboul, “ANALYSIS OF THE IMPACT OF SIX SIGMA AND LEAN MANUFACTURING ON THE PERFORMANCE OF COMPANIES,” *Management Systems in Production Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 191–196, 2023, doi: 10.2478/mspe-2023-0020.

[8] A. Adeodu, M. G. Kanakana-Katumba, and M. Rendani, “Implementation of lean six sigma for production process optimization in a paper production company,” *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 14, no. 3, pp. 661–680, 2021, doi: 10.3926/jiem.3479.

[9] L. B. M. Costa, M. Godinho Filho, L. D. Fredendall, and G. M. Devós Ganga, “Lean six sigma in the food industry: Construct development and measurement validation,” *Int J Prod Econ*, vol. 231, p. 107843, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.IJPE.2020.107843.

[10] T. Pongboonchai-Empl, J. Antony, J. A. Garza-Reyes, T. Komkowski, and G. L. Tortorella, “Integration of Industry 4.0 technologies into Lean Six Sigma DMAIC: a systematic review,” *Production Planning and Control*, vol. 35, no. 12, pp. 1403–1428, 2024, doi: 10.1080/09537287.2023.2188496.

[11] T.-A. Tran, K. Luu-Nhan, R. Ghabour, and M. Daroczi, “The use of Lean Six-Sigma tools in the improvement of a manufacturing company – Case study,” *Production Engineering Archives*, vol. 26, no. 1, pp. 30–35, 2020, doi: 10.30657/pea.2020.26.07.

[12] J. E. Ortiz-Porras, A. M. Bancovich-Erquínigo, T. C. Candia-Chávez, L. M. Huayanay-Palma, R. K. Moore-Torres, and O. R. T. Gomez, “Green Lean Six Sigma Model for Waste Reduction of Raw Material in a Nectar Manufacturing Company of Lima, Peru,” *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 16, no. 2, pp. 169–185, 2023, doi: 10.3926/jiem.4916.

[13] G. Jiménez-Delgado et al., *Implementation of Lean Six Sigma to Improve the Quality and Productivity in Textile Sector: A Case Study*, vol. 14028 LNCS. 2023. doi: 10.1007/978-3-031-35741-1_30.

[14] I. T. B. Widiwati, S. D. Liman, and F. Nurprihatin, “The implementation of Lean Six Sigma approach to minimize waste at a food manufacturing industry,” *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, 2024, doi: 10.1016/j.jer.2024.01.022.

[15] H. F. Jimenez, A. H. Zuñiga, C. A. Londoño, J. R. Rativa, and M. R. Cortes, “Aplicación de Seis Sigma para la Reducción de Defectos en la Fabricación de Muebles de Madera en una PYME,” *Dirección y Organización*, no. 81, 2023, doi: 10.37610/dyo.v0i81.652.

[16] C. N. Wang, T. D. Nguyen, T. T. Thi Nguyen, and N. H. Do, “The performance analysis using Six Sigma DMAIC and integrated MCDM approach: A case study for micro lens process in Vietnam,” *Journal of Engineering Research*, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.JER.2024.04.013.

[17] A. Mittal, P. Gupta, V. Kumar, A. Al Owad, S. Mahlawat, and S. Singh, “The performance improvement analysis using Six Sigma DMAIC methodology: A case study on Indian manufacturing company,” *Heliyon*, vol. 9, no. 3, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14625.

[18] Z. Abd Elnaby, A. Zaher, R. K. Abdel-Magied, and H. I. Elkhoully, “Improving plastic manufacturing processes with the integration of Six Sigma and machine learning techniques: a case study,” *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 41, no. 1, 2024, doi: 10.1080/21681015.2023.2260384.

[19] N. A. Panayiotou and K. E. Stergiou, “A systematic literature review of lean six sigma adoption in European organizations,” *International Journal of Lean Six Sigma*, vol. 12, no. 2, pp. 264–292, 2021, doi: 10.1108/IJLSS-07-2019-0084.

[20] M. M. Shahriar, M. S. Parvez, M. A. Islam, and S. Talapatra, “Implementation of 5S in a plastic bag manufacturing industry: A case study,” *Clean Eng Technol*, vol. 8, 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100488.

[21] A. Batwara, V. Sharma, M. Makkar, and A. Giallanza, “Impact of smart sustainable value stream mapping – Fuzzy PSI decision-making framework,” *Sustainable Futures*, vol. 7, p. 100201, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.SFTR.2024.100201.

[22] B. Byrne, O. McDermott, and J. Noonan, “Applying lean six sigma methodology to a pharmaceutical manufacturing facility: A case study,” *Processes*, vol. 9, no. 3, 2021, doi: 10.3390/pr9030550.

[23] R. Rathi, M. S. Kaswan, J. A. Garza-Reyes, J. Antony, and J. Cross, “Green Lean Six Sigma for improving manufacturing sustainability: Framework development and validation,” *J Clean Prod*, vol. 345, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131130.

- [24]A. Mortada and A. Soulhi, "Improvement of Assembly Line Efficiency by Using Lean Manufacturing Tools and Line Balancing Techniques," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 89–109, 2023, doi: 10.12913/22998624/169257.
- [25]D. M. Utama and M. Abirfatin, "Sustainable Lean Six-sigma: A new framework for improve sustainable manufacturing performance," *Clean Eng Technol*, vol. 17, 2023, doi: 10.1016/j.clet.2023.100700.
- [26]T. B. Dagne, "Productivity Improvement Through Customized Lean and Six Sigma for Garment Manufacturing Industries," *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 9–17, 2023, doi: 10.22094/JOIE.2022.1904036.1763.
- [27]M. A. Amrani, M. Alhomdi, B. Aswaidy M, A. M. Ghaleb, M. Al-Qubati, and M. Shameeri, "Implementing an integrated maintenance management system for monitoring production lines: a case study for biscuit industry," *J Qual Maint Eng*, vol. 28, no. 1, pp. 180–196, 2022, doi: 10.1108/JQME-06-2020-0049.
- [28]P. Wawrzyniak, W. Karaszewski, and A. Rózański, "Effect of rPET Content and Preform Heating/Cooling Conditions in the Stretch Blow Molding Process on Microcavitation and Solid-State Post-Condensation of vPET-rPET Blend: Part I—Research Methodology and Results," *Materials*, vol. 17, no. 21, 2024, doi: 10.3390/ma17215233.
- [29]P.-C. Hsieh, "Intelligent Temperature Control of a Stretch Blow Molding Machine Using Deep Reinforcement Learning," *Processes*, vol. 11, no. 7, 2023, doi: 10.3390/pr11071872.
- [30]H. Araman and Y. Saleh, "A case study on implementing Lean Six Sigma: DMAIC methodology in aluminum profiles extrusion process," *TQM Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 337–365, 2023, doi: 10.1108/TQM-05-2021-0154.