

Aplicación de la metodología Lean seis sigma para la recuperación del PVC en la empresa Conducen SRL alineado al modelo de economía circular

Application of the Lean six sigma methodology for the recovery of PVC in the Conducen SRL company aligned with the circular economy model

Juan Manuel Arias-Araya¹, Jorge Francisco Rovira-Guzmán², Hector Jesus Ramirez-Mora³, Esteban Alberto Cárdenas-Solorzano⁴


Fecha de recepción: 5 de diciembre, 2024


Fecha de aprobación: 11 de marzo, 2025

Arias-Araya, J.M; Rovira-Guzmán, J.F; Ramirez-Mora, H.J; Cárdenas-Solorzano, E.A. Aplicación de la metodología Lean seis sigma para la recuperación del PVC en la empresa Conducen SRL alineado al modelo de economía circular. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 132-156.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7566>


1 Universidad Hispanoamericana. San José, Costa Rica.

 juan.manuel.arias@uhispano.ac.cr


 <https://orcid.org/0009-0009-8221-4275>


2 Universidad Hispanoamericana. San José, Costa Rica.

 jorge.rovira0253@uhispano.ac.cr


 <https://orcid.org/0009-0005-7706-8251>

3 Universidad Hispanoamericana. San José, Costa Rica.

 hector.ramirez@uhispano.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-7720-148X>

4 Universidad Hispanoamericana. San José, Costa Rica.

 esteban.cardenas@uhispano.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0005-7017-4190>



Palabras clave

Lean seis sigma; economía circular; recuperación de PVC; eficiencia operativa; reducción CO₂; gestión de residuos.

Resumen

El estudio presenta la implementación de la metodología Lean Seis Sigma para la recuperación del PVC (Policloruro de Vinilo) generado en el proceso de purgas en la empresa Conducen SRL alineándolo a los principios de la economía circular. Mediante la aplicación estructurada del ciclo DMAIC [1] y herramientas como Ishikawa, “5 porqués”, matriz AMEF y análisis visual, se logró identificar las principales causas del desperdicio y desarrollar un plan de recuperación técnica y organizativa. Como resultado, se alcanzó una recuperación del 92% del material, reduciendo en 23.7% los costos asociados, y evitando la emisión estimada de 4 toneladas métricas de CO₂ anuales. La propuesta demostró ser sostenible, replicable y alineada con prácticas de producción más limpia. El proyecto destaca como ejemplo de mejora continua aplicable en contextos industriales que busquen eficiencia operativa con responsabilidad ambiental.

Keywords

Lean six sigma; circular economy; PVC recovery; operational efficiency; CO₂ reduction; waste management.

Abstract

This study describes the implementation of the Lean Six Sigma methodology to recover purged PVC waste in the company Conducen SRL, aligning the production process with circular economy principles. By applying the DMAIC cycle and tools such as the Ishikawa diagram, “5 Whys”, FMEA, and visual analysis, the main root causes of waste were identified, leading to the development of a structured recovery strategy. As a result, the company achieved a 92% recovery rate, reduced production costs by 23.7%, and avoided an estimated 4 metric tons of annual CO₂ emissions. The solution proved to be sustainable, replicable, and aligned with cleaner production practices. This project serves as a strong example of continuous improvement in industrial settings seeking operational efficiency and environmental responsibility.

Introducción

La creciente demanda del mercado de tubos de PVC en la región latinoamericana combinado con la sostenibilidad han llevado a las empresas a buscar formas innovadoras de reducir el desperdicio y aumentar la eficiencia de sus procesos mediante una lógica de circularidad de sus residuos [2] [3] [4] [5] [6] en sus modelos productivos [7] [8] [9] [10] [11]. Además aprovechan la oportunidad de la apertura de nuevos mercados a nivel local asociados [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]. En este contexto, la empresa Conducen SRL, dedicada a la fabricación de conductores eléctricos enfrenta el desafío de minimizar el material desperdiciado PVC; específicamente en el proceso de extrusión mientras se realiza el cambio del producto (setup). Este reto adquiere mayor relevancia si se considera que el PVC es un material utilizado para fabricar una variedad de productos de plástico, entre los que se incluyen cañerías, revestimientos de alambres y cables y materiales para empaque [19], agregados livianos [20], lonas plásticas [21], tarjetas bancarias [22], cubiertas protectoras para pisos inferiores de automóviles, materiales laminados y en fabricación de fibra [23], entre otros relacionados en los sectores de construcción, transporte, atención sanitaria, deportes y ocio [24].

El presente estudio busca lograr el objetivo mencionado en el párrafo anterior. El cual se justifica no solo por la necesidad de optimizar los recursos sino también por la de promover prácticas más sostenibles dentro de la industria, dado que el PVC tarda en degradarse por su resistencia y durabilidad [5] [25] . Es importante destacar que para lograr la finalidad planteada, esta investigación busca implementar metodologías Lean [26] [27], las cuales han probado a través del tiempo sus múltiples beneficios en procesos tanto de manufactura como de servicios centradas en la eliminación de desperdicios y la mejora continua [28].

Las preguntas clave que guían esta investigación son: ¿Cuál es la magnitud del desperdicio de PVC en el proceso de purgas en Conducen SRL? ¿Qué causas subyacen a este desperdicio? ¿Cómo pueden las herramientas Lean ayudar a mitigar estas causas? Y finalmente, ¿qué impacto tienen las mejoras implementadas en la eficiencia operativa y ambiental de la empresa?

Materiales y métodos

Para abordar las preguntas planteadas en la sección anterior, el estudio utilizó un enfoque mixto que combina métodos cualitativos y cuantitativos. Este enfoque permitió que los resultados obtenidos fueran más precisos y su análisis fuera planteado desde diferentes perspectivas. Con respecto al tipo de investigación abordado, fue descriptivo y aplicativo. Además de incluir un diseño observacional y longitudinal, logrando con ello brindar no solo un seguimiento continuo de los cambios y mejoras implementadas en el tiempo, sino que también permitió verificar y validar los resultados esperados.

En relación con el Diseño y Enfoque se utilizó un diseño observacional para analizar el proceso actual y un enfoque longitudinal para evaluar los cambios a lo largo del tiempo. El enfoque cuantitativo incluyó la recopilación de datos sobre la cantidad de PVC desperdiciado y recuperado, mientras que el enfoque cualitativo se basó en entrevistas y observaciones para identificar las causas del desperdicio. Lo que ha mejorado la comprensión de los efectos de las mejoras implementadas y ha permitido tomar mejores decisiones para futuros cambios.

Para la recolección de los datos: se emplearon varias técnicas para la recolección de datos. En el enfoque cuantitativo, se utilizaron registros de producción para medir la cantidad de PVC desperdiciado antes y después de la implementación de las metodologías Lean. En el enfoque cualitativo, se realizaron entrevistas semiestructuradas con el personal clave y se llevaron a cabo observaciones directas del proceso, en un lapso de tiempos comprendidos entre octubre 2023– marzo 2024.

En lo referente a las consideraciones éticas en el estudio se respetaron las consideraciones éticas al obtener el consentimiento informado de todos los participantes y garantizar la confidencialidad y el uso ético de los datos recolectados. Se establecieron criterios de inclusión basados en la disponibilidad y relevancia del personal para el proceso de purgas, y criterios de exclusión basados en la falta de disponibilidad o interés en participar. Todo esto pone de manifiesto una práctica ética en la investigación.

En cuanto a las actividades ejecutadas durante este proyecto estas fueron basadas en la metodología DMAIC de seis sigma [29] . En el Cuadro 1 se muestra el detalle de las etapas desarrolladas.

Cuadro 1. Metodología de trabajo basada en las etapas del DMAIC de seis sigma.

Etapa	Activades	Herramienta	Descripción	Responsables
Definir “Voz del cliente: Requerimiento de iniciativas que impulsen la reducción desechos”	Definir equipo multidisciplinario para revisar la viabilidad de los proyectos propuestos.	Focus group (lluvia de ideas, multivoto)	Se creó un equipo para lograr determinar las posibles oportunidades de ahorro dentro de la organización.	Gerente del proyecto Gerente de calidad Gerente de producción Country manager
	Fundamentar la definición del proyecto por la organización.	Matriz Pick (impacto / esfuerzo)	Se utilizó esta herramienta para lograr determinar el impacto / esfuerzo de los proyectos vistos en el focus group	Gerente del proyecto Gerente de calidad Gerente de producción Country manager Mejora continua
Medir “Análisis de la información obtenida y determinación de las causas de la problemática”	Recolectar los datos y determinar si hay desviación estadística que provoque un sesgo en la información	Estadística descriptiva (Grafica de barras, etc)	Se realizó un análisis de los datos obtenidos del sistema de reporte de producción.	Gerente del proyecto
Analizar “Definición de los planes de acción para el logro de la mejora”	Realizar el proceso de diagrama de Ishikawa con las diferentes variables del proceso.	Diagrama de Ishikawa	Se aplicó la herramienta lean Ishikawa para que el equipo definiera el enfoque a seguir.	Gerente del proyecto Gerente de calidad Gerente de producción Country manager Mejora continua
	Determinar la causa de No recuperación de la purga de PVC.	“5 porqué” Entrevistas	Se determinó que la organización no contaba con un plan de gestión de residuos de PVC.	Gerente del proyecto

Etapa	Activades	Herramienta	Descripción	Responsables
Implementar “Definir el proceso de implementación de la propuesta de recuperación”	Mediante el ciclo Deming, realizar la planeación del proyecto en las fases del PDCA.	Bechmarking Ciclo Deming ⁵ Stakeholders Analysis AMEF	Se determinaron las fases del proyecto.	Gerente del proyecto
	Crear el cronograma de tareas para la implementación y seguimiento del proyecto.	Cronograma Gantt	Se organizó la planeación del proyecto con el detalle de las tareas	Gerente del proyecto
	Creación de matriz RACI para la definición de Roles y responsabilidades.	Matriz RACI Diagramas de flujo A3 Anova	Se propusieron las responsabilidades y dueños del proceso.	Gerente del proyecto
Controlar “Planear el seguimiento correspondiente”	Definición de roles y responsabilidades de los dueños del proceso definido.	Stakeholders Analysis (Monitoreo de las partes interesadas)	Se definieron los responsables de la ejecución y seguimiento del proyecto.	Gerente del proyecto
	Análisis de riesgo y calificación de nivel de riesgo con sus acciones correctivas.	Matriz AMEF Visual management (Pizarra electrónica): Dashboard	Se determinaron los riesgos identificados en el proceso y su nivel de riesgo.	Gerente del proyecto

Resultados

Con motivo de extender la misma estructura utilizada en la sección anterior y guiar la secuencia lógica de las actividades, se presentan a continuación un resumen de los principales entregables que se produjeron en cada una de las etapas.

Definir

Luego de la definición del equipo de trabajo multidisciplinario liderado por el líder del proyecto. Se enlistaron mediante una lluvia de ideas [30], los posibles proyectos que tuvieran como finalidad un mejoramiento del medio ambiente. Seguidamente, mediante un multivoto [31] y la aplicación de la matriz pick (impacto/ esfuerzo) [32], se logró establecer aquellos proyectos considerados como clave (Figura 1)

5 Esta herramienta se utilizó para estructurar el proceso de mejora continua.

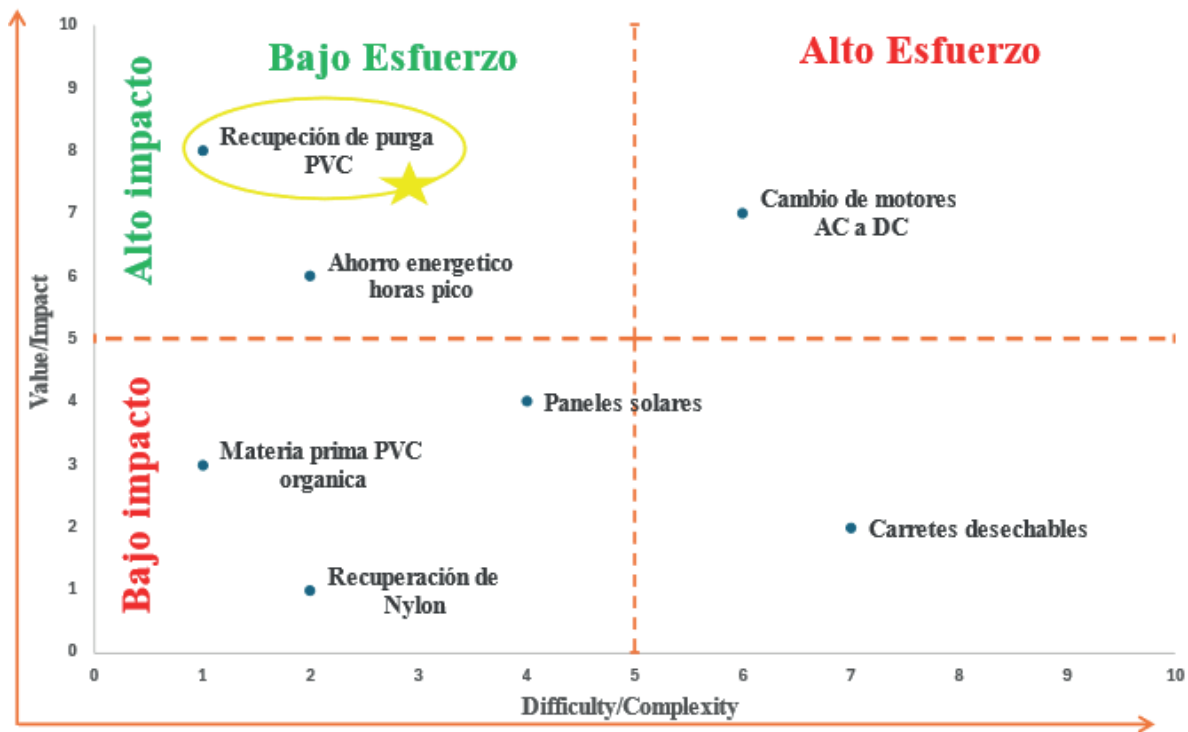


Figura 1. Resultado de la herramienta “Matriz de impacto / esfuerzo”.

En la matriz pick se denota que como equipo se decide abordar los proyectos con alto impacto y bajo esfuerzo el cual está ubicado en el cuadrante superior izquierdo siendo la iniciativa propuesta en este proyecto de investigación un proyecto de rápida implementación y de gran impacto. Finalmente, se consulta a las autoridades de la empresa, Gerencia General y Gerencia de Producción, para la obtención de su aprobación o visto bueno y valorar la asignación de recursos necesarios para el éxito del proyecto.

Medir

Para el cumplimiento de esta etapa se recolectaron datos de los registros de producción registrados en el sistema oficial institucional, MES, Sistema oficial de registro de producción [33] y los sistemas de seguimiento de residuos para recopilar datos sobre la cantidad de residuos de PVC generados y enviados al desecho. Posteriormente, se procedió al procesamiento y tabulación de estos datos utilizando la hoja de cálculo Microsoft Excel; con la finalidad de identificar patrones y/o tendencias y establecer la base o magnitud del problema a resolver (Figura 2)

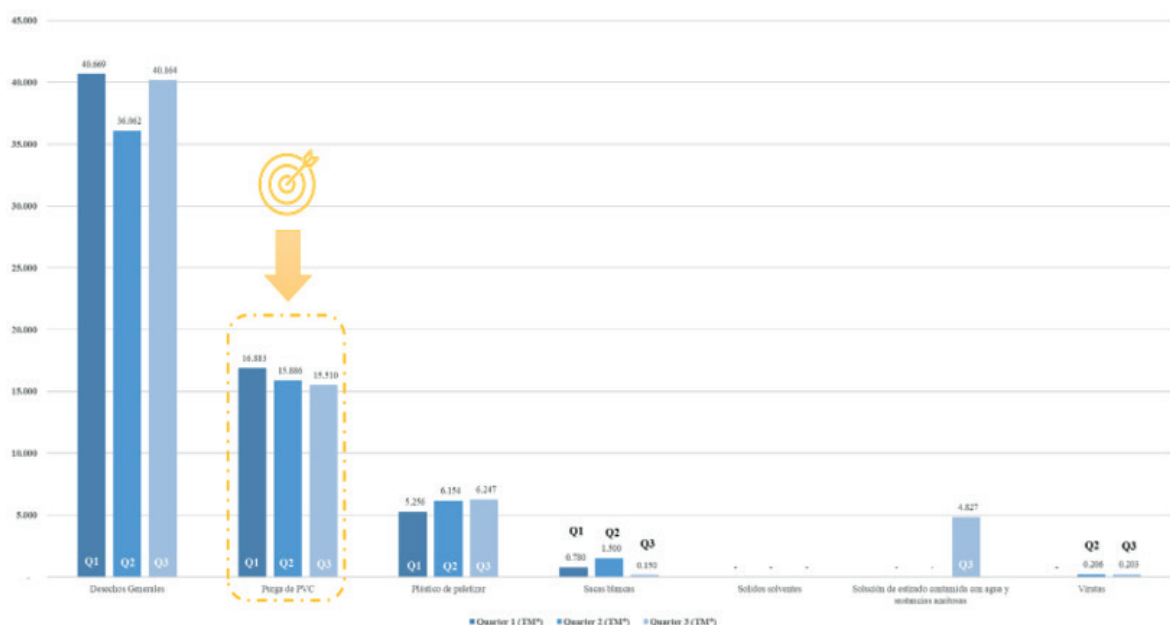


Figura 2. Toneladas métricas – Distribución anual de residuos.

En la Figura 2 se muestra la magnitud y evolución del control de residuos que tiene la organización y evidencia que en promedio por trimestre (Quarter) la organización desecha 16 toneladas métricas. Para un total aproximado al cierre del año de 64 toneladas aproximadamente que estarían en camino al desecho sanitario contaminando el medio ambiente, lo que equivale a 5.3 toneladas métricas mensuales. Cabe destacar que, ante lo anteriormente mencionado, existe un impacto adicional dado que la organización se ve obligada a realizar mayor compra de materia prima virgen lo cual hace que incurra mediante transporte marítimo y terrestre en aproximadamente 1460 kg de CO₂ desde el punto de origen del proveedor al país costarricense. Así mismo, es costo total de la no recuperación del PVC hace que la organización tenga un impacto de 190.106 dólares anuales (Tipo de cambio: 525 colones), los cuales incluyen costos de compras de la materia prima adicional, costos de importación, entre otros.

El tamaño de muestra seleccionada es de 12,652 registros transacciones registradas de desperdicio

Analizar

Con la finalidad de determinar las principales causas que ocasionan el problema planteado en la primera etapa, se realizó un Diagrama Ishikawa [34] (Figura 3)

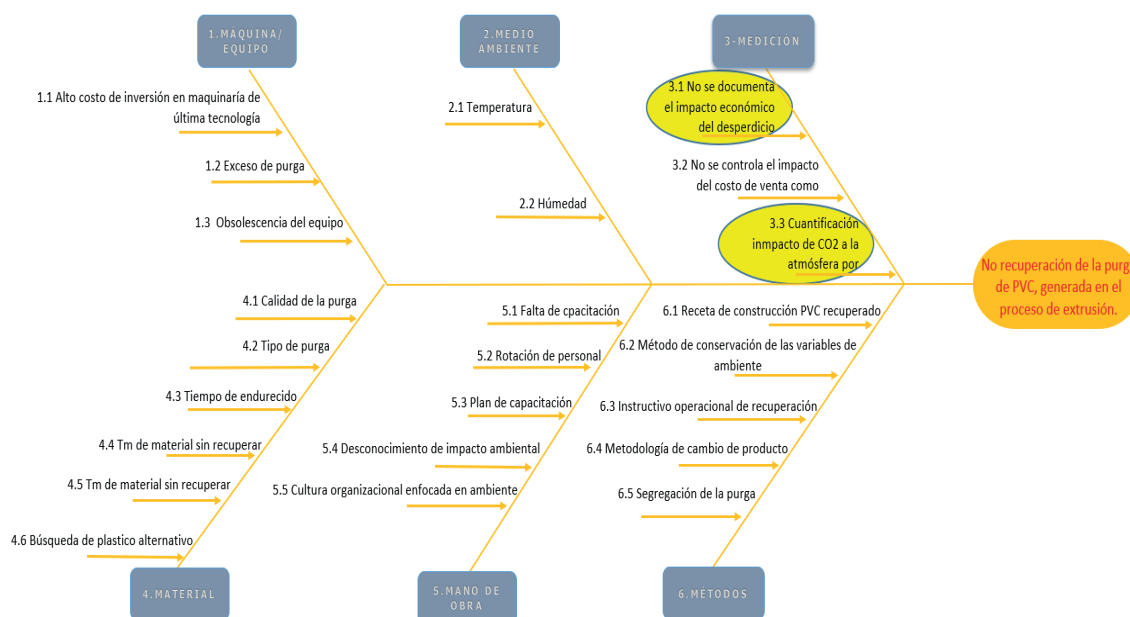


Figura 3. Resultado de la aplicación de la herramienta “Diagrama Ishikawa”.

Luego de un análisis particular para todas las causas presentadas; se identificaron tres como causantes principales de la problemática planteada en la etapa 1 (Figura 3 encerradas en un círculo amarillo). A continuación, se presenta una descripción de esas tres causas:

Causa identificada “no se documenta el impacto económico del desperdicio”:

Se refiere a la falta de registro o documentación adecuada sobre los costos asociados con el desperdicio de materiales o recursos en el proceso de producción. Esto implica que la empresa no tiene una comprensión clara de cuánto dinero se está perdiendo debido al desperdicio de materiales como el PVC en el proceso de extrusión de cobre. Esta falta de documentación puede ser problemática porque limita la capacidad de la empresa para evaluar el impacto económico real del desperdicio y tomar decisiones informadas para abordar el problema. Sin una comprensión clara de los costos asociados con el desperdicio, la empresa podría subestimar la magnitud del problema o no asignar recursos adecuados para implementar soluciones efectivas.

Para abordar esta causa identificada, sería necesario establecer sistemas de seguimiento y registro para documentar adecuadamente el impacto económico del desperdicio. Esto podría implicar la implementación de herramientas de contabilidad de costos específicas para rastrear los costos asociados con el desperdicio de materiales, así como la realización de análisis de costos-beneficios para evaluar el retorno de la inversión de implementar medidas de reducción de desperdicios. Además, sería importante educar al personal sobre la importancia de documentar adecuadamente el impacto económico del desperdicio y proporcionarles las herramientas y recursos necesarios para hacerlo de manera efectiva.

Causa identificada “no se cuantifica el impacto del CO2 a la atmósfera por recuperación”

Se refiere a la falta de evaluación o medición del impacto ambiental asociado con el proceso de no recuperación de PVC en términos de emisiones de dióxido de carbono (CO2) a la atmósfera. Esto indica que la empresa no está realizando un seguimiento adecuado de las emisiones de CO2 resultantes de la recuperación de PVC y su impacto en el medio ambiente.

Esta falta de cuantificación del impacto ambiental puede ser preocupante, ya que limita la capacidad de la empresa para comprender y mitigar su huella de carbono. El CO₂ es un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático, y las emisiones asociadas con el proceso de recuperación de PVC podrían tener un impacto significativo en la salud del medio ambiente.

Para abordar esta causa identificada, sería necesario implementar un sistema de seguimiento y medición de las emisiones de CO₂ asociadas con el proceso de recuperación de PVC. Esto podría incluir la instalación de equipos de monitoreo de emisiones y el desarrollo de protocolos de medición estandarizados para registrar y cuantificar las emisiones de CO₂ en diferentes etapas del proceso. Además, se podrían explorar estrategias para reducir las emisiones de CO₂, como la optimización de procesos, la mejora de la eficiencia energética y la utilización de tecnologías más limpias y sostenibles.

Adicionalmente y con motivo de profundizar en el entendimiento del análisis de las causas raíz se aplicó la herramienta de “5 por qué” [35] (Cuadro 2)

Cuadro 2 Resultado de la aplicación de la herramienta de “5 por qué”.

Planteamiento del problema	Por qué 1	Por qué 2	Por qué 3	Por qué 4	Por qué 5
No recuperación de la purga de PVC generada en el proceso de extrusión	¿Por qué se generan residuos de PVC en el proceso de extrusión de cobre?	¿Por qué el PVC no se incorpora al producto final de manera eficiente?	¿Por qué no hay un método específico para recuperar el PVC?	¿Por qué no se ha implementado una estrategia de gestión de residuos?	¿Por qué no se ha reconocido plenamente la necesidad de abordar este aspecto de la sostenibilidad?
	Respuesta 1	Respuesta 2	Respuesta 3	Respuesta 4	Respuesta 5
	Porque parte del PVC utilizado en el proceso no se incorpora al producto final y se convierte en residuo. (Purga)	Porque no se cuenta con un método específico para recuperar el PVC durante el proceso de extrusión de cobre.	Porque no se ha implementado una estrategia de gestión de residuos focalizada en la recuperación de PVC en la organización.	Porque no se ha reconocido plenamente la necesidad de abordar este aspecto específico de la sostenibilidad en el proceso de extrusión de cobre.	Porque la empresa puede carecer de información completa sobre las implicaciones ambientales y económicas de la generación de residuos de PVC en el proceso.

En la matriz de 5 “por qué” se identificó que la organización actualmente no estaba dentro de su estrategia de sostenibilidad corporativa y por tanto el desecho generado se envía al residuo sin ningún análisis previo de recuperación.

Implementar

Diseño de plan

Como consecuencia del análisis de la etapa anterior. La organización en su afán de realizar una reducción de la contaminación de sus procesos decide crear una estrategia de gestión de residuos de PVC. Por lo anterior, el Gerente del proyecto realizó inicialmente un proceso de benchmarking con las otras plantas de LATAM que tienen un proceso similar al de la

organización para identificar buenas prácticas de recuperación de residuos de PVC previo a la etapa inicial del proyecto. Seguidamente, se decida crear una herramienta general para mostrar la idea global del proyecto (Cuadro 3)

Cuadro 3. Resumen del proyecto de mejora mediante el ciclo Deming [36] (Visión global).

Etapas Ciclo Deming				
	Plan (Planificar)	Do (Hacer):	Check (Verificar):	Act (Actuar):
Objetivo	Desarrollar e implementar un sistema de gestión de residuos centrado en la recuperación de PVC.	Implementar el sistema de gestión de residuos planificado y realizar las acciones específicas para recuperar el PVC durante el proceso de extrusión de cobre.	Evaluar la eficacia del sistema de gestión de residuos implementado y recopilar datos para analizar el impacto en la generación de residuos de PVC.	Tomar medidas correctivas basadas en los resultados de la fase de verificación y continuar mejorando el sistema de gestión de residuos.
Acciones:	•Identificar los puntos críticos de generación de residuos de PVC en el proceso.	•Instalar equipos y tecnologías necesarios para la recuperación de PVC.	•Monitorear continuamente la cantidad de residuos de PVC generados.	•Analizar los datos recopilados para identificar áreas de mejora.
	•Investigar tecnologías y métodos eficientes para la recuperación de PVC.	•Implementar procedimientos de clasificación y recolección de residuos en el proceso.	•Realizar auditorías para verificar el cumplimiento de los procedimientos.	•Implementar mejoras continuas en el sistema de gestión de residuos de PVC.
	•Diseñar un plan detallado para la implementación de un sistema de gestión de residuos de PVC.	•Capacitar al personal sobre las nuevas prácticas de gestión de residuos.	•Recopilar datos sobre el rendimiento del sistema de gestión de residuos.	•Ajustar el plan según sea necesario para optimizar la eficiencia y reducir aún más la generación de residuos.

Seguidamente al resumen anterior. Se procedió a brindar mayor detalle de las acciones o actividades a implementar, así, en la Figura 4 y la Cuadro 4 se muestra la estructura detallada de trabajo [37]y un resumen de las actividades, respectivamente.

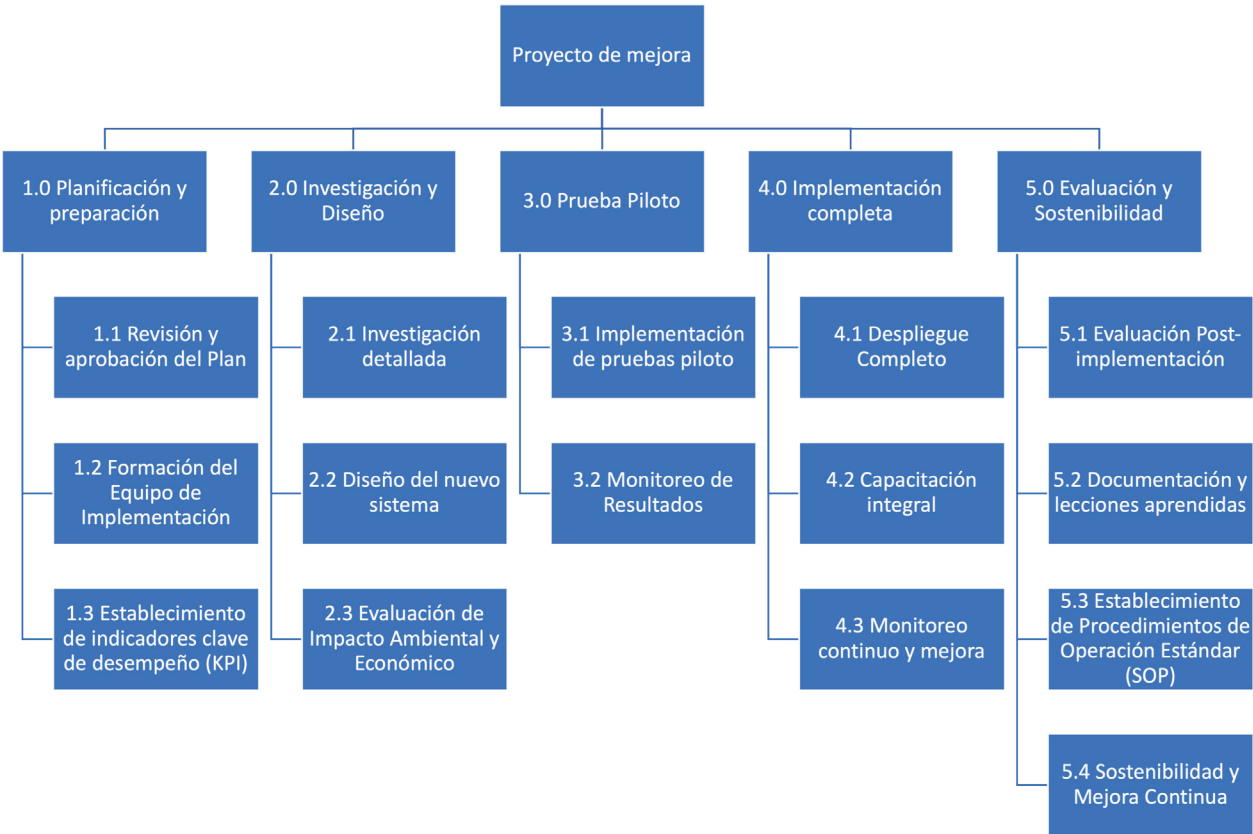


Figura 4. Resultado de la aplicación de la herramienta “Estructura detallada de trabajo.

Cuadro 4. Resumen de las actividades de la estructura detallada de trabajo.

Etapa	Actividad	Descripción
Etapa 1: Planificación y Preparación	1.1. Revisión y Aprobación del Plan:	Desarrollar un plan detallado que incluya objetivos, alcance, recursos necesarios, cronograma y presupuesto. Obtener la aprobación del plan por parte de la dirección y otras partes interesadas clave.
	1.2. Formación del Equipo de Implementación:	Seleccionar y capacitar a un equipo de implementación que incluya expertos en ingeniería de procesos, gestión de residuos, personal de producción, y otros roles clave.
	1.3. Establecimiento de Indicadores Clave de Desempeño (KPI):	Definir KPI específicos para evaluar el éxito de la implementación, como la reducción de residuos, eficiencia operativa y cumplimiento ambiental.
Etapa 2: Investigación y Diseño	2.1 Investigación Detallada:	Realizar una investigación más detallada sobre las tecnologías de recuperación de PVC, regulaciones ambientales, y requisitos específicos del proceso de extrusión de cobre de Prysmian Group.
	2.2 Diseño del Nuevo Sistema:	Desarrollar un diseño detallado del nuevo sistema de gestión de residuos, incluyendo la integración de tecnologías, procedimientos operativos (SOP) y requisitos de infraestructura.
	2.3 Evaluación de Impacto Ambiental y Económico:	Realizar una evaluación detallada del impacto ambiental y económico del nuevo sistema, considerando factores como la reducción de residuos, ahorros de costos y cumplimiento normativo.
Etapa 3: Pruebas Piloto	3.1. Implementación de Pruebas Piloto:	Realizar pruebas piloto a pequeña escala para validar la eficacia del nuevo sistema y realizar ajustes según sea necesario.
	3.2 Monitoreo de Resultados:	Monitorear cuidadosamente los resultados de las pruebas piloto, recopilando datos sobre la eficiencia operativa, la calidad del producto y la reducción de residuos.
Etapa 4: Implementación Completa	4.1. Despliegue Completo:	Implementar el nuevo sistema de gestión de residuos en todas las líneas de producción de extrusión de cobre de Prysmian Group.
	4.2. Capacitación Integral:	Proporcionar capacitación extensiva al personal sobre los cambios en los procedimientos y la operación del nuevo sistema.
	4.3. Monitoreo Continuo y Mejora:	Establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar el rendimiento del nuevo sistema y realizar mejoras continuas según sea necesario.
Etapa 5: Evaluación y Sostenibilidad	5.1. Evaluación Post-Implementación:	Evaluar los resultados post-implementación en comparación con los KPI establecidos.
	5.2. Documentación y Lecciones Aprendidas:	Documentar el proceso de implementación, incluyendo desafíos encontrados, soluciones aplicadas y lecciones aprendidas.
	5.3. Establecimiento de Procedimientos de Operación Estándar (SOP):	Desarrollar SOP para la gestión continua del nuevo sistema, asegurando la consistencia y la calidad a lo largo del tiempo.
	5.4. Sostenibilidad y Mejora Continua:	Implementar prácticas de mejora continua y sostenibilidad a largo plazo, asegurando que el sistema se mantenga eficiente y adaptado a cambios en el entorno operativo.

Posteriormente, con la claridad de las actividades a desarrollar en el proyecto, se continuó con la asignación de responsables entre los miembros del equipo del proyecto. De esta forma se creó una Matriz de Responsabilidades (RACI) [38] para hacer el proyecto sostenible en el tiempo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Matriz RACI del proyecto de mejora.

Actividad/Entregable	Responsable (R)	Aprobador (A)	Consultado (C)	Informado (I)
1. Investigación y Análisis Inicial	Gerente del Proyecto	Gerente de Planta Country Manager		
2. Diseño del Sistema de Gestión de Residuos	Gerente del proyecto	Gerente de Planta	Especialista en Medio Ambiente Ingeniero de procesos	
3. Pruebas Piloto	Gerente del proyecto Ingeniero de procesos	Gerente de Calidad Gerente de Planta	Equipo de Producción R&D	Todo el Personal
4. Capacitación del Personal	Gerente del proyecto Especialista en Capacitación	Gerente de Recursos Humanos Gerente de Planta	Ingeniero de Procesos Operador	Operador de producción
5. Monitoreo y Evaluación Continua	Gerente del proyecto Mejora continua	Gerente de Operaciones	Especialista en Medio Ambiente	Todo el Personal
6. Retroalimentación y Mejora Continua	Gerente del Proyecto Mejora Continua	Gerente de Calidad Gerente de Planta	Gerente del Proyecto	Todo el Personal
7. Comunicación Externa	Gerente del Proyecto Especialista en Comunicación	Gerente de Recursos Humanos		Todo el Personal

Finalmente se desarrolló un cronograma mediante el diagrama de Gantt [39] para brindar seguimiento a la ejecución de todas las actividades planteadas (Figura 5)



Figura 5. Resultado de la aplicación de la herramienta “Diagrama de Gantt”

Ejecución del plan

Como parte de la evidencia de las acciones implementadas en este proyecto se resumen a continuación las consideradas como principales:

- Adquisición de un molino especializado para la trituración y molienda del PVC recuperado

Luego de un estudio exhaustivo de diferentes tecnologías en donde se valoraron criterios como la eficiencia, la capacidad de procesamiento, la calidad del producto final y la compatibilidad con el proceso de extrusión de cobre (criterios técnicos y operativos). Se selecciona el molino especializado que fue integrado en la planta de producción de Prysmian Group, permitiendo así la trituración y molienda eficiente del PVC recuperado para su posterior reutilización en el proceso de extrusión de cobre. El mismo representó un costo de \$5.500 el cual se adaptó para la función requerida en conjunto con el área de mantenimiento, adicional se definió los parámetros de seguridad para el uso correcto del equipo con el equipo de seguridad y salud ocupacional (Figura 6)



Figura 6. Molino Molienda Conair.

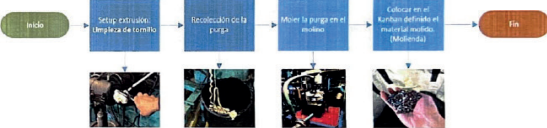
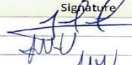
- Desarrollo de procedimientos Operativos estándar (SOP)

Estos procedimientos se elaboraron para las tareas de generación de molienda y recuperación en la planta de PVC. Fueron elaborados en base a las mejores prácticas de la industria y la experiencia específica del equipo de operaciones de Prysmian Group. Los SOP definieron claramente los pasos a seguir para la operación del molino, así como los procedimientos para la manipulación segura y eficiente del PVC recuperado. Además, se incluyeron pautas detalladas para la supervisión y control de calidad del proceso de molienda, garantizando así la consistencia y la calidad del producto final (Figura 7).

STANDARD OPERATING PROCEDURE (SOP)

AUTHOR: Juan Arias DATE: 11-Sep REVISION NO.: 0 REVISION DATE: 0 STATUS: Activo

< SOP - Recuperación de Purga de PVC >

Process Name	Parent Process	SOP Owner	Process Time
Recuperación de Purga de PVC	Proceso de producción en extrusión	Gerente de producción	Durante el proceso productivo, sujeto a necesidad de recuperación
Purpose Estandarizar los pasos de recuperación de purga de PVC, con el objetivo de mantener esta practica implementada durante el tiempo. Esta guía funciona como entrenamiento para personal de nuevo ingreso.		Scope Proceso de extrusión Cambio de producto (Purga de extrusora)	
Definitions and Abbreviations 1 PVC - cloruro de polivinilo 2 Purga - Residuos que en algunas operaciones industriales o en los artefactos se acumulan y se han de eliminar o expeler 3		Responsibilities Operador de producción - Encargado de ejecutar los procesos definidos. Supervisor - Encargado de velar por el cumplimiento del proceso definido. Gerente de producción - Da las herramientas para mantener la operación y el proceso definido.	
Process Steps 1 Limpieza del tornillo de extrusión (Purga) por cambio de producto 2 Recolección de la purga de extrusión 3 Realizar el proceso de molido de purga de extrusión (Molienda) 4 Colocar la molienda en su caja respectiva (Kanban) 5 6 7 8 9		Process Map 	
Related SOPs and Documents SOP Proceso de producción SOP Entrenamiento de personal operativo - Extrusión		Distribution List Departamento de producción Departamento de ingeniería de procesos Entrenamiento de personal	
Issued by	Name Juan Arias	Signature 	Date Monday, September 11, 2023
Revised by	Jonathan Vega		Monday, September 11, 2023
Authorized by	Jonathan Vega		Monday, September 11, 2023

STANDARD OPERATING PROCEDURE (SOP)

AUTHOR: Juan Arias DATE: 16-Oct REVISION NO.: 0 REVISION DATE: 0 STATUS: Activo

< SOP - Recuperación de Purga de PVC >

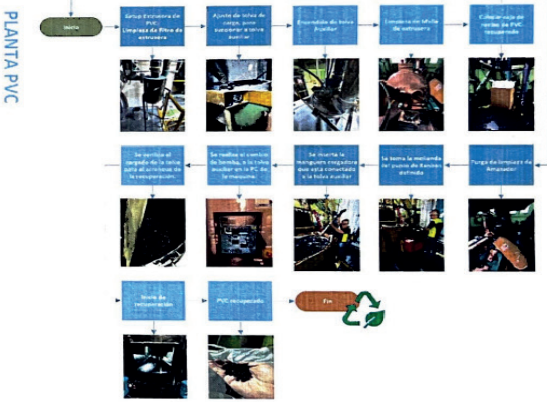
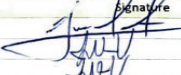
Process Name	Parent Process	SOP Owner	Process Time
Recuperación de Molienda PVC	Proceso de producción Planta de PVC	Gerente de producción	Durante el proceso productivo, sujeto a necesidad de recuperación
Purpose Estandarizar los pasos de recuperación de molienda de PVC, con el objetivo de mantener esta practica implementada durante el tiempo. Esta guía funciona como entrenamiento para personal de nuevo ingreso.		Scope Proceso de producción Planta de PVC Kanban lleno (Molienda PVC)	
Definitions and Abbreviations 1 PVC - cloruro de polivinilo 2 Purga - Residuos que en algunas operaciones industriales o en los artefactos se acumulan y se han de eliminar o expeler 3		Responsibilities Operador de producción - Encargado de ejecutar los procesos definidos. Supervisor - Encargado de velar por el cumplimiento del proceso definido. Gerente de producción - Da las herramientas para mantener la operación y el proceso definido.	
Process Steps 1 Setup Extrusora de PVC: Limpieza de filtro de extrusora 2 Ajuste de tolva de carga, para succionar a tolva auxiliar 3 Encendido de tolva Auxiliar 4 Limpieza de Malla de extrusora 5 Colocar caja de recibo de PVC recuperado 6 Purga de limpieza de Amasador 7 Se toma la molienda del punto de Kanban definido 8 Se inserta la manguera cargadora que esta conectado a la tolva auxiliar 9 Se realiza el cambio de bomba, a la tolva auxiliar en la PC de la maquina. 10 Se verifica el cargado de la tolva para el arranque de la recuperación. 11 Inicio de recuperación 12 PVC recuperado		Process Map 	
Related SOPs and Documents SOP Proceso de producción - Planta de PVC SOP Entrenamiento de personal operativo - Planta de PVC		Distribution List Departamento de producción Departamento de ingeniería de procesos Entrenamiento de personal	
Issued by	Name Juan Arias	Signature 	Date Monday, October 16, 2023
Revised by	Jonathan Vega		Monday, October 16, 2023
Authorized by	Jonathan Vega		Monday, October 16, 2023

Figura 7. Resumen de Procedimientos estándar para la recuperación de molienda.

- Elaboración de prototipo

Se realizó en conjunto con personal de las áreas de producción e ingeniería de procesos el protocolo de pruebas para aprovechar la primera producción de molienda (PVC molido) dentro de la planta de PVC⁶, obteniendo como producto final PVC procesable nuevamente al proceso productivo en conductores con cubierta negra (Figura 8).



Figura 8. Primera producción de molienda.

Posteriormente, se estableció el mapa del proceso estándar para que sea reproducible (Figura 9).

Cabe destacar que posteriormente a la aplicación de los pasos mostrados en la Figura 9 se obtienen dos productos. Por un lado, se obtiene la Molienda de PVC, el cual es el resultado de aplicar el proceso del molino sobre la purga previo a su salida de la cabeza de extrusión. Este material se acumula en cajas de 800kg aproximadamente para mayor aprovechamiento del espacio y tiempo de producción de la planta de PVC. Y una vez hecho el proceso de recuperación se obtiene el PVC recuperado y en el 100% de los casos es color negro, ya que el pigmento que prevalece es el de color negro. Siendo esto motivo que el proyecto de recuperación solo sea aplicable en la cubierta de conductores de esta coloración. A continuación, se detalla los cambios que sufre el PVC al aplicar el proceso definido en cuestión (Figura 10).

6 La idea es utilizar este PVC recuperado en productos con PVC tipo 60° y chaquetas de conductores TGP.

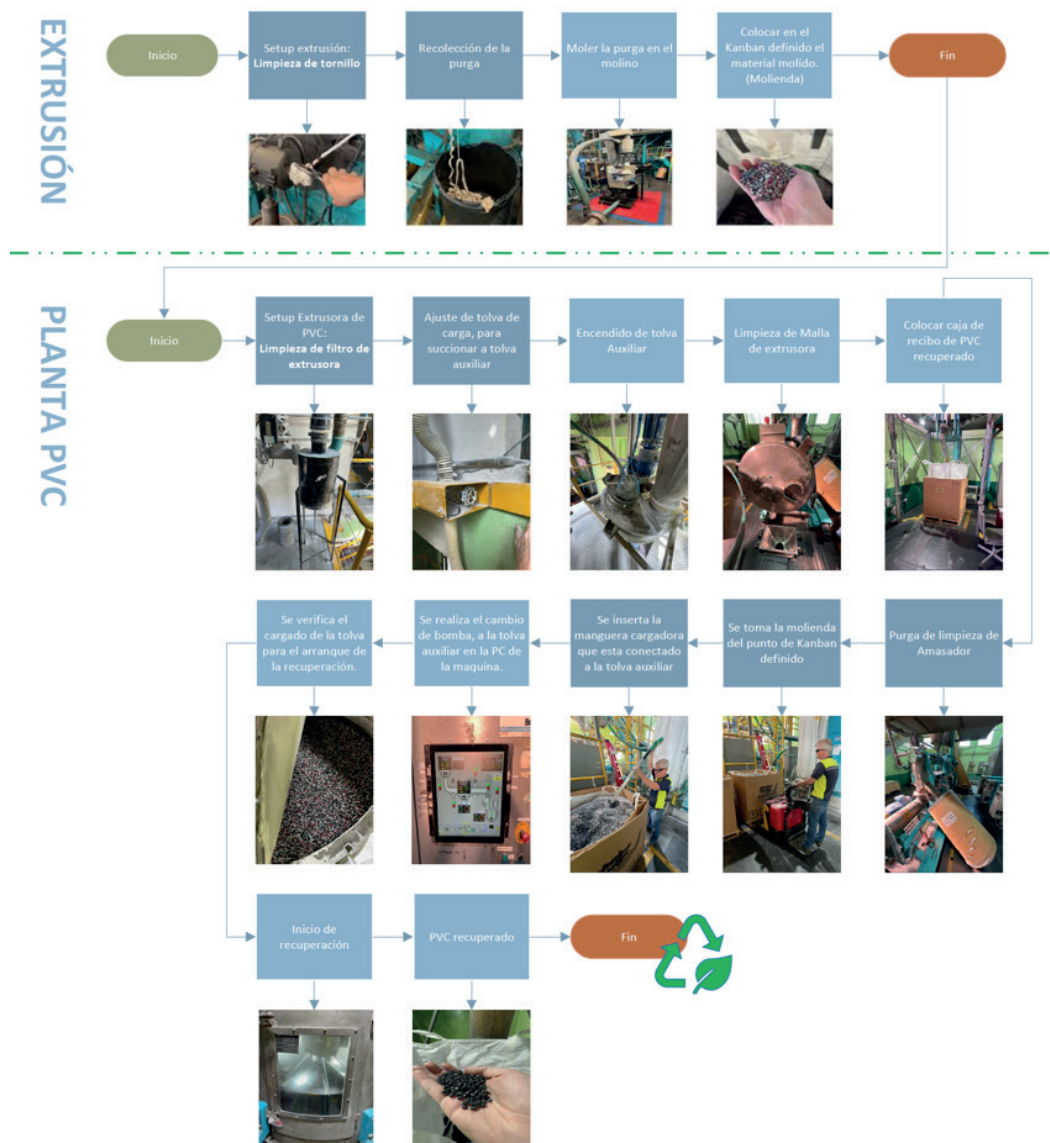


Figura 9. Descripción del proceso de Molienda para obtener el PVC recuperado



Figura 10. Tipos de PVC.

Resultados de la ejecución del plan

La ejecución del plan brindó mejoría en cuatro indicadores considerados como clave. En el Cuadro 6 se muestra sus descripciones.

Cuadro 6. Indicadores claves del desempeño.

Indicadore clave	Fórmula
% reducción de desechos enviados al residuo sanitario	$\left(\frac{\text{Desechos recuperados en kg (purga)}}{\text{Desechos totales en kg}} \right) * 100$
% Personal capacitado en la recuperación de PVC	$\left(\frac{\# \text{ Total de personal capacitado en Extrusión}}{\# \text{ Total de personal de Extrusión}} \right) * 100$
% de Reducción del costo	$\left(\frac{\text{Producción con molienda} * \text{costo de molienda recuperada}}{\text{Producción con PVC virgen} * \text{costo de PVC virgen}} \right) * 100$
CO2 reducidas en la atmosfera	$\text{Rate de CO2} * \text{tonelada métricas recuperadas}$

A continuación, se presenta un resumen de las magnitudes de las mediciones planteadas anteriormente en el Cuadro 6.

- Medición de la reducción de desechos enviados al residuo sanitario:

Se logró una reducción significativa en la cantidad de desechos de PVC⁷ enviados al residuo sanitario. Esta reducción se tradujo en una disminución notable de los costos asociados con la eliminación de residuos y contribuyó a la mejora del impacto ambiental de la planta de producción (Figura 11)

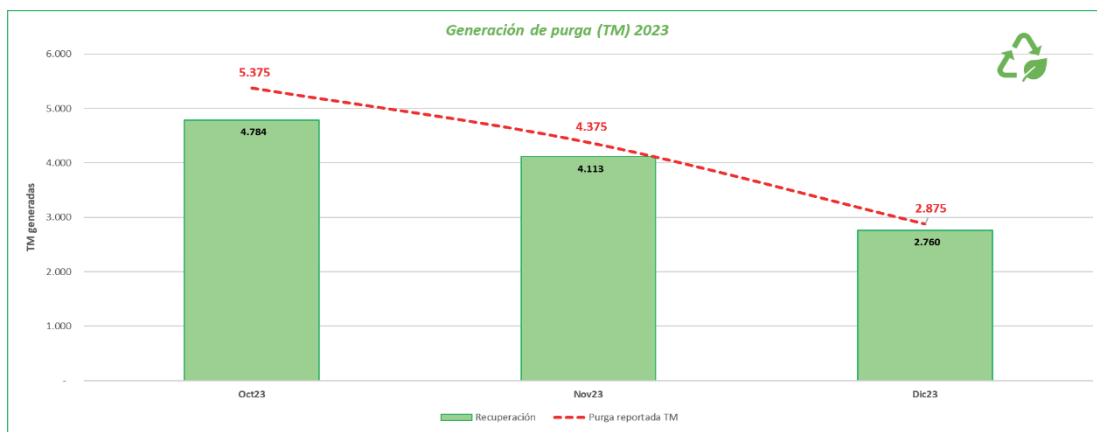


Figura 11. Resultados de la reducción de desechos enviados a residuo.

⁷ Se realizó una prueba anova de un factor (antes y despues) cuyo valor respuesta fue la cantidad de desperdicio del PVC. El resultado fue significativo al obtener un valor del valor p de 0.011. Por lo que se demuestra estadísticamente, que hubo una disminución en el desperdicio del PVC. La prueba se realizó con un nivel de confianza del 95%.

- Personal capacitado en el proceso de recuperación de PVC:

Se desarrolló un plan de entrenamiento integral basado en los SOP y en las necesidades específicas del personal de operaciones. Este plan de capacitación permitió elevar el nivel de competencia y conocimiento del personal en el proceso de recuperación de PVC, mejorando así la eficiencia y la efectividad de las operaciones. El cumplimiento que se logró fue del 100%.

- Medición de reducción de costo de producción por el uso de material recuperado:

La implementación de la solución resultó en una reducción significativa de los costos de producción debido al uso de material recuperado en el proceso de extrusión de cobre. Esta reducción de costos mejoró la rentabilidad general del proceso y aumentó el margen de contribución en los productos fabricados con material recuperado. La reducción alcanzada fue de un 23.7%

- Medición de impacto CO₂ por reducción de compra de PVC virgen.

Basado en la estimación anterior, el rate de CO₂ por tonelada métrica es de 0.073 toneladas de CO₂/ toneladas métricas si tomamos que el proyecto plantea una recuperación efectiva del 92% del material generado en el proceso de extrusión y se define una estimación de recuperación de 56 toneladas métricas anual nos refleja una reducción de 4 toneladas métricas de CO₂ a la atmosfera para el año 2024.

Controlar

Para garantizar la sostenibilidad de la solución en el tiempo, se implementaron medidas específicas de seguimiento y monitoreo. Se establecieron indicadores clave de rendimiento (KPI's) para evaluar continuamente el desempeño del proceso de recuperación de PVC y se programaron revisiones periódicas para identificar oportunidades de mejora. Además, se designaron responsables específicos para supervisar y mantener el funcionamiento óptimo del sistema, y se fomentó una cultura de mejora continua dentro de la organización para asegurar que la solución se mantenga efectiva y eficiente a lo largo del tiempo. Adicionalmente, como parte de los resultados obtenidos post-implementación, durante los meses de OCT a DIC 2023 se logró una recuperación total de 11.6 toneladas métricas de 12.6 Toneladas métricas de Purga de PVC. Esto representa un 92% de Purga recuperada siendo aprovechada en cubiertas para conductores logrando aplicar un concepto de economía circular y cuidando el ambiente.

El proceso de control del proyecto se llevó a cabo mediante una consulta en BI donde les permita a los actores del proceso conocer el avance y el impacto de su recuperación y hacerlos sentirse parte importante de mantener el proyecto en el tiempo. La revisión de resultados se llevó mediante el registro de producción en el sistema MES de la recuperación de la Purga de PVC en la planta de PVC, registrado de forma diaria por los colaboradores de producción. Esto logra el monitoreo a nivel de sistema mediante un sistema de BI que alimenta el dato de las pizarras arriba mencionadas. El proyecto durante el proceso de aseguramiento es vital tener al equipo necesario involucrado para lograr la sostenibilidad en el tiempo, por lo cual se construyó un stakeholders Analysis [40] para tener claro los intereses, influencias y expectativas de los principales autores.

Monitoreo de las partes interesadas

El sistema de monitoreo es vital para el proyecto y la idea es mediante pizarras electrónicas mostrar al personal esta información de la recuperación de Purga de PVC diaria y mostrar de forma acumulada un cálculo del impacto en CO₂. Mensualmente, se realizó un despliegue del

avance del proyecto a los stakeholders donde se permitió crear una referencia de la evolución del proyecto y se recibió retroalimentación por partes de ellos para la mejora continua (Ver Cuadro 7).

Cuadro 7. Stakeholders Analysis (Monitoreo de las partes interesadas).

<i>Stakeholder</i>	<i>Intereses</i>	<i>Influencia</i>	<i>Expectativas</i>
Equipo de Proyecto	<ul style="list-style-type: none"> - Contribuir con conocimientos y habilidades. - Éxito general del proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - En la implementación de acciones específicas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Colaboración efectiva y reconocimiento de contribuciones.
Líder del Proyecto	<ul style="list-style-type: none"> - Alcanzar objetivos estratégicos. - Sostenibilidad a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobre la dirección general del proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados alineados con visión estratégica de la empresa. - Cumplimiento de los objetivos del proyecto
Responsable de Calidad	<ul style="list-style-type: none"> - Mantenimiento de estándares de calidad. - Eficacia y eficiencia de soluciones propuestas en el proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - En la implementación y procesos de mejora continua. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cumplimiento de estándares y mejora continua.
Gerente de Operaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Integración efectiva de soluciones. - Eficiencia operativa proceso LEAN. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobre la integración de procesos operativos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptación efectiva de mejoras en las operaciones.
Mejora Continua	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo continuo de KPIs. - Proporcionar análisis para decisiones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobre la selección y seguimiento de KPIs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso a datos precisos y capacidad de análisis.
Auditor Interno	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurar cumplimiento de estándares. - Identificar posibles desviaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - En realización de auditorías y evaluación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Información precisa y acción correctiva eficaz.
Comite de comunicación	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicación efectiva y transparente. - Gestión de percepción y reputación de la idea del proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobre estrategia y canales de comunicación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicación clara y oportuna.
Responsable de sistemas de gestión	<ul style="list-style-type: none"> - Registro preciso de acciones y resultados. - Facilitar aprendizaje continuo mediante la estandarización documental. 	<ul style="list-style-type: none"> - En creación y mantenimiento de documentos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Documentación detallada y accesible.
Cultura organizacional	<ul style="list-style-type: none"> - Éxito del proyecto a largo plazo. - Desarrollo de una cultura de mejora continua. 	<ul style="list-style-type: none"> - A través de colaboración y apoyo mutuo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Compromiso y participación activa de todo el equipo.

Pizarra electrónica

El sistema de monitoreo fue fundamental para el proyecto y la idea fue mediante pizarras electrónicas mostrar al personal esta información de la recuperación de Purga de PVC diaria y mostrar de forma acumulada un cálculo del impacto en CO₂. Mensualmente, se hizo un despliegue del avance del proyecto a los stakeholders donde se permitía crear una referencia de la evolución del proyecto y poder recibir retroalimentación por partes de ellos para la mejora continua (Figura 12).

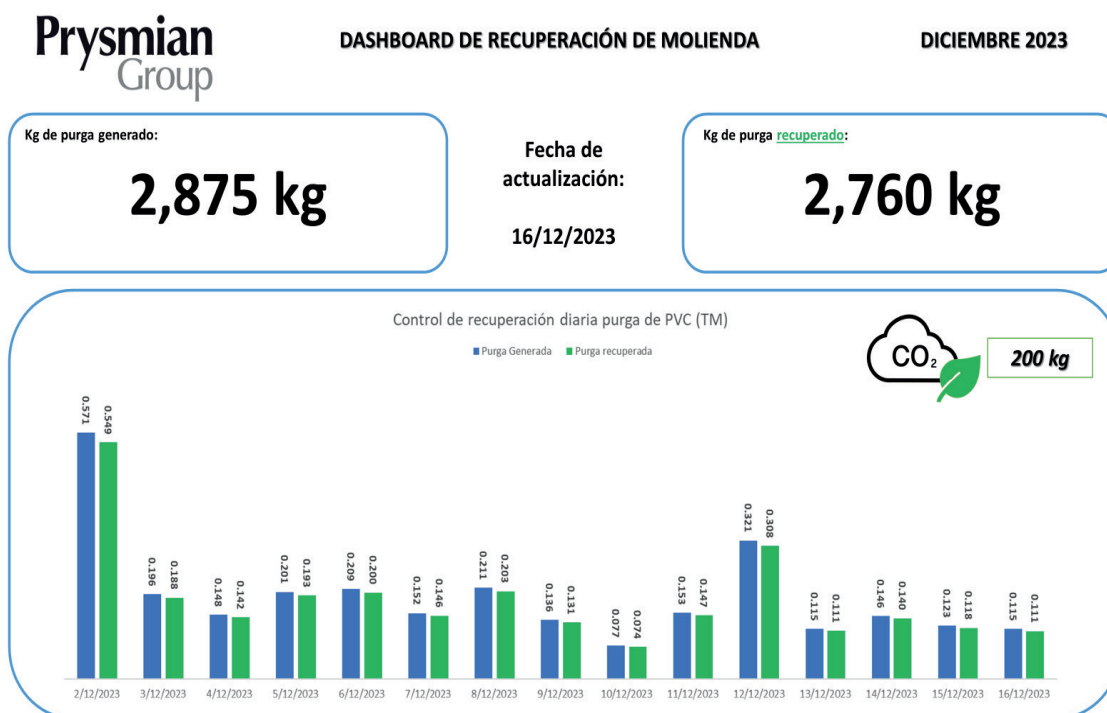


Figura 12. Pizarra de control.

Análisis modal de fallos y efectos (AMFE[41])

La revisión de riesgos se analizó mediante una matriz AMFE con escala del 1 al 5, donde 1 es menos grave/bajo y 5 más grave/alto según el ítem en la herramienta.

El valor de Nivel de riesgo (N) se define en base a la multiplicación de los 3 factores: Gravedad x Ocurrencia x Detección = Nivel de riesgo.

Cuadro 8. Análisis modal de fallos y efectos.

No.	Riesgo	Modo de Falla	Gravedad (G)	Ocurrencia (O)	Detección (D)	Nivel de Riesgo (N)	Acciones de mitigación
1	Tecnologías no Probadas	Ineficacia de nuevas tecnologías	4	3	2	24	- Realizar pruebas piloto antes de la implementación. - Consultar con expertos en la industria para validación.
2	Fallas en el Equipamiento	Interrupción del proceso	5	2	3	30	- Implementar programas de mantenimiento preventivo. - Mantener inventarios estratégicos de repuestos.
3	Resistencia al Cambio	Baja adopción de nuevas prácticas	3	4	2	24	- Desarrollar programas de capacitación y concienciación. - Incluir al personal en la planificación y toma de decisiones.
4	Interrupciones en la Cadena de Suministro	Escasez de materiales clave	4	3	3	36	- Establecer relaciones sólidas con proveedores. - Mantener inventarios estratégicos para reducir dependencia.
5	Variabilidad en Costos	Aumento inesperado en los costos	4	3	2	24	- Realizar análisis de costos detallados. - Establecer un fondo de contingencia para imprevistos.

Esto permitió determinar uno de los riesgos más altos es las interrupciones en la cadena de suministro para poder fabricar el PVC recuperado, que ocasionaría una acumulación de Purga de PVC obligando a la organización a disponer como desecho por un tema de espacio en las bodegas.

El equipo de recuperación de Purga de PVC definido fue incluido dentro del mantenimiento preventivo con el fin de evitar fallos en el equipo que comprometa la recuperación de la Purga de PVC. Ambos riesgos con mayor nivel de riesgo son conocidos por los involucrados del proceso con la idea de generar conciencia y estar atentos a ambas situaciones en todo momento. La parte de resistencia al cambio y otras variables, son riesgos controlados con el seguimiento definido en las etapas y cronograma del proyecto. En el caso de la resistencia al cambio, se está mitigando con la idea de que el personal se empodere del proyecto y para ellos sea una ayuda al medio ambiente de su parte.

La consolidación de la solución propuesta en el tiempo en el proyecto de recuperación de purga de PVC implica la implementación de estrategias y prácticas que aseguren la sostenibilidad y la mejora continua. Para las cuales definimos en este proyecto pilares que serán claves para el éxito en el tiempo y a continuación les detallo:

- Integración en la Cultura Organizacional:

Hay que asegurar que la recuperación del PVC y las prácticas sostenibles se integren en la cultura organizacional. Esto implica fomentar una mentalidad de responsabilidad ambiental en todos los niveles de la empresa.

- Capacitación Continua:

Se establece un proceso de capacitación continua para el personal en nuevas tecnologías, procesos y prácticas. Mantener al equipo actualizado sobre las mejores prácticas en la recuperación del PVC y la gestión de residuos.

- Monitoreo y Evaluación Constantes:

Se estableció un sistema de monitoreo y evaluación constante para los indicadores clave de rendimiento (KPI's). Se programa realizar revisiones mensuales para evaluar el rendimiento y la efectividad de la solución implementada.

- Responsabilidad Compartida:

Se promovió un ambiente de responsabilidad compartida en todos los niveles de la organización. Es de suma importancia involucrar a los empleados en la toma de decisiones y en la implementación de prácticas sostenibles para que se sientan parte integral del proceso.

- Comunicación Transparente:

Se mantiene una comunicación transparente con todas las partes interesadas, incluidos los colaboradores. Se comparte regularmente los logros y los desafíos futuros relacionadas con la recuperación de purga de PVC.

- Reconocimiento y Recompensas:

Se establece un programa de incentivo, el cual tiene un papel de suma importancia, reconocer el rendimiento excepcional en la implementación de prácticas sostenibles. Con el fin de motivar al personal y fortalecer el compromiso con la solución propuesta.

Para lograr una consolidación exitosa en el tiempo requiere se debe mantener un enfoque amplio que involucre aspectos culturales, operativos y de gestión. La sostenibilidad a largo plazo dependerá de la capacidad de la organización para adaptarse a cambios, aprender de la experiencia y mantener un compromiso constante con la mejora continua, responsabilidad ambiental y cumplimiento de KPI establecidos.

Los resultados obtenidos tras la implementación de las metodologías Lean demostraron una reducción significativa en el desperdicio de PVC. Antes de la implementación, el promedio mensual de PVC desperdiciado era de aproximadamente 500 kg. Después de la implementación, esta cifra se redujo a 150 kg, lo que representa una disminución del 70%.

Conclusiones y recomendaciones

Como parte de las conclusiones:

- La aplicación de la metodología Lean Six Sigma bajo el enfoque DMAIC demostró ser altamente efectiva para reducir el desperdicio de PVC en la empresa Conducen SRL, con una recuperación del 92% del material purgado, mejorando tanto la eficiencia operativa como el desempeño ambiental de la organización.
- La investigación evidenció que muchas de las causas del desperdicio eran atribuibles a la ausencia de documentación sistemática y a la falta de un plan formal de recuperación y reciclaje, lo cual fue corregido mediante herramientas como Ishikawa, 5 porqués y AMEF.
- La implementación de mejoras estructuradas, incluyendo la adquisición de un molino especializado, la capacitación integral del personal, y la estandarización de procedimientos (SOP), permitió convertir el residuo en materia prima reutilizable en la producción de conductores eléctricos con cubierta negra.
- El proyecto no solo trajo beneficios económicos, reduciendo en un 23.7% los costos de producción, sino que también logró una disminución de 4 toneladas métricas de CO₂, alineando a la empresa con los principios de la economía circular y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).
- La experiencia demostró que el liderazgo del proyecto, el compromiso del personal y el monitoreo con herramientas visuales y digitales (como BI y pizarras electrónicas) son claves para sostener los logros en el tiempo.

Como parte de las recomendaciones:

- Replicar la metodología empleada en otros procesos internos, particularmente en otras líneas de extrusión o materiales con potencial de recuperación.
- Generar un repositorio interno de buenas prácticas y estandarizar proyectos similares con documentación facilitando la escalabilidad del enfoque.

Referencias

- [1] "DMAIC Process: Define, Measure, Analyze, Improve, Control | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/dmaic>
- [2] A. E. H, "Economía circular: una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible*", *Revista de Economía Institucional*, vol. 25, núm. 49, pp. 109–134, 2023.
- [3] M. Marcelino-Aranda *et al.*, "La economía circular como alternativa hacia un nuevo modelo para la actividad industrial sustentable", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 35, núm. 3, pp. 195–206, sep. 2022, doi: 10.18845/tm.v35i3.5599.
- [4] S. King y K. E. S. Locock, "A circular economy framework for plastics: A semi-systematic review", *Journal of Cleaner Production*, vol. 364, p. 132503, sep. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132503.
- [5] M. J. V. Ulloa y L. R. Virgen, "El reciclaje de plásticos, un reto para lograr una economía circular", *CEDAMAZ*, vol. 12, núm. 2, Art. núm. 2, dic. 2022, doi: 10.54753/cedamaz.v12i2.1265.

- [6] D. G. Bucknall, "Plastics as a materials system in a circular economy", *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 378, núm. 2176, p. 20190268, jul. 2020, doi: 10.1098/rsta.2019.0268.
- [7] "Mercado Latinoamericano de Tubos de PVC, Informe | Análisis 2025-2034". Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-latinoamericano-de-tubos-de-pvc>
- [8] "Tamaño del mercado de cloruro de polivinilo, informe, participación y tendencias de crecimiento en 2030". Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.ar/industry-reports/polyvinyl-chloride-pvc-market>
- [9] "Brasil se consolida como potencia global en la industria del plástico y amplía su presencia internacional", PLASTICO. Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/brasil-se-consolida-como-potencia-global-en-la-industria-del-plastico-y-amplia-su>
- [10] "Plástico Brasil 2025: es la quinta industria del país, mueve u\$s22.100 millones y tiene 14.200 empresas", Ambito. Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ambito.com/energia/plastico-brasil-2025-es-la-quinta-industria-del-pais-mueve-us22100-millones-y-tiene-14200-empresas-n6126904>
- [11] "North America PVC Pipes Market Size, Share | Report 2034", Claight Corporation (Expert Market Research). Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.expertmarketresearch.com/reports/north-america-pvc-pipes-market>
- [12] "Iniciativa latinoamericana recicla residuos PVC para evitar su disposición en rellenos sanitarios", Alianza Empresarial para el Desarrollo. Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.aedcr.com/>
- [13] "Reciclaje de PVC en Costa Rica - CentralAmericaData :: Central America Data". Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://m.centralamericadata.com/es/article/home/Reciclaje_de_PVC_en_Costa_Rica
- [14] S. S. G, "TEC promueve la reincorporación de residuos al sistema productivo nacional", Hoy en el TEC. Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2022/03/31/tec-promueve-reincorporacion-residuos-sistema-productivo-nacional>
- [15] R. L. Republica, "Recuperación del 80% del plástico en el mercado de bebidas une a Fundación ALIARSE y Costa Rica Recupera", Periodico La República. Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.net/noticia/recuperacion-del-80-del-plastico-en-el-mercado-de-bebidas-une-a-fundacion-aliarse-y-costa-rica-recupera/>
- [16] B. Camarillo, "¿Cómo la industria plástica en Costa Rica puede reinventarse hacia la sostenibilidad? Innovaplast 2024 lo descifra", Periodico La República. Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.net/noticia/innovaplast-2024-descifro-como-la-industria-plastica-en-costa-rica-puede-reinventarse-hacia-la-sostenibilidad/>
- [17] "Revalorizar el PVC: clave para reducir residuos y costos". Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistaclevel.com/revalorizar-el-pvc-clave-para-reducir-residuos-y-costos>
- [18] "México avanza hacia la sostenibilidad en aplicaciones de PVC | Plastics Technology Mexico". Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/articulos/mexico-avanza-hacia-la-sostenibilidad-en-aplicaciones-de-pvc>
- [19] "Resumen de Salud Pública: Cloruro de vinilo (Vinyl Chloride) | PHS | ATSDR". Consultado: el 24 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs20.html
- [20] J. P. Ojeda y I. T. Mercante, "Reciclaje De Residuos Plásticos Para La Producción De Agregados Livianos", *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 37, feb. 2021, Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/370/37072384011/html/>
- [21] S. M. C. Sierra y J. A. A. Ver, "Valor compartido a través de la economía circular: reinventando la cadena de valor de la logística de plásticos en Colombia", *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, vol. 18, núm. 35, pp. 1-11, 2022.
- [22] R. SUMMA, "Costa Rica: Banco Nacional lanza primera tarjeta de plástico reciclado de la región", *Revista Summa*. Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistasumma.com/costa-rica-banco-nacional-lanza-primera-tarjeta-de-plastico-reciclado-de-la-region/>
- [23] "Polyvinyl Chloride - an overview | ScienceDirect Topics". Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect-com.translate.goog/topics/materials-science/polyvinyl-chloride?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

- [24] M. Gilbert y S. Patrick, "Chapter 13 - Poly(Vinyl Chloride)", en *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)*, M. Gilbert, Ed., Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 329–388. doi: 10.1016/B978-0-323-35824-8.00013-X.
- [25] Plastico, "PVC (policloruro de vinilo): beneficios, usos y reciclaje", Plastico. Consultado: el 12 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/pvc-policloruro-de-vinilo-beneficios-usos-y-reciclaje>
- [26] "What is Lean? Lean Manufacturing & Lean Enterprise | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://asq.org/quality-resources/lean?srsId=AfmBOooFmN4Rma0qU4X77X1vjEkl2EtzPKZwCHiLrRd4AXD6aZF_N2tZ
- [27] "(PDF) Lean manufacturing y su aplicación en la industria de plástico". Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/392611071_Lean_manufacturing_y_su_aplicacion_en_la_industria_de_plastico
- [28] C. E. Zambrano Cancañón, Y. O. Lao León, M. R. Moreno Pino, C. E. Zambrano Cancañón, Y. O. Lao León, y M. R. Moreno Pino, "El pensamiento lean desde la manufactura hasta la salud: una revisión de la literatura", *Correo Científico Médico*, vol. 23, núm. 3, pp. 876–894, sep. 2019.
- [29] H. Felizzola Jiménez y C. Luna Amaya, "Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico", *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 22, núm. 2, pp. 263–277, abr. 2014, doi: 10.4067/S0718-33052014000200012.
- [30] "What is Brainstorming? Charette & Unstructured Procedures | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/brainstorming?srsId=AfmBOopdlTFna59zcoLqYp3IsAihKvtQKerPrf6--6N-gA8oSeTBmWHG>
- [31] "What is Multivoting? NGT Voting, Nominal Prioritization | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://asq.org/quality-resources/multivoting?srsId=AfmBOor6arqRCm5Kv2oSS_pw1Wb-C1WcictPexKFpAmStf782m9qAEYn
- [32] "Impact Effort Matrix | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/impact-effort-matrix?srsId=AfmBOooCdY03uWrMeAUj9C3x9GsKuXJr3-8XhLRVfU-6DWWtk-8rYTSq>
- [33] "¿Qué es un sistema MES? | IBM". Consultado: el 12 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/mx-es/topics/mes-system>
- [34] "What is a Fishbone Diagram? Ishikawa Cause & Effect Diagram | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/fishbone?srsId=AfmBOoqqdQbQUaQ9AaowlewX1ZgK2n06VeQHAKtZiyKJxpFhxzA98Ppn>
- [35] "Five Whys and Five Hows | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/five-whys?srsId=AfmBOoob6faREbTACZrsamziwo5fgW4VO8LDdoo1sKiMISWvLGr5wuxj>
- [36] "PDCA Cycle - What is the Plan-Do-Check-Act Cycle? | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://asq.org/quality-resources/pdca-cycle?srsId=AfmBOor7M3sxo0P7AUh-ndpq6HltMvbs-raJaADlgiwqknxDk1KVmkr_
- [37] "The ABC basics of the WBS Paul Burek." Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pmi.org/learning/library/work-breakdown-structure-basics-5919>
- [38] "ProjectManagement.com - RACI". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.projectmanagement.com/wikis/234008/raci#_
- [39] "Gantt Charts and Agile Planning". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pmi.org/disciplined-agile/agile/agilegantt>
- [40] "Stakeholder management". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pmi.org/learning/library/stakeholder-management-task-project-success-7736>
- [41] "What is FMEA? Failure Mode & Effects Analysis | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/fmea?srsId=AfmBOoqL04GpFG0Qnaej7aanTGsbFnHTF0RXXBmYjIAnppeqsQmm9idJ>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Utilizamos la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT para traducir partes de este artículo del inglés al español. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.