



# IMPROVING OPERATIONAL EFFICIENCY AND DOWNTIME REDUCTION: APPLYING LEAN SIX SIGMA IN MATERIAL RECOVERY FACILITIES

## MEJORA DE LA EFICIENCIA OPERATIVA Y LA REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE INACTIVIDAD: APLICACIÓN DE LEAN SIX SIGMA EN INSTALACIONES DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES

Valeria N. Droz Cruz<sup>1</sup>, María M. García Sandoval<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Puerto Rico, Hato Rey, Puerto Rico

<sup>2</sup>ConWaste, Guaynabo, Puerto Rico

margarcia@pupr.edu

Recibido: 30 Octubre 2023 / Aceptado: 21 Mayo 2024 / Publicado: 01 Junio 2024

### RESUMEN

Esta investigación se centró en mejorar las operaciones de la Instalación de Recuperación de Materiales (MRF) en Guaynabo, Puerto Rico, en respuesta a desafíos en la industria de residuos sólidos. Se utilizó el enfoque Lean Six Sigma y el marco DMAIC para abordar el tiempo de inactividad recurrente. Se identificaron causas fundamentales, como atascos en transportadores y enredos de materiales, y se propusieron soluciones, incluyendo capacitación continua, mantenimiento proactivo y equipos especializados. Se proyectó una reducción del 30% en el tiempo de inactividad, lo que resultaría en un ahorro anual aproximado de \$97,630. El cálculo del ROI consideró mejoras operativas y costos de equipos, destacando los beneficios financieros de Lean Six Sigma. Este estudio resalta el valor de Lean Six Sigma en operaciones de MRF, ofreciendo información valiosa para la industria y mejorando la gestión de residuos basada en datos. Además, se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, contribuyendo a los objetivos de trabajo decente y el crecimiento económico, la industria, la innovación y la infraestructura, y las ciudades y comunidades sostenibles. Esta investigación demuestra las ventajas prácticas de Lean Six Sigma en operaciones de MRF, sirviendo

como un modelo para la gestión de residuos y subrayando el valor de las mejoras basadas en datos.

**Palabras Clave:** Tiempo de Inactividad, Lean, Six Sigma, reciclaje, industria de residuos sólidos  
**ABSTRACT**

In response to challenges within the solid waste industry, this research focused on enhancing Material Recovery Facility (MRF) operations using Lean Six Sigma. Employing the DMAIC framework, the study tackled recurring downtime at a Guaynabo, Puerto Rico MRF. Key findings include identifying root causes, such as conveyor jams and material entanglements, and proposing improvements like ongoing training, proactive maintenance, and specialized equipment like the Industrial Bag Opener and Motorized Brush. The study projected a 30% downtime reduction, yielding an annual saving of around \$97,630. This ROI calculation factored in operational enhancements and equipment costs, highlighting the financial benefits of Lean Six Sigma integration. Emphasizing Lean Six Sigma's value in MRF operations, the study provides insights for the industry and underscores data-driven waste management enhancements. Moreover, its alignment with UN Sustainable Development



Goals 8, 9, and 11 highlights contributions to decent work and economic growth (SDG 8), industry, innovation, and infrastructure (SDG 9), and sustainable cities and communities (SDG 11). The research showcases the practical advantages of Lean

Six Sigma in MRF operations, serving as a model for the wider waste management sector and affirming the value of data-driven enhancements.

**Key Words:** Downtime, Lean, Six Sigma, recycling, solid waste industry

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria de residuos sólidos en Puerto Rico ha enfrentado desafíos crecientes en la gestión efectiva y el reciclaje de materiales de desecho (EPA & FEMA, 2020). Las instalaciones de recuperación de materiales (MRF, por sus siglas en inglés) desempeñan un papel crucial en este proceso. Un MRF es un centro especializado diseñado para recibir, clasificar y procesar materiales reciclables, separando de manera eficiente los distintos tipos de materiales, como papel, cartón, vidrio, plástico y metales, con el objetivo de prepararlos para su posterior reutilización o venta en los mercados de materiales reciclados (Woodruff et. Al, 2017). Estas plantas son componentes fundamentales de la infraestructura de reciclaje. Sin embargo, las operaciones de MRF en Puerto Rico a menudo enfrentan importantes períodos de inactividad durante sus procesos, lo que conduce a una disminución en la eficiencia operativa, mayores costos y posibles acumulaciones de residuos (Closed Loop Partners, 2020). Abordar estos problemas y optimizar el rendimiento de los MRF requiere la implementación de metodologías efectivas que impulsen la mejora continua.

Una metodología que ha mostrado promesa en diversas industrias es Lean Six Sigma (American Society for Quality, 2022). Lean Six Sigma combina los principios del pensamiento Lean, orientado a eliminar el desperdicio y optimizar los procesos, con el rigor estadístico de Six Sigma, enfocado en reducir la variación y los defectos del proceso (Koussaimi et al., 2016). Aunque Lean Six Sigma ha sido ampliamente adoptado en los sectores de manufactura y servicios, su aplicación en la industria de residuos sólidos en Puerto Rico, también abarcando los MRF, ha recibido una atención limitada (Closed Loop Partners, 2020).

Los potenciales beneficios de reducir los tiempos de inactividad y mejorar la eficiencia operativa pueden ser realizados al personalizar Lean Six Sigma para el contexto único de las instalaciones de recuperación de materiales. En esta investigación se examinarán



las estrategias y mejores prácticas para implementar Lean Six Sigma en un MRF localizado en Guaynabo, Puerto Rico, y se discutirán los resultados y ventajas de tales iniciativas. También abordará los desafíos y barreras para una implementación exitosa y proporcionará recomendaciones para integrar Lean Six Sigma en las operaciones de los MRF. En general, esta investigación tiene como objetivo contribuir al cuerpo de conocimiento sobre la implementación de Lean Six Sigma en las instalaciones de recuperación de materiales.

## 2 MÉTODO

En el presente estudio, para abordar de manera eficiente los desafíos y alcanzar los objetivos propuestos, se utilizó una metodología sistemática basada en el marco DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) de Lean Six Sigma. Este enfoque ha sido ampliamente reconocido por su capacidad para mejorar procesos y reducir defectos en diversas industrias (Koussaimi et al., 2016). El marco de la metodología DMAIC ha sido rigurosamente seguidos para garantizar una investigación estructurada y enfocada en obtener resultados significativos. En la etapa de Definición (Define), se especificaron los objetivos y el alcance del estudio, identificando además a las partes interesadas y creando una declaración del problema relacionado con el proceso de clasificación del MRF. Posteriormente, en la fase de Medición (Measure), se llevó a cabo una evaluación del proceso de clasificación del MRF, recopilando datos sobre el rendimiento y los tiempos de inactividad, y aplicando herramientas estadísticas para identificar las principales causas de dichos tiempos de inactividad. A través de la fase de Análisis (Analyze), se analizaron los datos recopilados y se identificaron las causas principales de las ineficiencias. Luego, en la fase de Mejora (Improve), se desarrollaron recomendaciones y estrategias para optimizar el proceso de clasificación, eliminando actividades innecesarias y mejorando la eficiencia operativa. Por último, en la fase de Control (Control), se establecieron mecanismos de seguimiento y control para mantener y medir las mejoras implementadas en el proceso. Es importante añadir que esta investigación se llevó a cabo durante los meses de diciembre a marzo en una planta de recuperación de materiales que opera lunes a viernes, 6 a.m. a 3 p.m.

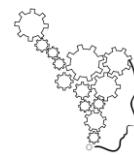


FIGURA 1: MAPA DE PUERTO RICO CON UBICACIÓN DEL MRF DE GUAYNABO



FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)

## 2.1 DEFINE – DEFINIR EL PROCESO Y PROBLEMA RAÍZ

El primer paso en la metodología es identificar y definir claramente nuestro objetivo y alcance dentro de nuestras instalaciones. Se han definido los objetivos y el alcance del estudio, que consisten en realizar un análisis de los procesos actuales en la Instalación de Recuperación de Materiales (MRF) y utilizar herramientas de Lean Six Sigma para identificar áreas potenciales de mejora dentro de la instalación. El enfoque del proyecto se centra específicamente en el proceso de clasificación de esta instalación y sus tiempos de inactividad.

En esta fase, es fundamental considerar la participación de las partes interesadas (o “Stakeholders”, por su término en inglés) en el proceso de sorteo o clasificación de materiales. Se identificó y se involucró a las partes interesadas relevantes con un interés conferido en el proceso de clasificación de la MRF y su mejora. Estas partes interesadas incluyeron la gerencia de la MRF, el personal operativo y el personal de mantenimiento. La participación de las partes interesadas permitió integrar sus perspectivas y experiencias en el proceso de recolección de datos, mejorando así la validez y relevancia de los hallazgos. Con su conocimiento del proceso, se creó un SIPOC (Suplidores, Entradas, Proceso, Salida, Clientes) para comprender a grande escala la facilidad y, a su vez, el proceso de sorteo.



TABLA 1 – SIPOC DE LA FACILIDAD

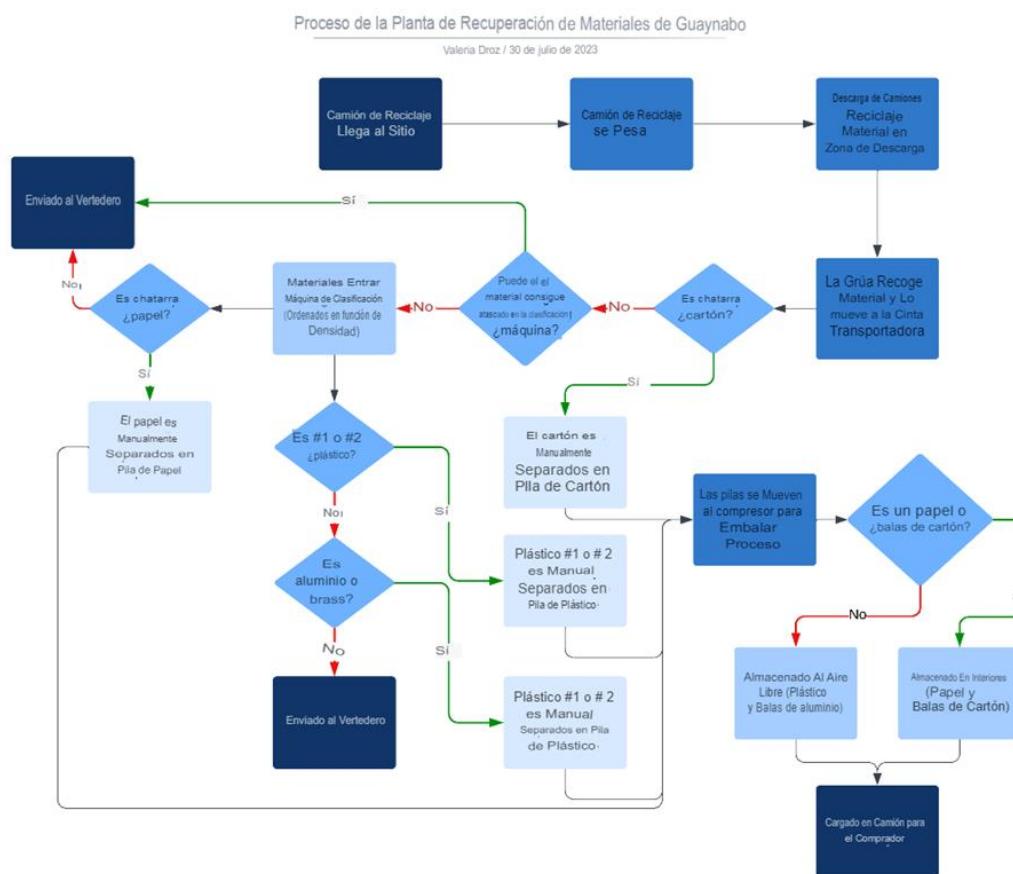
Elemento SIPOC	Descripción
Suplidores	Municipio de Guaynabo: Proporciona la instalación, agua y electricidad
	Municipios de Puerto Rico: Suministrar los materiales reciclables al MRF para su clasificación y procesamiento.
Entradas	Materiales reciclables: Incluye varios tipos de residuos recogidos de los municipios. Equipos de clasificación y empleados
Proceso	Camiones de reciclaje descargados en MRF Clasificación manual: Retire los artículos potencialmente peligrosos y separe el cartón Clasificación mecánica: materiales más ligeros para la clasificación de papel / materiales más pesados para plástico y aluminio Clasificación manual: papel separado o plástico y aluminio separados Comprimir en pacas
	Materiales no reciclables: transportados y desechados al vertedero
	Materiales clasificados: Papel, plástico, cartón y aluminio listos para la venta.
	Residuos de vertedero
	Municipios: Clientes primarios que pagan por los servicios de clasificación. Instalaciones de reciclaje (por ejemplo, Ifco): Clientes que compran materiales clasificados para su posterior procesamiento o exportación.
Salidas	
Clientela	

FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)

Luego, se creó un diagrama de flujo para mejor entender el proceso de la facilidad en su totalidad. A continuación, se presenta un diagrama de flujo que detalla los procesos actuales llevados a cabo en la MRF.



FIGURA 2: FLUJOGRAMA DE PROCESO DE LA MRF

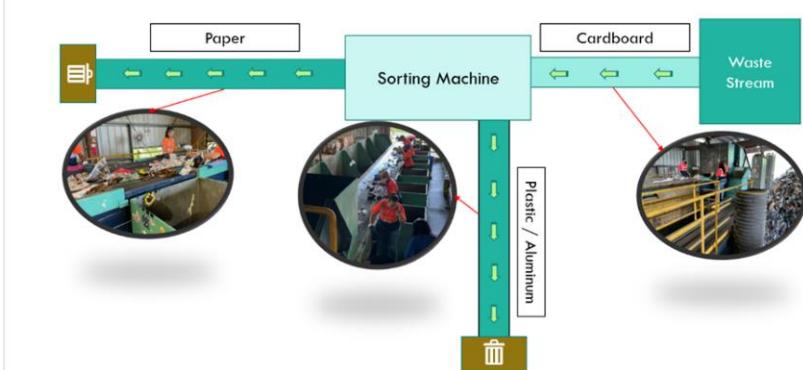


FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)

Para obtener una comprensión más detallada del proceso de clasificación, se creó un mapa del proceso de clasificación de la MRF, Figura 3, para entender mejor el flujo de desechos y la ubicación de las máquinas. Cada sección de la cinta transportadora cuenta con operadores especializados para clasificar los desechos correspondientes. El proceso comienza con 2 empleados separando cartón y contaminantes en el lado derecho de la instalación. Luego, una máquina clasifica el material según su densidad, donde 4-5 empleados clasifican los materiales pesados en una cinta transportadora (típicamente plástico y aluminio) 3-4 empleados clasifican los materiales ligeros en otra cinta (típicamente papel).



FIGURA 3 - MAPA DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN  
**MRF SORTING PROCESS LAYOUT**



FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)

Finalmente, en esta fase de definición, se formuló una declaración de problema concisa y práctica que refleje la esencia del enfoque de investigación en el proceso de clasificación de la MRF. La declaración del problema debe capturar los desafíos, ineficiencias o áreas de mejora identificadas en el proceso de clasificación actual. Esta declaración proporciona una dirección clara para los esfuerzos de recolección de datos, asegurando que dicha recolección sea propósito y esté enfocada en abordar los problemas identificados.

#### 2.1.1 Declaración del problema

Se concluyó que en la planta de reciclaje de materiales (MRF) ubicada en Guaynabo, Puerto Rico, se ha identificado un problema crítico relacionado con el tiempo de inactividad. Se observa un tiempo de inactividad frecuente y significativo durante el proceso de clasificación, pero sin medición exacta, lo que tiene un impacto adverso en la eficiencia operativa y la productividad. Los principales interesados han observado que las mayores causas de este tiempo de inactividad son los atascos en la cinta transportadora y el enredo de materiales inadecuados en la maquinaria de sorteo. Se estima que cada episodio de tiempo de inactividad tiene una duración promedio de 20 minutos y ocurre al menos dos veces al día. La falta de un seguimiento sistemático y una medición precisa dificulta el análisis y los esfuerzos de mejora. Este problema tiene un impacto financiero significativo ya que cada hora de producción, se gastan un total aproximado de \$437.50 USD, pues es esencial evitar



horas extras de trabajo para la demanda no cumplida. Es crucial resolverlo para optimizar el proceso de clasificación, aumentar la productividad y garantizar la satisfacción del cliente. Nuestro objetivo es reducir el tiempo de inactividad un 30%, lo que permitirá mejorar la eficiencia operativa y reducir costos adicionales asociados con el tiempo de inactividad y tiempos extra.

## 2.2 MEDICIÓN – RECOLECCIÓN DE DATOS

Con la información detallada del proceso y el problema claramente definido, pasamos a nuestra próxima etapa de medición. Se creó un plan de recolección de datos que fuera acorde a el problema del tiempo de inactividad frecuentes en el proceso. La siguiente imagen presenta un plan de recolección de datos para el proceso de clasificación en la MRF. Detalla cómo se recopilarán los datos en cada etapa, involucrando a los diferentes actores para garantizar un análisis riguroso y acciones efectivas de mejora. Es importante denotar que los datos fueron tomados en intervalos de una hora, durante los meses de diciembre a marzo.

TABLA 2 - PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Variable	Tipo de dato	Unidades	¿Dónde?	¿Cómo?	Tamaño de la muestra
Tiempo de inactividad en transportador de plástico	Continuo	min	Proceso de clasificación	Cronómetro y reloj portátil	10 días laborables o 30 muestras
Tiempo de inactividad en el transportador de papel	Continuo	min	Proceso de clasificación	Cronómetro y reloj portátil	10 días laborables o 30 muestras
Tiempo de inactividad en transportador de cartón	Continuo	min	Proceso de clasificación	Cronómetro y reloj portátil	10 días laborables o 30 muestras
Tiempo de inactividad en la máquina clasificadora	Continuo	min	Proceso de clasificación	Cronómetro y reloj portátil	10 días laborables o 30 muestras
Frecuencia del tiempo de inactividad	Discreto	conteo	Proceso de clasificación	Numeración en cuaderno	Como se observe

FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)



Con los datos recopilados se produjo la siguiente tabla de estadísticas descriptivas. Los datos presentados ofrecen información sobre el tiempo de diferencia (en minutos) en el proceso de clasificación para los diferentes materiales en la instalación de recuperación de materiales (MRF).

TABLA 3 - ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS

Statistics									
Variable	MATERIAL	Total	Count	Mean	StDev	Variance	CoefVar	Minimum	Q1
TIME DIFFERENCE(MIN)	Cardboard	30	2.022	2.250	5.064	111.28	0.450	0.973	
	Paper	52	2.692	3.930	15.445	145.98	0.520	0.897	
	Plastic	45	2.631	3.926	15.412	149.22	0.380	0.905	
Variable	MATERIAL	Median	Q3	Maximum					
TIME DIFFERENCE(MIN)	Cardboard	1.585	2.410	13.080					
	Paper	1.260	2.947	25.200					
	Plastic	1.330	3.350	25.820					

FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)

Las estadísticas descriptivas revelaron un patrón evidente en las duraciones de tiempo de inactividad para diferentes materiales en el proceso de clasificación. El cartón tenía un tiempo de inactividad promedio de aproximadamente 2.02 minutos con una desviación estándar de 2.25 minutos, mientras que el papel mostró un tiempo de inactividad promedio de 2.69 minutos con una desviación estándar de 3.93 minutos. El plástico exhibió un tiempo de inactividad promedio de 2.63 minutos con una desviación estándar de 3.92 minutos. Aunque sus tiempos de inactividad promedio eran relativamente similares, las desviaciones estándar más grandes para el papel y el plástico indicaban una variabilidad más significativa en sus duraciones de tiempo de inactividad. Además, los valores máximos de tiempo de inactividad para el papel (25.20 minutos) y el plástico (25.82 minutos) fueron sustancialmente más altos que el tiempo de inactividad máximo del cartón de 13.08 minutos. Estas cifras destacaron la variabilidad en las duraciones de tiempo de inactividad entre los diferentes materiales, sugiriendo períodos ocasionales más largos de inactividad para el papel y el plástico en comparación con el cartón.

A continuación, se presenta una tabla que resume las estadísticas clave relacionadas con el tiempo de inactividad en nuestro proceso de clasificación de materiales, incluye los 127 datos obtenidos de los tiempos de inactividad para cartón, papel y plástico. Para formular la siguiente tabla se tomó en consideración que la planta cuenta con una jornada de trabajo



de 8 horas en el proceso de clasificación. Estos números proporcionan una visión detallada de la eficiencia de nuestro sistema.

TABLA 4 – TIEMPOS PROMEDIO DE INACTIVIDAD

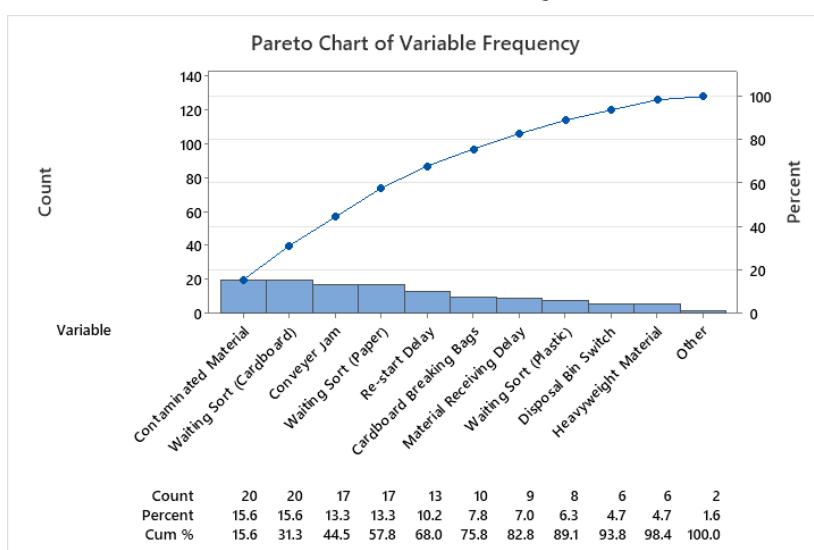
	Frecuencia Promedio (1hr)	"Downtime" (DT) Promedio	Min DT por Hora	Min DT por Turno	En Horas
Cartón	2.73	2.02	5.52	44.12	0.74
Papel	4.73	2.69	12.72	101.78	1.70
Plástico	4.09	2.63	10.76	86.10	1.43
Promedio de DT por turno (8hrs) en hr:					3.87

FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)

### 2.3 ANÁLISIS – IDENTIFICACIÓN DE LA CAUSA RAÍZ

Posteriormente, en la etapa de análisis, daremos un paso más allá para profundizar en los datos recopilados y las estadísticas descriptivas obtenidas anteriormente. Nuestro enfoque se centrará en identificar las causas primordiales de los tiempos de inactividad en el proceso de clasificación de la MRF. Comenzaremos esta fase con gráficos de Pareto para mejor analizar las variables del porqué de los tiempos de inactividad. Primeramente, se creó un gráfico de Pareto con las variables y su frecuencia, como se muestra en la figura 4. Esta enseña dos razones más frecuentes de tiempos de inactividad en el proceso, primero es el tener que parar y descartar el “material contaminado” antes de que llegue a la máquina sorteadora, para evitar enredos. Segundo es el tiempo de inactividad de las áreas de plástico y papel porque “clasificar cartón” puede tomar tiempo.

FIGURA 4: GRÁFICO DE PARETO SOBRE FREQUÊNCIA DE LAS VARIABLES

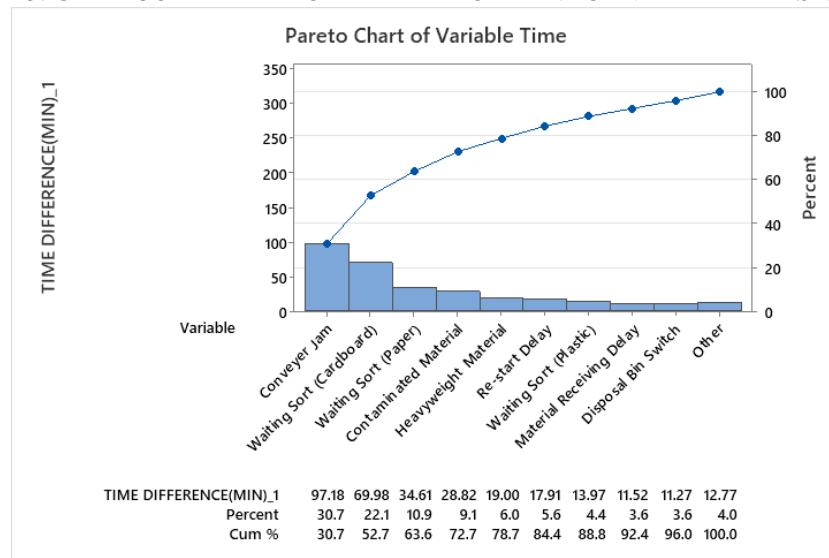


FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)



Luego, se creó otro grafico de Pareto, pero tomando en consideración cuál de las variables fue la que mayor tiempo tomó, ver Figura 5. La razón que mayor tiempo de inactividad causó fue el atasco del cinturón de coveyer. Este es seguido por la “clasificación del cartón” ya que el cartón puede ser físicamente desafiante para los trabajadores.

FIGURA 5: GRÁFICO DE PARETO DEL TIEMPO DE INACTIVIDAD DE LAS VARIABLES

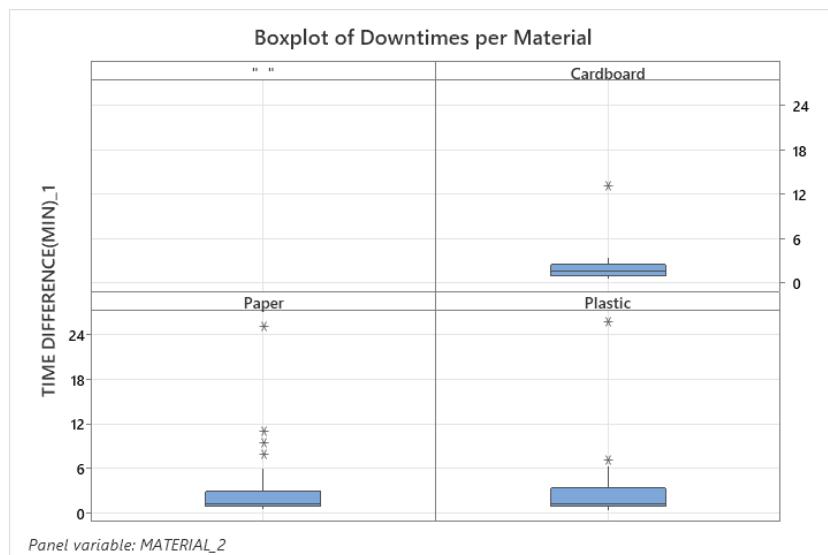


FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)

Próximamente, en la figura 6, se creó un diagrama de caja. Este diagrama presenta la distribución de los datos y los valores atípicos de los datos recolectados de cada material. Se observa que el material con la mayor cantidad de valores atípicos es “papel” con cuatro valores atípicos. Las razones de estos valores atípicos fueron debidamente documentados. Las causas incluyen material mojado que no llegaba al área de papel ya que era muy pesado en la maquina sorteadora y atascos en la cinta transportadora. La distribución de los datos de tiempos de inactividad se asimila entre si sin importar el material.



FIGURA 6: GRÁFICO DE CAJA SOBRE TIEMPO DE INACTIVIDAD



FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)

Finalmente, se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) como una herramienta estadística para examinar las diferencias significativas entre los tiempos de inactividad de distintos materiales en el proceso de clasificación de la MRF. Se obtuvo un P-valor de 0.694, lo que sugiere que no había suficiente evidencia para afirmar que existían diferencias significativas en los tiempos de inactividad entre las categorías de "Material". Asimismo, el valor F de 0.37 indicó que la variabilidad dentro de los grupos podía ser similar o mayor que la variabilidad entre los grupos, lo que también respaldaba la idea de que no había diferencias significativas en las medias.

TABLA 5: ANÁLISIS DE VARIANZA

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
MATERIAL	2	9.52	4.758	0.37	0.694
Error	124	1612.69	13.006		
Total	126	1622.20			

FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR (2023)

Estos resultados nos llevaron a concluir que, en términos estadísticos, los tiempos de inactividad entre los materiales diferentes en el proceso de clasificación de la MRF eran comparables y no mostraban variaciones significativas entre ellos. Estos resultados fueron de esperarse ya que el proceso de clasificación está todo conectado entre sí, comenzando con



el área de Cartón, el área con paros de trabajos frecuentes, dejando a las áreas de Papel y Plástico con tiempo de inactividad.

#### 2.4 MEJORAS – RECOMENDACIONES Y ESTRATEGIAS

Luego de nuestro análisis, se identificaron varias recomendaciones clave para establecer en la fase de Mejora. Estas recomendaciones están diseñadas para optimizar nuestros procesos operativos y mejorar la eficiencia de nuestra fuerza laboral.

En primer lugar, se propone la implementación de programas de capacitación continuos y trimestrales para nuestros operadores en todas las áreas. Estos programas están diseñados para mejorar sus habilidades y conciencia, lo que les permitirá abordar de manera más efectiva y rápida los problemas operativos a medida que surjan. Además, sugerimos un cambio en nuestra actual estrategia de mantenimiento reactiva a una estrategia proactiva. Esto significa reemplazar el equipo antes de que se averíe para minimizar los tiempos de inactividad no planificados y mejorar la eficiencia general del equipo.

Otro aspecto fundamental implica fortalecer nuestra colaboración con los proveedores de residuos. Esta colaboración tiene como objetivo mejorar la calidad de los materiales entrantes, reduciendo así los atascos y retrasos en las operaciones de procesamiento. Para fortalecer aún más la eficiencia, se sugiere la implementación de un sistema de seguimiento de tiempos de inactividad que utilice códigos QR (Figura 7) en cada máquina. Este sistema ayudará a identificar patrones y áreas críticas que requieren atención, facilitando estrategias más efectivas de gestión de tiempos de inactividad que involucren a todas las partes interesadas.

FIGURA 7 – QR CODE



FUENTE: PREPARADO POR EL AUTOR



En cuanto a la eficiencia de la fuerza laboral, recomendamos agregar un empleado adicional a nuestro proceso de clasificación. Esta adición agilizará las operaciones y mejorará la productividad general.

Además, para respaldar estas mejoras operativas, proponemos invertir en dos mejoras clave en equipos. El primero es un Abre Bolsas Industrial (Figura 8), que separa y abre mecánicamente las bolsas, lo que permite una clasificación y procesamiento más eficiente de varios materiales de desecho. Se estima que este equipo tendrá un costo aproximado de \$30,000.

FIGURA 8: IMAGEN DEL ABRE BOLSAS



FUENTE: FOR REC RECYCLING SYSTEMS

Además, recomendamos adquirir un Cepillo Industrial Motorizado (Figura 9) para abordar los desafíos relacionados con el retroceso y el derrame de material, con un costo estimado de \$5,000.

FIGURA 9: IMAGEN DE INSTALACIÓN DE CEPILLO



FUENTE: HOVERDALE



## Inversión:

Costos anuales de capacitación: \$3,700

Costo de empleado: \$29,120

Costos totales de la máquina: \$35,000

Costos de mantenimiento anual: \$1,500

**Costo total: \$69,320**

## 2.5 CONTROL – MANTENER Y MEDIR

En la fase de Control, el enfoque se desplaza hacia asegurar el éxito sostenido de las mejoras implementadas a través de una monitorización efectiva, evaluación y optimización continua.

La gestión debe adoptar varias estrategias clave para lograr este objetivo. En primer lugar, se recomienda implementar una Estrategia de Mantenimiento Predictivo, aprovechando el análisis de datos para anticipar problemas con el equipo, reduciendo los tiempos de inactividad no planificados y optimizando las operaciones en general.

Además, es esencial establecer Procedimientos Operativos Estándar (SOPs) claros y llevar a cabo capacitaciones regulares para capacitar a los operadores en la gestión efectiva de situaciones de tiempo de inactividad. Esto garantiza que el personal esté preparado para abordar cualquier problema de manera eficiente.

Otro aspecto importante en esta fase es la realización de reuniones periódicas de revisión y seguimiento, donde se evalúan las mejoras implementadas, se analizan los Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) y se ajustan las estrategias para lograr una reducción continua de los tiempos de inactividad. Estas medidas son esenciales para mantener y mejorar la eficiencia operativa a lo largo del tiempo y garantizar el éxito continuo de las mejoras implementadas.



### 3 RESULTADOS

A la fecha de este artículo, la etapa de Mejora propuesta aún no ha sido

$$1.16 \text{ hr} * 260 \text{ días laborales} = \mathbf{301.6 \text{ hr recuperadas}}$$

completamente implementado en la Instalación de Recuperación de Materiales (MRF) de Guaynabo y actualmente se encuentra en proceso de implementación. Sin embargo, lograr una limpieza efectiva de las cintas transportadoras en una Planta de Recuperación de Materiales (MRF) que enfrenta una constante contaminación puede marcar una gran diferencia, potencialmente resultando en una notable reducción en el tiempo de inactividad. Los puntos de referencia (o “benchmarks” en inglés) de la industria y los análisis operativos, como los destacados por Koussaimi et al. en 2016, sugieren que esta reducción puede variar desde un 20% hasta un 50% o incluso más. En nuestro caso, se eligió una estimación conservadora de una reducción del 30% en el tiempo de inactividad y un aumento subsiguiente en la productividad para calcular el Retorno de la Inversión (ROI). Esta elección se basó en la falta actual de procedimientos sólidos de limpieza de cintas

$$3.87 \text{ hr/día downtime} * 30\% = \mathbf{1.16 \text{ hr/día downtime reducción}}$$

transportadoras en la MRF y en el problema generalizado de corrientes de residuos entrantes contaminadas con materiales no reciclables.

Cuando hacemos los cálculos, el impacto se vuelve aún más claro. Al multiplicar las horas de tiempo de inactividad evitadas, que suman un total de 301.6 horas, por el costo operativo por hora de \$437.50, llegamos a un ahorro anual sustancial de aproximadamente \$131,950. Esto no solo subraya los beneficios financieros de invertir en la limpieza de cintas transportadoras, sino que también destaca su potencial para mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad de la MRF.

$$\$97,630 \text{ ahorro} - \$35,000 \text{ costo maquinaria} = \mathbf{\$62,630 \text{ Ahorro Primer Año}}$$

$$\$131,950 \text{ ahorro} - \$34,320 \text{ costos anuales} = \mathbf{\$97,630 \text{ Ahorro Anual (despues de 1 año)}}$$

### 4. DISCUSSION

En el panorama actual de Puerto Rico, la gestión de residuos sólidos representa un desafío significativo. En particular, las instalaciones de recuperación de materiales (MRF) que desempeñan un papel esencial en el reciclaje, pero se enfrentan a una problemática



recurrente de tiempos perdidos durante el proceso de clasificación. Esta problemática no solo afecta la eficiencia operativa, sino que también implica costos adicionales y el riesgo de acumulación de residuos no procesados. En respuesta a esta situación, hemos optado por implementar la metodología Lean Six Sigma, un enfoque que ha demostrado éxito en diversos sectores pero que ha sido poco explorado en la industria de residuos sólidos.

Nuestro objetivo principal ha sido adaptar y personalizar la metodología Lean Six Sigma para el contexto específico de las MRF, con el fin de identificar y abordar las causas fundamentales de los tiempos de inactividad. Nuestra investigación del proceso de clasificación y la recopilación de datos revelaron que los atascos en las cintas transportadoras y los problemas en la clasificación del cartón eran las principales fuentes de tiempo perdido.

A partir de estos hallazgos, se formularon recomendaciones concretas y prácticas. Para prevenir los atascos, enfatizando la importancia de un mantenimiento y limpieza regular de las cintas transportadoras. Además, hemos propuesto la asignación de personal específico para la clasificación de cartón, con el objetivo de minimizar retrasos en esta etapa crucial del proceso.

Actualmente, estamos en la fase de implementación de estas recomendaciones, y nuestras expectativas son alentadoras. Proyectamos una reducción sustancial de los tiempos de inactividad, lo que podría resultar en un ahorro anual de aproximadamente 301.6 horas y alrededor de \$97,630 en costos de producción. Estamos confiados en que el retorno de inversión se materializará en un período de menos de 1 año.

Nuestra incursión en Lean Six Sigma ha demostrado ser prometedora para optimizar el proceso de clasificación en las MRF. Esperamos que este estudio contribuya al conocimiento en el ámbito de la gestión de residuos sólidos y sirva de inspiración a otras instalaciones para adoptar estrategias similares, promoviendo así una mayor eficiencia y sostenibilidad ambiental en toda la industria.

## 5 CONCLUSION | CONCLUSÃO | CONCLUSIÓN

En respuesta a los desafíos que enfrenta la industria de gestión de residuos, esta investigación se centró en mejorar las operaciones de la Planta de Recuperación de Materiales (MRF) mediante la aplicación de los principios de Lean Six Sigma. Dentro del

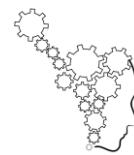


marco de DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar), nuestro estudio se enfocó en abordar y mitigar los problemas de tiempo de inactividad que son comunes durante el proceso de clasificación en la MRF de Guaynabo, Puerto Rico.

Las principales conclusiones de este esfuerzo son significativas. A través de un análisis meticuloso, identificamos con éxito las causas fundamentales del tiempo de inactividad, destacando los atascos en las cintas transportadoras, los enredos de materiales y las demoras en la clasificación de cartón como los principales culpables. Armados con estos conocimientos, formulamos una serie de recomendaciones concretas diseñadas para lograr mejoras tangibles. Estas recomendaciones abarcan programas de capacitación continua para empoderar a la fuerza laboral, un cambio hacia estrategias de mantenimiento proactivo para reducir los tiempos de inactividad no planificados, una colaboración fortalecida con proveedores para mejorar la calidad de los materiales y la integración de equipos especializados como el Abre Bolsas Industrial y el Cepillo Industrial Motorizado para agilizar las operaciones.

El impacto de estos esfuerzos es convincente. El estudio proyecta una sustancial reducción del 30% en el tiempo de inactividad, lo que se traduce en un ahorro estimado anual de aproximadamente \$97,630, teniendo en cuenta el retorno de la inversión. Este cálculo exhaustivo del ROI considera tanto el costo de implementar mejoras operativas como la adquisición de equipos especializados, subrayando los considerables beneficios financieros que se pueden lograr a través de la exitosa integración de las metodologías de Lean Six Sigma.

Más allá de sus implicaciones financieras, esta investigación destaca el valor inherente de Lean Six Sigma en la optimización de las operaciones de la MRF. No solo proporciona conocimientos invaluables para la industria, sino que también pone de relieve el potencial de mejoras impulsadas por datos en las prácticas de gestión de residuos. Además, es importante señalar que estos esfuerzos se alinean estrechamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS), en particular el ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y el ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles), enfatizando el impacto positivo más amplio en la sociedad y el medio ambiente que se puede lograr a través de estas iniciativas.



## FUNDING| FINANCIAMIENTO | FINANCIAMIENTO

Estoy sumamente agradecida por el programa "The Undergraduate Research Program for Honor Students" (URP-HS) por financiar mi trayectoria académica. Este programa, en línea con los objetivos de la beca SAFRA II, del College of Engineering and Geomatic Sciences, me ha brindado una experiencia universitaria enriquecedora.

## RECONOCIMIENTOS

A mis padres, gracias por su apoyo incondicional. Agradezco también a la profesora Hanna Rodríguez por su valiosa ayuda en la industria de residuos sólidos. Igualmente agradezco a la Dra. María García por su mentoría.

## AUTHORS' CONTRIBUTIONS | CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES | CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Yo, Valeria N. Droz Cruz, conceptualicé y diseñé el estudio, llevé a cabo la recopilación y el tratamiento de datos, así como la redacción del manuscrito. Además, realicé la revisión del contenido para asegurar su calidad y coherencia.

Además, quiero reconocer el valioso apoyo y guía proporcionados por mi mentora, María M. García Sandoval, quien me brindó una orientación invaluable durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y comentarios fueron fundamentales para mejorar la calidad y la precisión de este trabajo.



## REFERENCIAS

- American Society for Quality. **Continuos Improvement**. (2022). Disponível em <<https://asq.org/quality-resources/continuous-improvement>>. Acesso em 18 novembro 2022.
- Burke, S. E., & Silvestrini, R. T. **The define, measure, analyze, improve, control (DMAIC) process**. (2017). Disponível em <<https://asq.org/quality-resources/dmaic>>. Acesso em 25 novembro 2022.
- CHAN, Kwok Loon et al. A characterization of the recycling sector in puerto rico. **Yale school of Forestry and Environmental studies**, 2006.
- Closed Loop Partners. **Recycling Infrastructure in Puerto Rico**. (2020). Disponível em <[https://www.closedlooppartners.com/wp-content/uploads/2020/06/Recycling\\_PR-Project\\_May-26-1.pdf](https://www.closedlooppartners.com/wp-content/uploads/2020/06/Recycling_PR-Project_May-26-1.pdf)>. Acesso em 24 agosto 2022.
- EPA & FEMA. **GFX ES Solid Waste Management in Puerto Rico**. (2020). Disponível em <<https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-09/gfx-es-solid-waste-management-in-puerto-rico.pdf>>. Acesso em 17 agosto 2022.
- FRANCHETTI, Matthew; BARNALA, Pukhraj. Lean Six Sigma at a material recovery facility: a case study. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 4, n. 3, p. 251-264, 2013.
- KOUSSAIMI, My Abdelbar; BOUAMI, Driss; ELFEZAZI, Saïd. Improvement maintenance implementation based on downtime analysis approach. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 22, n. 4, p. 378-393, 2016.
- MAWER, Byron et al. Coastal Park Materials Recovery Facility-an example of sustainable innovation in solid waste management. **Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese**, v. 28, n. 7, p. 13-18, 2020.
- WOODRUFF, Everett Bowman; LAMMERS, Herbert B.; LAMMERS, Thomas F. **Steam-plant operation**. New York: McGraw-Hill, 1998.