

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Mejora de la productividad en el reaprovechamiento de
neumáticos: implementación de herramientas Lean Six Sigma en
una empresa de reciclaje de Neumáticos Fuera de Uso (NFU)**

**Estefano Armando Jara Arias
Angel Humberto Miranda Terán**

Ingeniería Industrial

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
INGENIERO INDUSTRIAL

Quito, 18 de mayo de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Mejora de la productividad en el reaprovechamiento de neumáticos:
implementación de herramientas Lean Six Sigma en una empresa de
reciclaje de Neumáticos Fuera de Uso (NFU)**

Estefano Armando Jara Arias

Angel Humberto Miranda Terán

Nombre del profesor, Título académico

Pablo Sebastián Burneo Arteaga, MEM

Quito, 18 de mayo de 2021

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Estefano Armando Jara Arias

Código: 00137410

Cédula de identidad: 1721776076

Nombres y apellidos: Angel Humberto Miranda Terán

Código: 00137511

Cédula de identidad: 1724769680

Lugar y fecha: Quito, 18 de mayo del 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017)

Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En la actualidad, el mercado de reciclaje tiene una tendencia de crecimiento sobre el 5% anual (Grand View Research, 2020), esto obliga a las empresas que se encuentran en esta industria buscar métodos que les permita aumentar su productividad. Este estudio examina como optimizar procesos de reciclaje de una empresa recicladora de neumáticos fuera de uso NFU. Para esto se implementaron herramientas Lean Six Sigma bajo la metodología DMAIC, completando las primeras cuatro fases; definir, medir, analizar y mejorar. Para identificar y desarrollar el plan de mejoras se realizó un levantamiento del proceso mediante el mapeo de la cadena de valor con un VSM, definiendo las oportunidades en base a los tiempos de ciclo y un análisis del porcentaje de valor agregado de las actividades. Adicionalmente se evaluó la eficiencia en el aprovechamiento de recursos con una métrica cuantitativa denominada *waste efficiency*. Se identificaron problemas principalmente en el área de molienda y tamizado que fueron tratados mediante la implementación de mejoras de rápida implementación. Se utilizaron herramientas como 5s, Poka-yoke, SMED, entre otras, para aumentar la productividad (en base a su producción diaria) en un 9%. También se consiguió aumentar el índice *waste efficiency* en un 3%.

Palabras clave: DMAIC, Lean, NFU, Reciclaje, Six Sigma, SMED, VSM, Waste Efficiency

ABSTRACT

Nowadays, the recycling market has a growth tendency over 5% per year (Grand View Research, 2020). This has encouraged companies in this industry to research new methods that allows them to increase their productivity. This study focuses on how to optimize the recycling process of an end-of-life tire recycling facility. In this case, the four first stages were completed; define, measure, analyze and improve. To identify and develop the improvement plan, a process survey was carried out by mapping the value chain with a VSM. The improvement opportunities were identified based on cycle times and an analysis of the value-added percentage. Additionally, there was an evaluation of a quantitative metric know as waste efficiency that measures how well the materials are being used in the context of recycling. Finally, through the implementation of quick wins, based on tools such as 5s, Poka-yoke, SMED, among others, it was possible to increase productivity (based on daily production) by 9%. The waste efficiency index was also increased by 3%.

Key words: DMAIC, End-of-life Tires, Lean, Recycling, Six Sigma, SMED, VSM, Waste Efficiency

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. REVISIÓN LITERARIA	12
3. METODOLOGIA.....	14
3.1. Definir	14
3.2. Medir	15
3.3. Analizar	16
3.4. Mejorar	16
4. RESULTADOS	16
4.1. Definir	16
4.2. Medir	20
4.3. Analizar	23
4.4. Mejorar	26
5. CONCLUSIONES	32
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
7. ANEXO A: PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS	40
8. ANEXO B: DATOS RECOLECTADOS.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Voz del cliente	18
Tabla 2: Project Charter	20
Tabla 4: Plan de recolección de datos (tiempos)	40
Tabla 5: Plan de recolección de datos (materiales).....	41
Tabla 6: Tiempo de traslado de tiras.....	42
Tabla 7:Tiempo de corte en chips	42
Tabla 8: Tiempo de traslado de chips	43
Tabla 9: Tiempos de corte en chips	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama del proceso de trituración mecánica	17
Figura 2: Árbol de CTQs	19
Figura 3: Número recomendado de ciclos de observación.	21
Figura 4: VSM	22
Figura 5: Tiempos de ciclo	24
Figura 6: Diagrama de causa y efecto	25
Figura 7: 5S's en el área de chips (antes y después)	26
Figura 8: Soldadura de metal en zona de tamizado	27
Figura 9: SMED aplicado al tiempo de preparación de la máquina trituradora.	28
Figura 10: Tabla de control de los materiales críticos de la empresa.	30
Figura 11: Calendarización de actividades dispuestas para una semana.	30

1. INTRODUCCIÓN

La industria del reciclaje conformó un mercado mundial que vale más de 53,71 billones de dólares en el año 2019 y prevé crecer anualmente 5,2% hasta el año 2027 (Grand View Research, 2020). Es la única industria que no ofrece un producto final a partir de materia primas encontradas en estado natural (EPA, 2018); los productos son regenerados de material usado. Esto se lo hace para que tengan una nueva vida útil y retrase la contaminación mundial (EPA, 2018). Actualmente, se pueden encontrar productos fabricados con material reciclado, la mayoría son destinados a la industria del arte y del deporte (University of Tennessee, 2019).

Uno de los residuos más complicados de aprovechar ha sido el caucho, solo por encima de los residuos electrónicos y el plástico (Franco, 2015), y más aún si se los tiene que reciclar en forma de llantas. La continua industrialización, rápida urbanización y expansión de ciudades (Grand Review Research, 2020) es la principal característica para visualizar el aumento de vehículos motorizados, por ende, el constante cambio de llantas para tener un vehículo en correcto funcionamiento. La vida útil de las llantas de los vehículos es de aproximadamente 40.000 kilómetros (Proaño & Stacey, 2011), esto es para los automóviles que pertenecen a los segmentos A hasta D, es decir, automóviles pequeños con capacidad de máximo 4 personas y con carrocería monovolumen – no micro coches – hasta automóviles con capacidad de máximo 6 personas y con carrocería tipo familiar o sedán (Long, 2001). Según el anuario de AEADE “Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador” del año 2019, en el Ecuador se desecharon 2.185.376 llantas que pasaron a ser Neumáticos Fuera de Uso (NFU). En Quito, el equivalente es de 601.096 llantas que representa el 28% de todas las llantas desechadas a nivel nacional (Proaño & Stacey, 2011).

Un hito importante dentro de las regulaciones de reciclaje hacia esta industria en el país se da en el año 2013, cuando el Ministerio del Ambiente del Ecuador expide el Acuerdo

Ministerial N°20, en donde resalta que todo productor o importador de llantas se debe hacer cargo del 20% de llantas fuera de uso que se produzcan en ese año (Franco, 2015). Antes de esta regulación, en el Ecuador se reciclaba menos del 10% de NFU cada año y para el año 2019 se reciclaron en todo ese periodo de tiempo 45% de las llantas desechadas (AEADE, 2019). La industria del reciclaje de llantas es muy amplia y existen diversas formas de reutilizarlo. El 40% se recicla mediante pirólisis (descomposición molecular), el 27% se hace granulado (se convierte en materia prima para diversos usos), el 25% se forma cogeneración de energía eléctrica y térmica, mientras que el 8% restante se lo utiliza para artesanías (AEADE, 2019).

El estudio que se presenta a continuación fue realizado en una empresa ecuatoriana recicladora de llantas fuera de uso o NFU. Esta empresa se dedica a la transformación de las llantas en polvo y granulado de caucho, que son los principales productos que comercializa la empresa. Cabe recalcar que la empresa utiliza el método de trituración o desgarro (Tire Recycling Machines, 2020) y utilizan una máquina de pequeña escala para el funcionamiento, la cual procesa alrededor de 1 tonelada diaria. Las limitaciones de la empresa se dan en que, teniendo una fábrica funcional, no tienen un método claro de cómo manejar las actividades relacionadas al reciclaje para aprovechar la máxima capacidad tanto de las máquinas, como el manejo del personal. De igual forma se ha mencionado una preocupación por los tiempos de preparación de las maquinarias y el desperdicio generado por las mismas. Así, la pregunta de este estudio que guio el trabajo fue: ¿La empresa ecuatoriana de reciclaje de NFU está operando a su máxima capacidad o existen ciertas condiciones para hacer que aumente la productividad, con las mismas condiciones de calidad preestablecidas, bajo la configuración de operación actual?

En la presente investigación utiliza la metodología DMAIC soportado en los principios de Lean Manufacturing y Six Sigma alineados hacia la sustentabilidad. La manufactura verde alinea a los principios de Lean y Six Sigma, en conceptos de ahorrar recursos y reducir defectos

respectivamente (Bhuiyan & Baghel, 2005). Sin embargo, se debe considerar que el objetivo principal del estudio es el de aumentar la productividad y como menciona Chunagi, et al. (2016) en su publicación de “*Investigating the green impact of Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma*” se considerará a todo logro en beneficio del medio ambiente como una consecuencia de los procesos implementados de manera responsable y eficaz.

2. REVISIÓN LITERARIA

Para conocer el funcionamiento de una empresa recicladora de neumáticos es necesario tomar en cuenta los insumos principales, que en este caso son los neumáticos que entran a las instalaciones para ser procesados. Se puede identificar que existen tres tipos de neumáticos que comúnmente son desechados; neumáticos de autos, neumáticos de camiones y camionetas y por último aquellos denominados neumáticos todo terreno (Fazli & Rodrigue, 2020). La principal razón para ser catalogados en esas tres grandes subdivisiones es por su composición. Las dos más comunes que se encuentran en una recicladora corresponden a los neumáticos de autos y camiones (o camionetas). Las cuales cuentan con un gran factor que las diferencia; el porcentaje de metal, donde las llantas de vehículos pequeños poseen en promedio un 10% menos que a su vez se ve compensado con mayor cantidad de fibra textil (Fazli & Rodrigue, 2020).

Existen varios métodos para tratar los neumáticos, entre ellos: termólisis, pirólisis, Incineración, trituración criogénica, trituración mecánica y otras formas y procesos para el reaprovechamiento de estos (Castro, 2007). La trituración mecánica ofrece un beneficio sobre las técnicas químicas y es que el producto final (granos de caucho, metales, fibra) sale libre de impurezas y por eso puede ser fácilmente utilizado en otras aplicaciones (Castro, 2007). Para realizar este proceso las llantas pasan por una etapa de preparación donde se cortan en piezas pequeñas, posteriormente entran a un ciclo donde son molidos por cuchillas metálicas y

tamizados para separar el desperdicio del producto útil que consiste en una mezcla de grano de caucho con polvo y fibra textil (Proaño, Stacey, & Galarraga, 2011). Estos también deben ser separados pues sus aplicaciones y usos en la industria son diferentes en cada caso. El uso más común de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos es como aditivo para el asfalto en carreteras (EPA, 2016). También puede ser usado de combustible pues su calor específico supera al carbón. Existen nuevos estudios que evalúan su uso como aislantes eléctricos al ser mezclados con compuestos poliméricos manteniendo los estándares de la industria (Marin, et al., 2020).

Dada la alta demanda para el reciclaje de NFU y la amplia aplicabilidad y usos que se le puede dar a los productos que se recuperan de los neumáticos existe una gran oportunidad para las empresas. Sin embargo, para maximizar las ventajas económicas es necesario contar con procesos y procedimientos que se beneficien al máximo de los recursos; no solo de la materia prima, también de los recursos humanos y tiempo que se emplea para las actividades. Son esas las condiciones donde la filosofía de Lean Manufacturing tiene un rol importante. No obstante, no existe una gran cantidad de estudios realizados en miras de la industria del reciclaje (Chugani, Kumar, Garza, Rocha, & Upadhyay, 2017).

Lean Six Sigma se basa en el concepto de que las empresas puedan tener mejores resultados cuando enfocan las actividades a generar valor agregado para el cliente (Hartung, 2010). Esta filosofía de trabajo viene respaldada con la aplicación de herramientas de medición, análisis y mejora de procesos que permiten identificar la problemática y ejecutar acciones correctivas. Algunas de ellas son VOC, que permite conocer las necesidades del cliente, VSM, que identifica las actividades del proceso haciendo énfasis en tiempos de ciclo, inventarios y considerando el proceso global un y no actividades de forma independiente (López, 2007), diagrama de Pareto e Ishikawa, para determinar las causas raíz, y soluciones como 5s y SMED que contribuyen a la mejora del proceso.

Haciendo referencia a los beneficios que se pueden obtener con la implementación de un proyecto Lean Six Sigma, se encontró que en la industria de procesamiento de plásticos existió una reducción del 50% en los desperdicios (Hamad et al., 2021). Enfocándose más en la industria del reciclaje se encontró que, en un caso de estudio realizado por The University of Toledo (Ohio, USA), mediante la aplicación del ciclo DMAIC y otras herramientas relacionadas Lean Manufacturing, se puede incrementar la productividad de los procesos en un promedio de 7.23% (Franchetti & Barnala, 2013). Adicionalmente se menciona que con la implementación se llega a una reducción del costo anual de USD 65.000 (Franchetti & Barnala, 2013).

3. METODOLOGIA

La metodología propuesta para resolver la pregunta de investigación es el ciclo DMAIC. Esta consta de 5 etapas, que son: definir, medir, analizar, implementar y controlar (Pande *et al.*, 2000). Se habla de la metodología como un ciclo, porque se lo puede usar reiteradas veces para implementar los cambios necesarios para mejorar el rendimiento de la compañía (Pande *et al.*, 2000). Es una de las más usadas en proyectos de mejoramiento continuo, porque le da al investigador una visión sistemática de todo el proceso que se desea perfeccionar.

El estudio contemplará la investigación y desarrollo de las 4 primeras etapas de esta metodología. El quinto paso no se lo desarrollará, principalmente debido a restricciones de tiempo.

3.1. Definir

Como primer paso, se debe identificar el proceso crítico a mejorar y las necesidades las cuales se deben satisfacer tanto a los clientes internos como externos (Den Boer, 2006). Para esto se necesitan definir métricas que ayuden a visualizar el estado actual del proceso. Algunas

herramientas que facilitan el levantamiento de esta información son el VOC (voz del cliente) y el árbol de CTQ's. Otra herramienta que sirve como guía para establecer los límites del estudio y los responsables de cada periodo del proceso es el Project Charter (Found & Harrison, 2012).

Finalmente, el uso de un diagrama de flujo permite analizar y observar el proceso a más detalle, así logrando cumplir con el objetivo o entregable de esta fase. Dicho objetivo es identificar el proceso, sus características claves y distinguir métricas medibles (Pyzdek & Keller, 2009).

3.2. Medir

En esta fase se recolectan los datos que serán analizados para conocer la línea base de operación de la empresa (Duggan, 2012). La utilización del VSM (Value Stream Mapping) permite evidenciar de forma clara los problemas de flujo y medir el valor agregado a través de la medición de los tiempos de ciclo; algo que no se muestra en otras herramientas de diagramación de procesos. Además, ayuda en la identificación de oportunidades de mejora dentro de los flujos de materiales e información y en la creación de un estado futuro compartido que conlleva a mejorar la productividad (Rother & Shook, 1999). Esto la convierte en una herramienta de diagramación sistémica.

El complemento para esta etapa es el análisis de una métrica cuantitativa (Wan & Chen, 2008), que permite identificar la eficiencia de la empresa. El uso del *waste efficiency* en proyectos relacionados a reutilización de materiales orgánicos o inorgánicos ayuda a establecer una base para saber si los desechos serán reaprovechados en su totalidad, midiendo el porcentaje máximo que se recicla de todo el material (Norhzarina et al., 2020).

3.3. Analizar

En el análisis se utilizan las 7 herramientas de calidad para identificar las causas raíz que ocasionan las fallas de productividad (Pyzdek & Keller, 2009). El uso del diagrama de Pareto que usa la famosa regla 80:20, la cual menciona que el 80% de los problemas vienen dados por el 20% de los procesos es importante para identificar los principales motivos de fallas, sin realizar un análisis exhaustivo. El uso de la estadística descriptiva permitió el análisis en base a los tiempos recolectados y a los datos de materiales procesados.

De igual manera, el uso del diagrama de pescado o Ishikawa clasifica los principales motivos de acuerdo con su naturaleza (hombre, máquina, medio ambiente, medida, material, método) (Franchetti & Barnala, 2013).

3.4. Mejorar

La última etapa de desarrollo contempla la ejecución de mejoras para incrementar la productividad del sistema (Jamil *et al.*, 2020). Para este caso se usarán herramientas como 5s, eventos Kaizen, Pokayoke, VSM, FMEA y Pilot checklist que son instrumentos de fácil uso, económicamente viables y que pueden generar gran impacto en las métricas evaluadas. Adicionalmente, se puede realizar un estudio de los tiempos de preparación usando la herramienta SMED.

4. RESULTADOS

4.1. Definir

Para poder comenzar con la fase de definir es importante conocer el proceso que actualmente se realiza. El proceso de reciclaje de llantas con el método de trituración mecánica empieza a partir de que un operario recoge una o varias llantas desde el punto de almacenaje y corta una de las tapas laterales de la llanta. Después se realiza el seccionamiento de las llantas

en tiras de caucho que deben ser cortadas en trozos pequeños. Cuando se tienen los pedazos de caucho estos se alimentan al molino, que junto con el tamizador son máquinas que trabajan de forma cíclica realimentándose con el mismo material. De esta forma el producto del molino sale hacia el tamizador que filtra el polvo y grano de caucho, el material que no pasa por las mallas del tamizado es reabastecido al molino para que se triture nuevamente. El proceso se puede evidenciar en la **Figura 1**. Esta parte es la que más tiempo demora dentro del proceso y es también donde, mayormente, recaen los requerimientos del cliente interno.

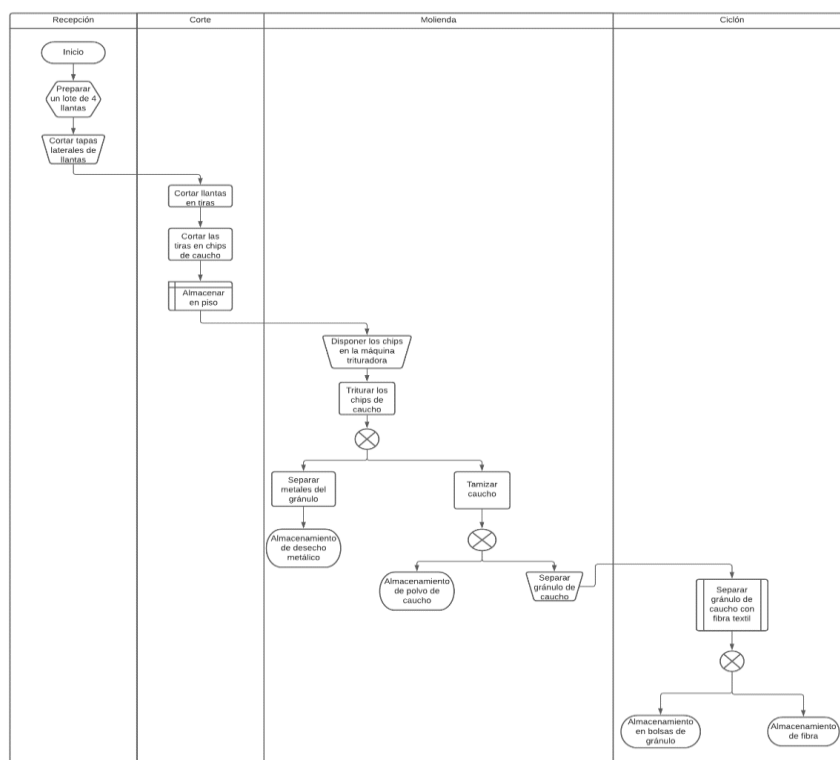


Figura 1: Diagrama del proceso de trituración mecánica

Para identificar los requerimientos y métricas se realizaron entrevistas individuales tanto al gerente de producción de la fábrica, cómo los usuarios expertos del proceso. En base a los comentarios recibidos se construyó la matriz de la voz del cliente (VOC) que permite identificar las necesidades del cliente, el controlador de calidad al que están relacionado y finalmente dar una métrica del valor deseado. El análisis VOC se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Voz del cliente

Matriz Voz del Cliente (VOC)		
Comentarios del cliente	Driver de calidad	Requerimiento del cliente
Se desecha gran cantidad del material procesado	Eficiencia	Disminuir los residuos generados.
El tiempo de set up es muy elevado	Tiempo	Tiempo de set up menor a 25 minutos.
Se quiere reducir el tiempo de procesamiento de un lote	Tiempo	Tiempo de procesamiento menor a 1h15min.
Se necesita separar los productos finales (caucho, polvo, metal y fibra)	Precisión	95% de los productos finales se separa de forma correcta
Existen paras no programadas que afectan la continuidad del proceso	Fiabilidad	Sin paras no programadas durante el proceso

Adicionalmente se realizó el árbol de los CTQ mostrado en la **Figura 2**, que permite de forma gráfica clasificar los requerimientos por sus diferentes indicadores, así como también identificar la necesidad primordial en base a los requerimientos mencionados. De este análisis se evidencia que la necesidad que engloba a todos los requerimientos es el aumento de la eficiencia en el proceso; tanto en reducción de material desechado, como en la optimización de tiempos a lo largo de las actividades.

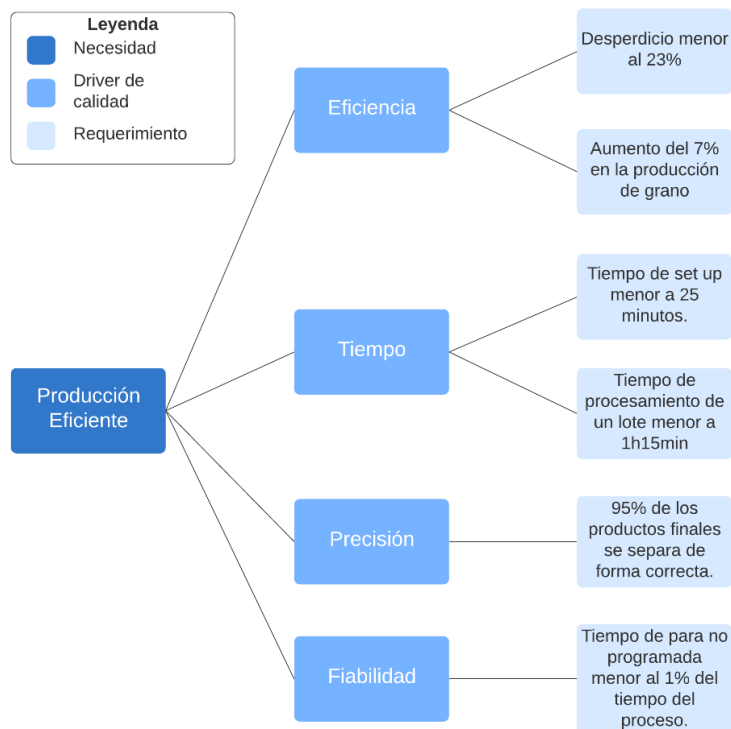


Figura 2: Árbol de CTQs

Una vez relacionados los requerimientos de las partes interesadas se puede identificar la problemática, definir el objetivo y alcance del proyecto que se debe tener para llegar a las metas y SLAs establecidos en el VOC. Esta identificación se la realizó mediante la construcción de un Project Charter. Se identificó como parte de la problemática que actualmente se desecha alrededor del 40% de la producción total que representan 260 kg por lote de producción de material que no se está aprovechando. Adicionalmente, se ha observado que el tiempo de producción es superior a una hora y media. Un recorte del Project Charter se muestra a continuación en la **Tabla 2**.

Tabla 2: Project Charter

Project Charter																	
Proceso de triturado de llantas																	
Enunciado del problema	Beneficios a lograr																
Se ha evidenciado que existe una gran cantidad de desperdicio en el proceso de triturado de llantas. Se conoce que actualmente se desecha alrededor del 40% de la producción total. Que representan 260kg por lote de producción de material que no se está aprovechando. Adicionalmente, se ha observado que el tiempo de producción es muy elevado. Esto debido a que tiene demoras en el tiempo de preparación (setup time) y paras no programadas por daños en el equipo.	Mediante la implementación de herramientas Lean y Six Sigma se puede disminuir los desperdicios, tanto de materiales como de tiempo. Esta aplicación trabaja bajo la filosofía de que no es necesario aumentar la cantidad de personal, ni cambiar completamente la maquinaria para mejorar el proceso. Por esta razón se puede conseguir mejoras de fácil implementación y que tengan un gran impacto sobre la eficiencia del proceso.																
Objetivo Principal	Línea de tiempo																
Realizar un proyecto Lean Six Sigma con la metodología DMAIC que permita reducir la cantidad de desperdicio, reducir los tiempos de preparación y eliminar las paras no programadas con soluciones de rápida implementación.	<table border="1"> <thead> <tr> <th><u>Fase</u></th> <th><u>Fecha Planificada</u></th> <th><u>Actual</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Definir:</td> <td>24-Feb</td> <td>24-Feb</td> </tr> <tr> <td>Medir:</td> <td>16-Mar</td> <td>16-Mar</td> </tr> <tr> <td>Analizar:</td> <td>30-Mar</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Mejorar:</td> <td>15-Apr</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		<u>Fase</u>	<u>Fecha Planificada</u>	<u>Actual</u>	Definir:	24-Feb	24-Feb	Medir:	16-Mar	16-Mar	Analizar:	30-Mar		Mejorar:	15-Apr	
<u>Fase</u>	<u>Fecha Planificada</u>	<u>Actual</u>															
Definir:	24-Feb	24-Feb															
Medir:	16-Mar	16-Mar															
Analizar:	30-Mar																
Mejorar:	15-Apr																

4.2. Medir

Antes de empezar a realizar las mediciones para el levantamiento de información se requiere tener un guía de qué mediciones son requeridas, el cómo se van a tomar esos datos e incluso bajo qué frecuencia. Para esto se desarrolla un plan de recolección de datos, que se considera como componente crítico de la medición (Pries, K. & Quigley, J., 2013). Este nos permitirá realizar las mediciones de una forma estándar. En el proceso de triturado mecánico, existen actividades donde el inicio y fin no es visible de forma superficial por lo que es importante realizar esas delimitaciones antes de levantar la información. El plan de recolección de datos puede verse en el anexo A.

Lo siguiente a considerar es la cantidad de datos que se tienen que recolectar para que los datos sean representativos del proceso. Inicialmente se calculó un tamaño de muestra en base a lo descrito por Valdivieso y Valdivieso (2011), obteniendo los siguientes resultados:

$$n = p * (1 - p) * \frac{Z_{\alpha/2}^2}{e}$$

$$n = 0,5 * (1 - 0,5) * \left(\frac{1,96}{0,10}\right)^2$$

$$n = 96,04 \text{ muestras}$$

Este resultado se lo obtiene considerando un nivel de confianza del 95% y un error aceptable del 10% que se usan comúnmente en ensayos controlados aleatorios (Gogtay, 2010). En base a estos resultados se debieron recolectar 97 muestras de datos para cada una de las actividades a evaluarse, sin embargo, De acuerdo con Niebel (2014) debemos considerar el tiempo y esfuerzo que se requiere para cumplir con este número de muestras. En base al registro previo de tiempos del proceso, sabemos que en completar el procesamiento de un lote se requiere de un tiempo mayor a 1h30min. Teniendo en cuenta el tiempo de operación se tomó la recomendación de Niebel (2014) que se muestra en la **Figura 3**. En esta se menciona que para procesos mayores a 40 minutos se requieren únicamente 3 (**tres**) muestras para que las mediciones sean representativas del proceso.

Tiempo de ciclo (minutos)	Número recomendado de ciclos
0.10	200
0.25	100
0.50	60
0.75	40
1.00	30
2.00	20
2.00-5.00	15
5.00-10.00	10
10.00-20.00	8
20.00-40.00	5
40.00 o más	3

Fuente: Información tomada de *Time Study Manual* de los Eric Works de General Electric Company, desarrollados bajo la guía de Albert E. Shaw, gerente de administración del salario.

Figura 3: Número recomendado de ciclos de observación.

Los datos de tiempo, en conjunto con la observación directa del proceso, fueron utilizados para construir un VSM. En este se encuentran descritas las actividades del proceso, el tiempo de ciclo e inventarios encontrados al hacer la evaluación del proceso.

El detalle de los tiempos recolectados se encuentra en el anexo B. De igual forma se calcularon los tiempos de valor agregado y valor no agregado resultantes para un posterior análisis.

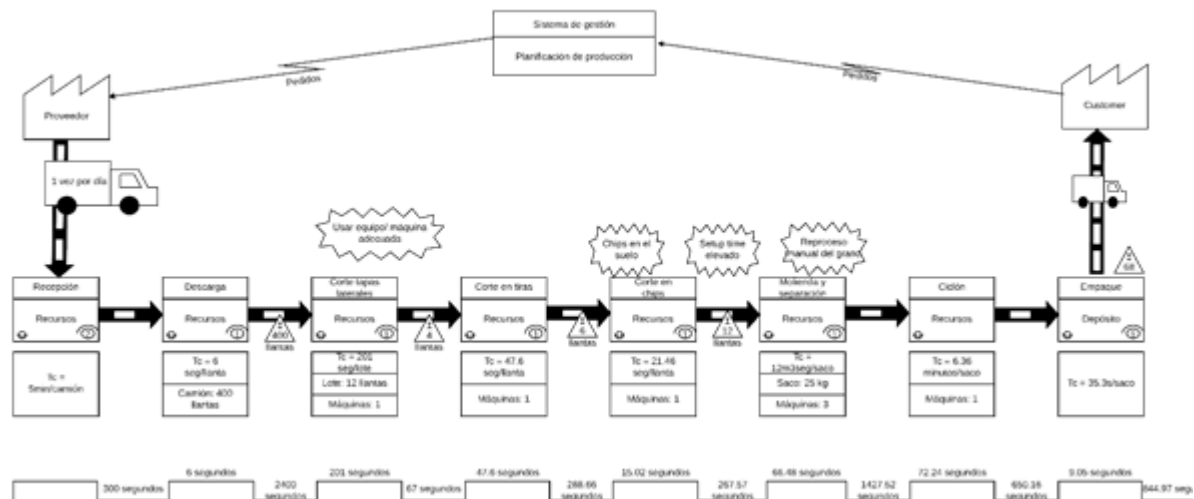


Figura 4: VSM

La construcción del VSM, mostrado en la **Figura 4**, permitió identificar eventos de mejora, representados por los *Relámpagos Kaizen*.

El primer evento refleja la problemática que los operarios no usan la máquina establecida para hacer el corte de las tapas laterales de las llantas y lo realizan de forma manual. La siguiente área de oportunidad corresponde al proceso de corte de chips, donde las llantas procesadas salen de la máquina y directamente se almacenan en el suelo. Esto causa que para mover el material primero se deba cargarlo en carretillas de forma manual para luego trasladarlo y descargarlo en la siguiente máquina. La tercera oportunidad se evidenció en el proceso de molienda. Este proceso requiere de un tiempo de preparación de la maquinaria (set up time) que super los 30 minutos. Finalmente, se evidenció que existe un proceso manual al momento de separar los productos finales. Generando un desperdicio de recursos, a consecuencia de un trabajo de selección manual que requiere de un operador.

Otro de los puntos que se tenía en consideración era la cantidad de desperdicio y material procesado que se desechaba. Para esto se realizaron mediciones de la cantidad de llantas que ingresaban al sistema dentro de un ciclo de producción y la cantidad de material que se descartaba una vez terminado ese ciclo. Se evaluó la cantidad de desperdicio mediante una métrica cuantitativa conocida como *waste efficiency*, que mide la eficiencia de los materiales procesados y es utilizada en procesos de reciclaje (Norhzarina et al., 2020). Con los datos recolectados se obtuvieron los siguientes resultados.

$$Waste\ Efficiency = \frac{Peso\ del\ producto}{Peso\ del\ residuo\ entrante}$$

$$Waste\ Efficiency = \frac{250\ kg/ciclo}{630\ kg/ciclo}$$

$$Waste\ Efficiency = 0.397$$

Esto quiere decir que solo un 40% de las llantas que entraron al sistema fueron transformadas correctamente a producto útil. Entre más alto valor sea de esta métrica significa que existe un mejor reaprovechamiento de los materiales usados (Norhzarina et al., 2020).

4.3. Analizar

Para empezar con la fase de analizar, primero se calculó el *takt time* que es el indicador encargado de equilibrar el ritmo de producción con la demanda de la empresa (Wan & Chen, 2008). Para calcular la demanda se tuvo en cuenta que se debe procesar 7000 llantas cada mes, también se consideró un tiempo disponible de trabajo de 7 horas al día ya considerando las pausas programadas que se tienen en la jornada laboral. El cálculo se lo hizo de la siguiente manera:

$$Takt\ time = \frac{Tiempo\ disponible}{Demanda}$$

$$Takt\ time = \frac{20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 7 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{minutos}}{\text{hora}} \times 60 \frac{\text{segundos}}{\text{minuto}}}{7000 \frac{\text{llantas}}{\text{mes}}}$$

$$Takt\ time = 72 \frac{\text{segundos}}{\text{llanta}}$$

El resultado obtenido del *takt time* fue comparado, mediante una gráfica de balance, con los tiempos de ciclo de cada una de las etapas del proceso, esto se puede ver en la **Figura 5**.

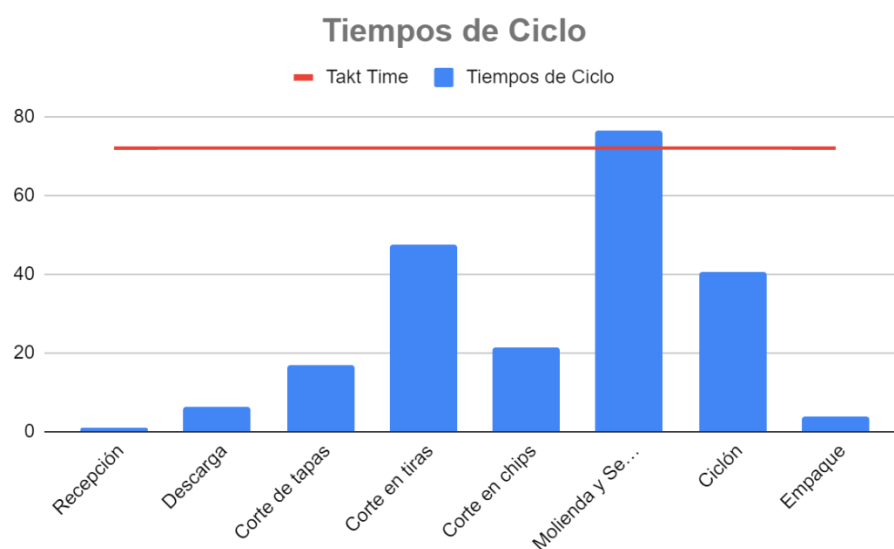


Figura 5: Tiempos de ciclo

Se observa que existe un cuello de botella en el proceso de molienda y separación de metales, que agrupa las actividades de: molienda, tamizado y separación de metales. El cuello de botella hace que la cadena de valor sea ineficiente y los procesos posteriores se retrasen, llevando a un aumento del tiempo de producción que se tiene (Rother & Shook, 1999).

Posteriormente, se hizo una evaluación de los posibles motivos que causaban un retraso en el proceso de molienda y en conjunto con las quejas presentadas internamente se estableció la definición de las causas raíz. Las causas raíz es ver más allá de las causas y efectos superficiales, el profundo análisis muestra en qué punto los procesos o sistemas fallaron (Rother & Shook, 1999) para luego ser mejoradas.

Tal como lo menciona (Pyzdek & Keller, 2009) para realizar una buena implementación de las causas raíz se comenzó una lluvia de ideas con la gerencia y los trabajadores, siempre enfocándose en el proceso de molienda y separación. Al finalizar con las múltiples ideas presentadas principalmente por los trabajadores, se procedió a realizar el diagrama de causa raíz en colaboración con el jefe de producción de la fábrica para determinar cuál tipo de causa se deberá focalizar la empresa para efectuar las mejoras.

Se ha usado el método de las 6M para diagramar las causas que se muestra en la **Figura 6**. En comparación con el método de las 5M que evalúa cinco causas principales: medio ambiente, materiales, método, máquinas y mano de obra; las 6M adiciona una causa que es *Manejo*, la cual permite analizar el impacto de la gerencia en cuanto a control de la producción (Franchetti & Barnala, 2013). De igual forma verifica si en realidad tienen o no registro de lo que producen en todas sus etapas.

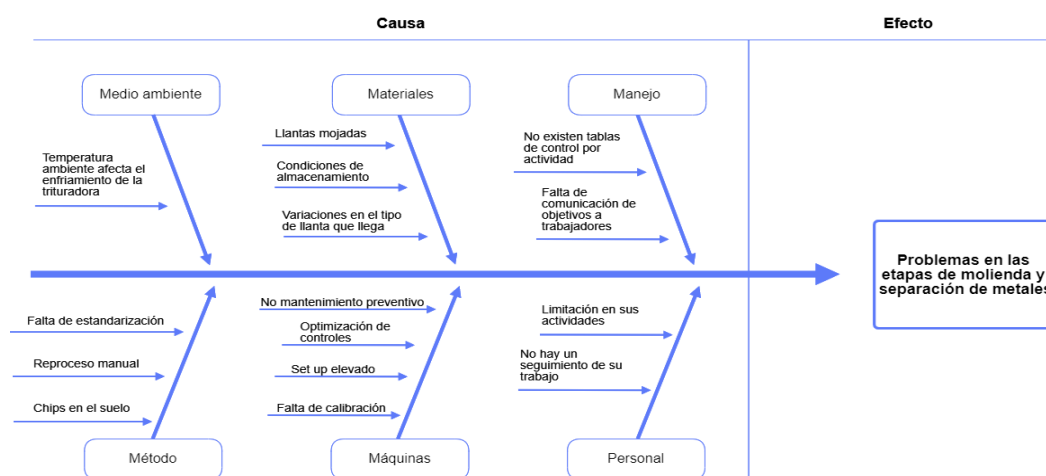


Figura 6: Diagrama de causa y efecto

Una vez analizadas las causas principales al problema del proceso de molienda y separación de metales. Se concluye que la causa raíz es proveniente de una falta de estandarización de estos procesos, porque no se tiene definido una metodología específica para estos casos y por ende producen retrasos en la fabricación del producto. A través de esto se conducirá a la implementación de las mejoras en la siguiente fase.

4.4. Mejorar

Conociendo las causas de los problemas que evidenciaron tanto en los relámpagos *Kaizen* como en el análisis causa-raíz, se procedió a implementar una serie de mejoras de rápida implementación.

Se comenzó por solucionar el problema de los chips almacenados en el suelo y que eran trasladados de forma manual hasta el siguiente punto del proceso. En esta área se implementaron los conceptos de 5S's relacionados a: limpieza, orden y estandarización. Por esta razón se eliminó el almacenamiento en el suelo por tres recipientes plásticos que se movilizaban en un carro de transporte.

Los cambios en el área del corte de chips se pueden visualizar en la **Figura 7**. Con esto se logró estandarizar las cantidades que eran transportadas, mantener los caminos y áreas de transporte despejadas y reducir los tiempos de transporte por cada ciclo de producción. Esto se ve reflejado en el análisis de valor agregado que se realizó después de implementar las mejoras.



Figura 7: 5S's en el área de chips (antes y después)

Antes de examinar otra herramienta, se utilizó 5S's para rediseñar y ordenar los materiales que los operarios manejaban. Dichos materiales no eran dejados en un sitio en

específico y al pasar un periodo determinado de tiempo, se extraviaban por la falta de responsabilidad de los trabajadores. De esta manera, se ordenó, clasificó y se socializó con los operarios sobre los beneficios de tener sus herramientas de trabajo (palas, trinchas, escobas) en un lugar visible y sobre todo clasificadas para que ellos tengan un control sobre estas.

En el proceso de tamizado, separación y molienda se tenía un operario controlando y reprocesando el material que sale de la máquina. En este caso se vio la necesidad de aplicar un sistema de automatización un autocontrol que corresponde al principio de Jidoka (P Aucasime-Gonzales et al, 2020). Para evitar que se deba realizar esta actividad, se soldó una pieza a la maquinaria como se muestra en la **Figura 8** (deberíamos poner una flecha o círculo a la pieza de la que se está hablando) y se agregó una malla de tamizado adicional de forma interna. Esto añadió un filtro adicional que lleva todo el material que no ha sido procesado correctamente de vuelta a la banda transportadora. De esta forma, es la misma maquinaria que realiza el control del flujo de materiales.



Figura 8: Soldadura de metal en zona de tamizado

Se ha realizado una herramienta complementaria para el control de calidad que se tiene en el área de tamizado y separación de metales. Por esta razón, se ha desarrollado un Pokayoke físico, el cual se ha incluido dos imanes en la parte de inicio y final de esta área para que se pueda atrapar la mayor cantidad de fibras metálicas posibles. Así, evitando el paso de estos

materiales a siguientes procesos y logrando un sistema a prueba de error, el cual es característico de este sistema.

En la aplicación de las 3 anteriores herramientas se atacó a los tiempos de ciclo de los procesos. Esto fue de gran ayuda, ya que bajó el tiempo de molienda y separación de metales en un 17,7% y se sitúa actualmente con un tiempo de ciclo de 65,10 segundos/llanta. Igualmente, con esta reducción se ha eliminado el cuello de botella y todo el procedimiento es más fluido.

Uno de los factores que afectaba el tiempo de ciclo en la molienda y separación era el tiempo de preparación de la maquinaria que debía realizarse previo al inicio de cada ciclo. Para esto se trabajó en identificar que actividades intervienen en la preparación y cuáles de ellas pueden ser realizadas sin necesidad de detener el flujo del proceso; eliminando en lo posible los tiempos internos o transformando los tiempos internos en tiempos externos (Shingo, 1985).

El detalle de las actividades se muestra en la **Figura 9**. Se logró disminuir el tiempo de descarga de desechos al reubicar la zona donde eran almacenados y también se redujo el tiempo de carga del nuevo material con el nuevo sistema de almacenamiento más cercano y transporte de chips mostrado en la **Figura 7**.

SMED: Tiempo de preparación de la máquina trituradora					Gantt Actividades				
Tarea	Duración (min)	Interno	Externo	Detalle	Responsables: Operario de Molienda y Operario de Soporte				
Preparar insumos: carnetas, trincheras y baldes de grano de caucho	1.3		x	Preparar insumos cuando se inicie a llenar el último saco de grano del lote de 30	Op. Soporte				
Reducir a la mínima velocidad la trituradora	1.12	x			Op. Molienda				
Recoger por zonas con la trinchera los desperdicios de caucho	9.24	x			Op. Soporte				
Disponer en las zonas vacías los granos de caucho de los baldes	11.76		x		Op. Molienda				
Remover con la trinchera los chips de caucho de la máquina para que quede uniforme la disposición	2.09		x	Realizar esta actividad al final de la preparación	Op. Molienda				
Tiempo total de preparación de la máquina trituradora (min)	17.46	2.31	15.15			1.3	2.31	11.76	2.09

Figura 9: SMED aplicado al tiempo de preparación de la máquina trituradora.

Se finalizó con el objetivo de reducir el tiempo de preparación que antes de situaba en 32 minutos aproximadamente a 17,46 minutos. Esto quiere decir que se ha mejorado en un 54% este indicador, mientras que el tiempo restante se recomendarán en efectuar actividades que agreguen valor a la empresa.

Se habla también de una mejora proporcional en el indicador de *waste efficiency*, porque en la técnica SMED que se la implementó anteriormente se indicó a los operadores que no remuevan todo el desecho de caucho en su totalidad, sino que solamente retiren la capa superior de desechos y que la capa inferior siga triturándose. De esta manera, se ha aumentado este indicador en un 3% y estableciéndolo mediante un diagnóstico preliminar como un límite superior de mejora, debido a que la técnica de la máquina trituradora es el limitante de este indicador.

Conjuntamente con la reducción de los tiempos de set-up se implementó un sistema de control visual del proceso o también llamado ANDON. Esta responde a crear un sistema de comunicación visual para reducir las paras no programadas en el proceso de trituración del caucho. Según Sage Clarity (2021) se debe crear este sistema de control acompañada con una simbología de colores que representen la urgencia de los cambios de los materiales que necesitan mantenimiento o repuestos.

Así mismo, se deben poner las fechas en las que se realizó los cambios como las potenciales fechas de mantenimiento próximos que necesiten los materiales. Esto ayudó a disminuir a un 0% las paras no programadas y en la actualidad los procesos se lo realizan sin obstrucciones. La tabla de control se observa en la **Figura 10**.

MANTENIMIENTO/REPUESTO	Duración	Fecha de cambio	Fecha próxima	Riesgo	Responsable
CUCHILLAS CORTADORA	3 meses	06-04-21	09-04-21	Alto	Jefe de producción
CUCHILLAS CHIP	1 mes y medio	18-03-21	03-05-21	Medio	Jefe de producción
CUCHILLA TRITURADORA	6 meses	05-02-21	05-08-21	Medio	Jefe de producción
CICLÓN	1 semana	09-04-21	16-04-21	Alto	Persona encargada
AGARRADERAS TRITURADORA	15 días	02-04-21	16-04-21	Alto	Persona encargada
MOTOR TRITURADORA	1 año	21-12-20	21-12-21	Bajo	Gerencia

Simbología	
	Alto
	Medio
	Bajo

Figura 10: Tabla de control de los materiales críticos de la empresa.

Se presentó como ayuda a la herramienta ANDON, otra de la filosofía Lean que beneficia a que los operarios tengan un mayor conocimiento de todas las máquinas y que roten constantemente en sus actividades del trabajo. Shojinka aplica el concepto de flexibilización en el trabajo y responsabilidad adquirida de los empleados (Lean Enterprise Institute, 2021), esto se lo implementó mediante una calendarización de actividades mostrado en la **Figura 11**. En donde se observa que rotaban a todos operarios en diferentes máquinas por una semana, al igual que en cada semana se designaba un líder de planta, quien era el encargado de la limpieza y orden.

Fecha	12-Apr	ALMUERZO	13-Apr	ALMUERZO	14-Apr	ALMUERZO	15-Apr	ALMUERZO	1,5 extra	ALMUERZO
	LUNES		MARTES		MIÉRCOLES		JUEVES		16-Apr	
									VIERNES	
CUMBAL BAYRON	NFU	12:30	NFU	12:30	NFU-JAL.	12:30	NFU-JAL.	12:30	NFU-JAL.	12:30
MENDOZA ERNESTO	TIRAS	12:30	TIRAS	12:30	CHIP	12:30	CHIP	12:30	MOLINO 2	12:30
QUIÑA LUIS	CHIP	13:00	CHIP	13:00	CORTE MAN.	13:00	CORTE MAN.	13:00	CORTE MAN.	13:00
QUISHPE RENÉ	JALADORA	13:00	JALADORA	13:00	MTTO	13:00	JALADORA	13:00	MTTO	13:00
PÉREZ CARLOS	CORTE MAN.	13:00	CORTE MAN.	13:00	MOLINO 2	13:00	MOLINO 2	13:00	CHIP	13:00
TOAQUIZA DAVID	MOLINO 2	12:30	MOLINO2	12:30	TIRAS	12:30	TIRAS	12:30	TIRAS	12:30

Figura 11: Calendarización de actividades dispuestas para una semana.

Entre los impactos más importantes que se tuvo, fue que los trabajadores adquirieron responsabilidades diferentes a las de antes, porque solamente trabajaban en una máquina. Igualmente, los operarios han desarrollado un sentido de pertenencia a la empresa, ya que se sentían con libertad de trabajar gracias a que sus responsabilidades fueron más dinámicas (Lean Enterprise Institute, 2021).

Al finalizar con la implementación de las mejoras, se ha calculado posteriormente los valores diarios que tienen ahora del producto terminado. El nuevo valor indica que se ha aumentado en un 9% la productividad diaria, es decir, han pasado de producir 40 sacos de gránulo de caucho diarios a 43,44 sacos.

Finalmente se ha realizado una evaluación de la inversión económica que la empresa ha realizado en relación con los beneficios que tiene la empresa de aumentar en 9% su productividad diaria. Por lo que, se hizo un cálculo del índice de rentabilidad que propone Canibe & Balet (2020) que es la relación del valor de los beneficios actuales sobre el valor de los costos totales de la inversión.

En la cual:

- Costos totales de inversión = \$96,25
- Valores de beneficios actuales = \$5596,80

La suma de los costos de inversión viene dada por la compra de los materiales, como: baldes de plástico, imanes pequeños e imanes industriales. Mientras que, el valor de los beneficios se lo calcula por la cuantificación anual del 9% diario.

$$\text{Costo} - \text{beneficio} = \frac{\text{Valor actual beneficios netos}}{\text{Valor actual costos totales}}$$

$$\text{Costo} - \text{beneficio} = \frac{5596,80}{96,25}$$

$$\text{Costo} - \text{beneficio} = 58,145$$

Este valor como representa un número mayor a 1, según (Canibe & Balet, 2020) menciona que la inversión ha dado réditos positivos para la empresa.

Sin lugar a duda, las implementaciones realizadas en esta investigación han dado resultados favorables y como se ha visto no han sido necesarias grandes inversiones, sino el saber el problema raíz para luego atacarlo de manera eficaz.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, el estudio mostrado ha hecho énfasis sobre la implementación de herramientas Lean Six Sigma que han contribuido con la mejora en la productividad diaria de la empresa. En base a resultados preliminares se tiene un aumento de 40 a 43,44 sacos diarios. En conjunto con la identificación de problemas relacionados con la estandarización, orden y autocontrol de las actividades han permitido que se tenga un proceso más fluido. Esto tiene que ver de igual manera con la eliminación del cuello de botella presentado inicialmente en la zona de molienda y separación de metales, que ahora no se lo presenta.

La mejora de los procesos se ha logrado en colaboración a la par con los trabajadores de la empresa. Ellos fueron los que saben de primera mano las oportunidades de mejora y el grupo de trabajo escuchó sus ideas para analizar las posibles mejoras que se hicieron para el beneficio de la empresa. A la final, aportaron con mucha colaboración en construir herramientas que a la final mejoró la productividad.

Por otro lado, con respecto a la pregunta de investigación: ¿La empresa ecuatoriana de reciclaje de NFU está operando a su máxima capacidad o existen ciertas condiciones para hacer que aumente la productividad, con las mismas condiciones de calidad preestablecidas, bajo la configuración de operación actual? En los análisis presentados en la etapa Medir con la etapa de Analizar se ha encontrado que la empresa operaba en su capacidad máxima, pero no hacía un buen uso de los recursos de la empresa para satisfacer las necesidades del cliente. Por lo que se logró determinar la falta de orden y estandarización en sus métodos de trabajo. Indicadores

como el *takt time* y *waste efficiency* fueron útiles en mostrar una línea base inicial que mostró oportunidades de mejora que se debían implementar en la planta.

Las implementaciones mediante mejoras rápidas fueron exitosas, destacando principalmente el uso de dos herramientas: SMED y Pokayoke. La primera, ayudó en reducir el tiempo de preparación de la máquina trituradora en un 54%. Ahora este tiempo diario favorable será redistribuido en actividades de limpieza, mantenimiento y orden. Igualmente, la gerencia está tratando de motivarlos mediante el aumento de sus tiempos de descanso.

Mientras que Pokayoke ha solucionado el gran problema que se han venido quejando tanto clientes internos como externos, ya que no se sabía cómo solucionarían el problema de la mala separación de los metales. A la cual se ideó el uso de los imanes que no solamente eliminó la mala separación, sino que produjo un sistema a prueba de errores a un bajo costo de inversión.

Finalmente, entre las limitaciones principales del proyecto se tiene que se logró visualizar el tiempo de proceso total al ser elevado, mayor a una hora y 49 minutos, se tuvo problemas al tener un registro de los datos de manera continua. Esto se dio, porque a veces se paraba el proceso por llegada de nuevo material o por la ausencia de un operario. Por lo que, una toma de datos continua fue difícil de recolectar y si se registraba una para por algún motivo se tenía que reiniciar el tiempo para evitar sesgos. Posteriormente, al tratar de mejorar el indicador de *waste efficiency* se tuvo muchos problemas. Esto fue a que no existía herramienta alguna o concepto Lean que ayudase a aumentarla. Sin embargo, se logró su implementación con éxito y se estableció como límite superior esta mejora, porque era lo máximo que se podría conseguir de la máquina debido a su eficiencia operativa de fábrica.

En recomendación general se propone enfocar otro proyecto de esta empresa dirigido hacia la recolección de fibra de caucho, porque debido a la actividad constante de la máquina

trituradora se levanta este material que es dañino en una exposición constante con los trabajadores. Se tomarían consideraciones de seguridad, salud y medio ambiente.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador “AEADE” (2019). Anuario 2019. Págs. 42-43. <https://www.aeade.net/anuario/>
- Aucasime-Gonzales P, Chávez-Soriano S & Domínguez F (2020). *Waste Elimination Model Based on Lean Manufacturing and Lean Maintenance to Increase Efficiency in the Manufacturing Industry*. IOP Conference Series: Material Science and Engineering, doi: 10.1088/1757-899X/999/1/012013
- Barnala, P & Franchetti, M. (2013). Lean Six Sigma at a Material Recovery Facility: a case study. *International Journal of Lean Six Sigma*, 4(3), 251-264, doi: 0.1108/IJLSS-05-2013-0026
- Bhuiyan, N. & Baghel, A. (2005), An overview of continuous improvement: from the past to the present, *Management Decision*, 43 (5), pp. 761-771.
- Castañeria, J. (2015). *Técnica de las 5S's*. SGM. Obtenido el 15 de abril de 2021 desde: <https://sgmspain.wordpress.com/tag/5s/>
- Castro, G. (2007). *Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos*. Buenos Aires: Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Buenos Aires. Retrieved from https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Reutilizacion_Reciclado_y_Disposicion_final_de_Neumatico.pdf
- Chunagi, N. & Kumar, V. & Garza-Reyes, J.A., & Rocha-Lona, L., & Upadhyay, A. (2016). Investigating the green impact of Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma: A systematic literature review. *International Journal of Lean Six Sigma*. 8 (1), 7-32, doi: 10.1108/IJLSS-11-2015-0043

- Den Boer, S. (2006) *Six Sigma for IT Management*, Van Haren Publishing: Zaltbommel.
- Duggan, K. (2012), *Creating Mixed Model Value Streams: Practical lean Techniques for Building to Demand*, CRC Press, London.
- EPA. (2016, february 22). *Ground Rubber Applications*. Retrieved from U.S. Environmental Protection Agency:
<https://archive.epa.gov/epawaste/conservation/materials/tires/web/html/ground.html#:~:text=Other%20uses%20for%20ground%20rubber,Brake%20pads%20and%20brake%20shoes.>
- Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020). Recycling Waste Tires into Ground Tire Rubber (GTR)/Rubber Compounds: A Review. *Journal of Composite Science*, 4(103), 46.
 doi:10.3390/jcs4030103
- Found, P. & Harrison, R (2012) Understanding the lean voice of the customer, *International Journal of Lean Six Sigma*, 3(3), 251-267.
- Franchetti, M., & Barnala, P. (2013). Lean six sigma at a material recovery facility: a case study. *International Journal of Lean Six Sigma*, 4(3), 251-264. doi:10.1108/IJLSS-05-2013-0026
- Franco, M (2015). Análisis del acuerdo N°20 del Ministerio del Ambiente del Ecuador para definir la prefactibilidad del desarrollo de un plan de reciclaje de neumáticos fuera de uso: Tesis de pregrado. Pontifica Universidad Católica del Ecuador. Obtenido el 28 de febrero del 2021 de:
<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11968/An%C3%A1lisis%20del%20Acuerdo%20N.020%20del%20Ministerio%20del%20Ambiente%20del%20Ecuador%20para%20definir%20la%20prefactibilidad%20del%20.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

- Gogtay, N. (2010). Principles of sample size calculation. *Indian Journal of Ophthalmology*, 517-518. doi:10.4103/0301-4738.71692
- Grand View Research (2020). Waste Recycling Services Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product (Paper & Paperboard, Metals, Plastics), By Application (Municipal, Industrial), By Region, And Segment Forecasts, 2020-2027: *Market Analysis Report*, report id: GVR-4-68038-577-9
- Hamad, M., Naeem, K., Zubair, M., Usman, Q., Khattak, S., & Nawaz, M. O. (2021). Waste reduction of polypropylene bag manufacturing process using Six Sigma DMAIC approach: A case study. *Cogent Engineering*, 8(1).
doi:<https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1896419>
- Hartung, M. (2010). *Lean - Six Sigma: Quality & Process Management for Managers & Professionals*. Books on Demand. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=8bkyIFKOUNQC&printsec=frontcover&dq=lean+six+sigma&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiKu9vRhsLwAhXIVTABHYjYCtw4ChDoATAHegQIBxAC#v=onepage&q=lean%20six%20sigma&f=false>
- Hung-da Wan & Chen, F. (2008). A leanness measure of Manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives. *International Journal of Production Research*, 46(23), 6567-6584, doi: 10.1080/00207540802230058
- Lean Enterprise Institute (2021) *Definition of Shojinka in Industry*. Obtenido el 12 de abril del 2021 desde: <https://www.lean.org/lexicon/shojinka#:~:text=Shojinka%20means%20%E2%80%9Cflexible%20manpower%20line,volume%20fluctuates%20up%20or%20down>
- Long, JC. (2001). The history of rubber – a survey of sources about the history of rubber. *Rubber Chemistry and Technology*. Akron, 74 (3), 493-510

- López, A. (2007). *La gestión de costes en Lean Manufacturing*. La Coruña: Gesbiblo.
- Obtenido de
<https://books.google.com.ec/books?id=xjrRJM4TFV8C&pg=PA47&dq=VSM+Lean&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi3s7GYk8LwAhUGElkFHVBMD-UQ6AEwAHoECAEQAg#v=onepage&q=VSM%20Lean&f=false>
- Marin, M., Garcia, J., Mujal, R., Massagues, L., Bordes, J., & Colom, X. (2020). Ground Tire Rubber Recycling in Applications as Insulators in Polymeric Compounds, According to Spanish UNE Standards. *MDPI*, 5(16). doi:doi.org/10.3390/recycling5030016
- Norhazrina Jamil, Hamed Gholami, Muhamad Zameri Mat Saman, Dalia Streimikiene, Safian Sharif & Norhayati Zakuan (2020). DMAIC-based approach to sustainable value stream mapping: towards a sustainable manufacturing system, *Economic Research Ekonomiska Istraživanja*, 33(1), 331-360, doi: 10.1080/1331677X.2020.1715236
- Pande, P., Neuman, R. and Cavanagh, R. (2000), *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing Their Performance*, McGraw-Hill, New York, NY.
- Proaño, L & Stacey, F (2011). Estudio de factibilidad técnico-económico del reciclado de caucho y sus aplicaciones en la ciudad de Quito: Tesis de posgrado. Escuela Politécnica Nacional. Obtenido el 02 de marzo de:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7702/1/CD-3575.pdf>
- Pyzdek, T. & Keller, P. (2009) *The Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels*, (3rd Ed.), McGraw-Hill Professional.
- Rother M. & Shook, J. (1999), *Learning to See: Mapping the Value Stream to Add Value and Eliminate Waste*, Lean Institute, London.

Sage Clarity (2021). *Lean Solutions: Andon System*. Obtenido el 21 de abril del 2021 desde:
<https://sageclarity.com/solutions/andon-system/>

Shingo, S. (1985). *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*, Productivity Press, Oregon.

Tire Recycling Machines (2020). *Types of machines in the industry*.
<https://tirerecyclingmachines.com>

United States Environmental Protection Agency “EPA” (2018). National Overview: Facts and Figures on Materials, Waste and Recycling. Obtenido el 04 de marzo de 2021 de:
<https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>

University of Tennessee. Students turn recycled materials into art exhibit: Arts and Design News. Obtenido el 24 de febrero de: <https://news.utk.edu/2019/04/08/students-turn-recycled-materials-into-art-exhibit/>

7. ANEXO A: PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Tabla 3: Plan de recolección de datos (tiempos)

Plan de Recolección de Datos (Tiempos)					
Título de la medición	Tipo de dato (Discreto o continuo)	Definición operacional	Factores de estratificación	Notas de muestreo	Quién y cómo
Tiempo de recepción de camiones	Minutos - Continua	El tiempo (en minutos) desde que el camión entra a las instalaciones hasta que se parquea y está listo para descargar	No aplica	Medir por cada camión	Medición directa del proceso por parte del equipo del proyecto (cronómetro)
Tiempo de descarga de camiones	Segundos - Continua	El tiempo (en segundos) que un operario se demora en descargar una llanta	No aplica	Medir por cada llanta descargada	Medición directa del proceso por parte del equipo del proyecto (cronómetro)
Tiempo de corte de tapas	Segundos - Continua	El tiempo (en segundos) que le toma a un operario cortar una tapa lateral de la llanta	No aplica	Medir por cada unidad de llanta procesada	Medición directa del proceso por parte del equipo del proyecto (cronómetro)
Tiempo de tiraje de llantas	Segundos - Continua	El tiempo (en segundos) que le toma a un operario formar una tira de caucho a partir de una llanta sin tapas laterales	No aplica	Medir por cada unidad de llanta procesada	Medición directa del proceso por parte del equipo del proyecto (cronómetro)
Tiempo de traslado de tiras	Segundos - Continua	El tiempo (en segundos) que le toma a un operario mover una tira de caucho hacia la máquina cortadora de chips	No aplica	Medir por cada unidad de tira de caucho transportada	Medición directa del proceso por parte del equipo del proyecto (cronómetro)
Tiempo de corte de chips	Segundos - Continua	El tiempo (en segundos) que le toma a un operario en el que todo el tiraje	No aplica	Medir por cada unidad de tira de llanta procesada	Medición directa del proceso por parte del equipo del

		de la llanta sea consumido por la máquina			proyecto (cronómetro)
Tiempo de traslado de chips	Segundos - Continua	El tiempo (en segundos) que le toma a una persona mover una palada de tiras desde el suelo hacia la máquina trituradora de caucho	No aplica	Medir por cada palada (kg) de chips de caucho procesado	Medición directa del proceso por parte del equipo del proyecto (cronómetro)
Tiempo de molienda/separación	Minutos - Continua	El tiempo (en minutos) de procesamiento en realizar un ciclo de procesamiento, desde la carga hasta la limpieza	No aplica	Medir por cada ciclo de operación	Medición directa del proceso por parte del equipo del proyecto (cronómetro)
Tiempo de separación por ciclón	Segundos - Continua	El tiempo (en minutos) que se demora en procesar un saco de grano.	No aplica	Medir tiempo entre que se produce un saco y el siguiente	Medición directa del proceso por parte del equipo del proyecto (cronómetro)

Tabla 4: Plan de recolección de datos (materiales)

Plan de Recolección de Datos (Materiales)					
Título de la medición	Tipo de dato (Discreto o continuo)	Definición operacional	Factores de estratificación	Notas de muestreo	Quién y cómo
Cantidad de desperdicio en molienda/tamizado	Número de Carretillas - Discreta	Número de carretillas resultantes de desperdicio después de un ciclo de producción en el molino/tamizado	No aplica	Medir después de cada ciclo	Conteo manual mediante observación
Cantidad de grano producido	Número de Sacos - Discreta	Número de sacos de grano de caucho producidos después de un ciclo de producción	No aplica	Medir después de cada ciclo	Conteo manual mediante observación
Cantidad de polvo producido	Número de Sacos - Discreta	Número de sacos de polvo de caucho producidos después de un ciclo de producción	No aplica	Medir después de cada ciclo	Conteo manual mediante observación

8. ANEXO B: DATOS RECOLECTADOS

Tabla 5: Tiempo de traslado de tiras

Tiempo (segundos)
1.11
3.48
2.05
1.48
2.57
0.82
1.67
2.11
0.65
1.39
3.24

Tabla 6: Tiempo de corte en chips

Tiempo (segundos)	
12.45	13.65
22.01	25.17
35.24	18.41
19.29	50.24
15.27	20.19
14.1	17.76
14.66	15.44
15.41	38.23
16.97	23.02
18.2	14.49

Tabla 7: Tiempo de traslado de chips

Tiempo (segundos)	
3.21	2.38
2.78	2.14
3.12	2.74
1.88	4.81
3.39	5.5
2.42	4.27
2.47	2.37
3.39	2.54
2.58	2.36
4.1	2.87

Tabla 8: Tiempos de corte en chips

Tiempo (segundos)	Tiempos (segundos)
2.71	3.96
5.19	2.54
3.76	2.4
4.73	4.9
3.09	3.44
4.36	4.03
3.7	3.82
3.16	3.96
3.31	3.39
4.03	3.38
4.09	3.62
3.08	3.58
3.71	3.04