

PROPUESTA DE GESTIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO  
MEDIANTE LEAN SIX SIGMA EN EL PROCESO DE REEMPLAZO  
BASADO EN CONDICIÓN CBR PARA LOS EQUIPOS CATERPILLAR  
D11R EN LA EMPRESA MINERA DRUMMOND LTD

FELIPE CARLOS RAMIREZ SUAREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2020

PROPUESTA DE GESTIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO  
MEDIANTE LEAN SIX SIGMA EN EL PROCESO DE REEMPLAZO BASADO EN  
CONDICIÓN CBR PARA LOS EQUIPOS CATERPILLAR D11R EN LA EMPRESA  
MINERA DRUMMOND LTD

FELIPE CARLOS RAMIREZ SUAREZ

Monografía para optar al título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

JOSE ELÍAS ARZUAGA CHURIO

Especialista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA

2020

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis más sinceros agradecimientos están dirigidos a la institución y a sus distinguidos docentes, quienes han depositado en nosotros, sus conocimientos.

Al Ingeniero José Arzuaga por su valioso aporte a este proyecto.

## DEDICATORIAS

A Jehová Dios porque le debo todo lo que soy.

A mis padres, mi hermano y mi sobrina personas que me han ofrecido el amor y la  
calidez de la familia.

A mi novia por su apoyo y soporte incondicional. Gina Daniela Jiménez

**Felipe Carlos Ramírez Suarez**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. JUSTIFICACIÓN	21
4. MARCO REFRENCIAL	22
4.1 LEAN	24
4.1.1 Lean manufacturing	24
4.1.2 Lean Maintenance	25
4.1.3 Desperdicios en mantenimiento	26
4.2 SIX SIGMA	27
4.3 NIVEL SIGMA	30
4.4 LEAN SIX SIGMA	31
4.4.1 Fases DMAIC	32
5. ANTECEDENTES	34
6. METODOLOGÍA	35
6.1 DEFINIR	36
6.2 FASE MEDIR	39
6.2.1 Nivel Sigma	39
6.3 FASE ANALIZAR	41
6.4 PROPUESTA DE MANTENIMIENTO PARA MEJORAR LOS TIEMPOS DE REPARACIÓN DEL PROCESO DE CBR - FASE MEJORAR	45
7. CONCLUSIÓN	48
BIBLIOGRAFÍA	49
ANEXOS	51

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Desempeño Six Sigma	32
Tabla 2. Duración del proceso de CBR para un tractor D11 Caterpillar	39
Tabla 3. Información de los equipos a los que se les realizó CBR obtenidas del CMMS	39
Tabla 4. Duración y defecto del CBR de equipos entre 2017 y 2018	41
Tabla 5. Parámetros para el cálculo de DPMO y su respectivo resultado	41
Tabla 6. Desempeño six sigma	42
Tabla 7. Desperdicios listados por Joel Levitt	45
Tabla 8. Estudio de tiempos improductivos en los talleres de mantenimiento Drummond Ltd	47

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Panorámica Mina Pribbenow - La Loma – Cesar	14
Figura 2. Nuestra cadena de valor “extracción”	15
Figura 3. Nuestra cadena de valor “Transporte”	16
Figura 4. Diagrama de Pareto	28
Figura 5. Diagrama causa-efecto	29
Figura 6. Distribución normal de datos	30
Figura 7. Gráfica nivel sigma	31
Figura 8. Fases DMAIC	32
Figura 9. Descripción metodológica de cuatro pasos del Lean Six Sigma	35
Figura 10. MTTR tractores D11	36
Figura 11. Organigrama de mantenimiento Drummond Ltd	37
Figura 12. Disponibilidad de tractores D11	38
Figura 13. Distribución normal en tiempos de reparación para el proceso de CBR	42
Figura 14. Diagrama de Pareto de demoras registradas en el CMMS	44
Figura 15. Diagrama Causa-Efecto de los principales desperdicios	44
Figura 16. Diagrama de flujo sugerido para el proceso de cambio de componente basado en condición	47

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Tareas durante un cambio de componentes por condición	51
Anexo B. Diagrama de flujo del proceso actual de cambio de componente por condición	55

## RESUMEN

**TITULO: PROPUESTA DE GESTIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO MEDIANTE LEAN SIX SIGMA EN EL PROCESO REPLAZO BASADO EN CONDICION CBR PARA LOS EQUIPOS CATERPILLAR D11R EN LA EMPRESA MINERA DRUMMOND LTD \***

**AUTOR: FELIPE CARLOS RAMIREZ SUAREZ\*\***

**PALABRAS CLAVES:** Mantenimiento, Mantenibilidad, Disponibilidad, Lean Six Sigma.

### **DESCRIPCIÓN:**

El presente proyecto nace como una necesidad de la flota de mantenimiento tractores en su búsqueda de proveer una gran disponibilidad de forma eficiente, apuntando a cumplir uno de los objetivos estratégicos de la compañía, históricamente el comportamiento del indicador clave de desempeño mantenibilidad el cual mide el tiempo de reparación ha estado muy por encima del objetivo.

Este proyecto se fundamenta en la aplicación de cuatro de los cinco pasos de la metodología Lean Six Sigma, iniciando por definir quiénes son nuestros clientes internos, que es lo que esperan de la flota de mantenimiento tractores, que tareas se realizan durante el cambio de componente basado en condición, posteriormente se calcula cual sería la máxima duración buscando determinar cuáles no cumplen nuestro objetivo y calcular el nivel sigma del proceso para así determinar la brecha de rendimiento entre lo que estamos alcanzando y lo que se podría lograr, se genera un diagrama de flujo como se está realizando el proceso actual, en la fase analizar se buscaran las causas que más impactan los tiempos de reparación durante el proceso de cambio de componente por condición de los equipos Caterpillar D11R con la ayuda de herramientas estadísticas, diagrama de Pareto y causa efecto. Por ultimo en la fase mejorar con la ayuda del grupo de trabajo se propone un nuevo diagrama de flujo del proceso para así evitar que se presenten los desperdicios que actualmente se vienen presentando de tal forma que se pueda mejorar de gran manera el proceso y buscar el objetivo de no sobrepasar los tiempos que se trazaron.

---

\* Monografía de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: José Arzuaga Churio. Esp. Ingeniero Mecánico.

## ABSTRACT

**TITLE: PROPOSAL FOR THE MAINTENANCE MANAGEMENT STRATEGY BASED ON LEAN SIX SIGMA FOR THE CONDITION BASED REPLACEMENT OF EQUIPMENT CATERPILLAR D11R AT THE MINING COMPANY DRUMMOND LTD\***

**AUTHOR: FELIPE CARLOS RAMIREZ SUAREZ \*\***

**KEYWORDS:** Maintenance, Maintainability, Availability, Lean Six Sigma, Pareto Diagram, Fishbone.

### **DESCRIPTION:**

This project was structured as a need for the tractor maintenance fleet in its quest to provide high availability in an efficient way, aiming to meet one of the company's strategic objectives, historically the behavior of the key indicator of maintainability performance which measure the repair time has been well above target.

This project is based on the application of four of the five steps of the Lean Six Sigma methodology, beginning by defining who are our internal clients. What they expect from the tractor maintenance fleet, which tasks are performed during the component change Based on condition. The maximum duration will then be calculated, seeking to specifically determine our objective and calculate the sigma level of the process to determine the performance gap between what we are achieving and what could be achieved. A flow diagram is generated as the current process is being carried out. In the analysis phase, we search for the causes that impact the most in the repair times during the component change process due to the condition of the Caterpillar D11R equipment with the help of statistical tools, Pareto diagram and cause effect. Finally, in the improve phase, with the help of the working group, a new process flow diagram is proposed to achieve the goals proposed so that the process can be greatly improved in order to reach the objective of not exceeding the times that were traced.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: José Arzuaga Churio. Esp. Ingeniero Mecánico.

## INTRODUCCIÓN

Las presiones medioambientales sobre la industria carbonífera y la transición hacia energías renovables han pasado cuenta de cobro a las empresas que se dedican a extraer el carbón térmico, como le está pasando a Drummond Ltd, sin embargo, con el transcurrir del tiempo el área de mantenimiento ha llegado a ser una de las áreas más importantes y estratégicas al momento de lograr objetivos, reconociendo el valor de tener los equipos disponibles y su impacto en la producción, este a través de una serie de acciones planificadas y no planificadas que se desarrollan para garantizar una condición operativa aceptable. Teniendo como objetivo brindar mantenimiento una gran disponibilidad, confiabilidad y seguridad de un equipo o planta de producción.

La disponibilidad se ve afectada por los tiempos de reparación de los equipos, entre más altos sean estos la disponibilidad va a disminuir, por esta razón el área de mantenimiento de tractores en su búsqueda constante de mejorar la disponibilidad y controlar los costos empleados en los mantenimientos de los equipos, se plantea este proyecto inicialmente en uno de los procesos de reparación que se realizan como lo es el cambio de componentes por condición (CBR) en los tractores D11R Caterpillar, utilizando la metodología lean six sigma buscando identificar los desperdicios (operaciones que no agregan valor) que se presentan durante la ejecución de los mantenimientos.

## Drummond Ltd

**Figura 1.** Panorámica Mina Pribbenow - La Loma – Cesar.



Fuente: Drummond. [En línea]. Bogotá D.C. Disponible en <http://www.drummondLtd.com/lo-que-significa-trabajar-en-drummond/>.

Con operaciones en los departamentos del Cesar y Magdalena, Colombia, tenemos como objetivo esencial la exploración, explotación, transporte y exportación de carbón.

En 1995 iniciamos la explotación de carbón en un área otorgada por el gobierno colombiano, entre los municipios de El Paso, La Jagua de Ibirico y Chiriguaná, conocida como Mina Pribbenow o proyecto La Loma. En 2009 iniciamos la explotación de un segundo proyecto, El Descanso – Sector Norte, ubicado en los municipios de Becerril y Agustín Codazzi.

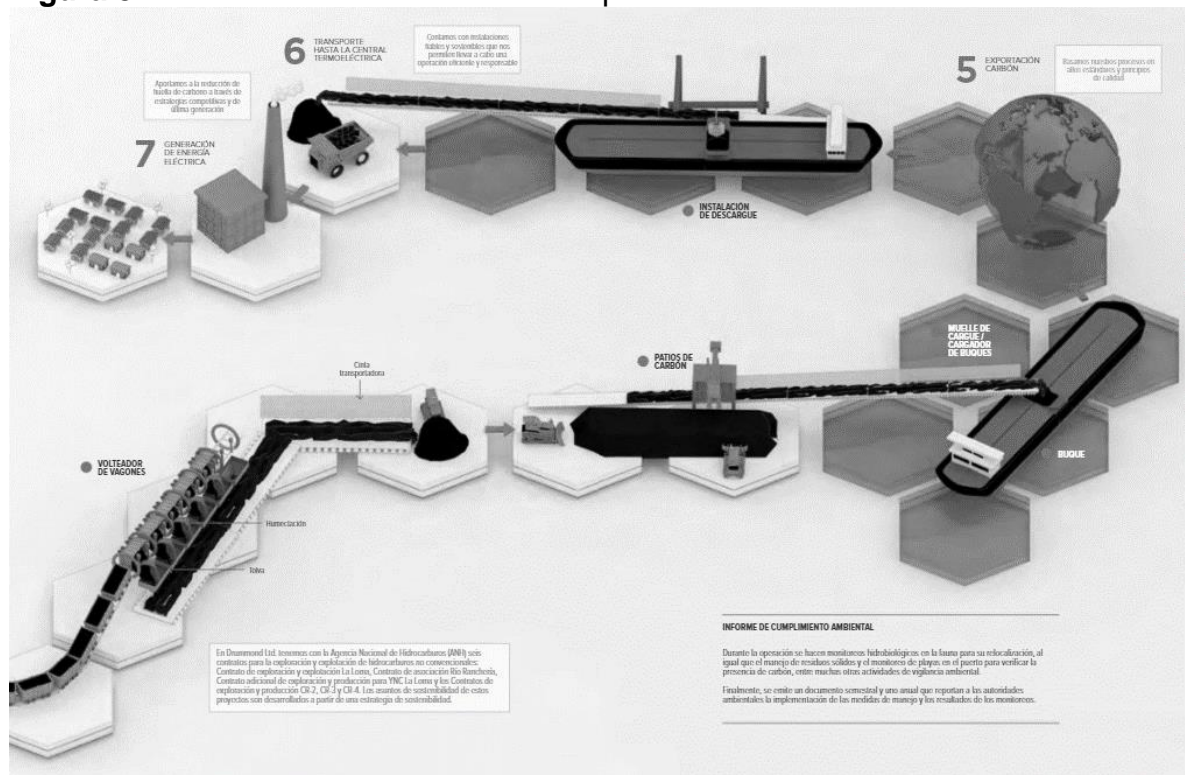
Como complemento de nuestra operación minera, hemos trabajado en coordinación con las diferentes autoridades colombianas en la construcción y ahora en la ampliación de Puerto Drummond para la exportación de nuestra producción, así como, a través de Fenoco, hemos promovido y participado en la rehabilitación y ampliación de la red férrea del Atlántico. En la actualidad contamos con reservas de aproximadamente 2 mil millones de toneladas de carbón en nuestros proyectos La



Fuente: Drummond. [En línea]. Bogotá D.C. Disponible en [https://issuu.com/drummondLtd/docs/2018\\_informes\\_de\\_sostenibilidad\\_-\\_es?fr=sYzKxNzEwNzg1NQ](https://issuu.com/drummondLtd/docs/2018_informes_de_sostenibilidad_-_es?fr=sYzKxNzEwNzg1NQ)

En la actualidad, Drummond Ltd produjo 30,8 millones de toneladas de carbón y exporto 31,5 millones de toneladas, las cuales representaron pagos por regalías y compensaciones a favor del gobierno nacional por USD \$ 387,5 millones y más de USD \$ 236 millones por impuestos, tasa y contribuciones.

**Figura 3. Nuestra cadena de valor “Transporte”**



Fuente: Drummond. [En línea]. Bogotá D.C. Disponible en [https://issuu.com/drummondLtd/docs/2018\\_informes\\_de\\_sostenibilidad\\_-\\_es?fr=sYzKxNzEwNzg1NQ](https://issuu.com/drummondLtd/docs/2018_informes_de_sostenibilidad_-_es?fr=sYzKxNzEwNzg1NQ)

## HISTORIA Y EVOLUCIÓN

Durante la década de los 80, Drummond Company Inc. evaluó diferentes alternativas de inversión en proyectos carboníferos en varios países del mundo, tanto en el mercado del Pacífico como del Atlántico. Finalmente, en 1987, basándose en factores como el recurso humano, la geología, la tecnología, el acceso al mercado y la sostenibilidad ambiental, consideró a Colombia como la mejor opción.

Drummond Company Inc. constituyó Drummond para el desarrollo de sus proyectos en Colombia y obtuvo, a través de esta sucursal, los derechos para la exploración, explotación y exportación de carbón localizado en el departamento del Cesar, específicamente en el área comprendida entre los municipios de El Paso, La Jagua de Ibirico y Chiriguaná. Esta zona se denominó Mina Pribbenow, también conocida como Proyecto Carbonífero La Loma.

A comienzos de los 90, Drummond realizó los trabajos de exploración de este proyecto, así como estudios socioeconómicos y ambientales en los municipios de influencia. Estas investigaciones permitieron conocer los perfiles de la población en edad de trabajar y la situación social y económica de sus habitantes. Igualmente, se determinaron condiciones del aire, del agua, de la flora y de la fauna de la región, con el fin de protegerlos o recuperarlos.

En 1995 comenzó la producción y exportación de carbón y desde entonces la presencia de Drummond ha sido importante para la economía regional y nacional. Con el inicio de la producción, la compañía emprende un proceso de mejoramiento continuo y expansión de las operaciones mineras, férreas y portuarias. En 2009 inició la explotación de su segundo proyecto, El Descanso. De hecho, Drummond hoy cuenta con cerca de 2.000 millones de toneladas de reservas en los proyectos La Loma, El Descanso, Rincón Hondo, Similoa y Cerrolargo, los tres últimos en proceso de licenciamiento ambiental.

Paralelo al desarrollo minero está la exploración y desarrollo de proyectos de gas metano asociado a fuentes no convencionales (carbón y gas de esquisto). La compañía cuenta con dos contratos para el desarrollo de este hidrocarburo, uno en el departamento del Cesar y el otro en La Guajira, en asocio con Ecopetrol<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Drummond. [En línea]. Bogotá D.C. Disponible en <http://www.drummondLtd.com/quienes-somos/drummond-en-colombia/>

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Drummond LTD opera en las minas Pribbenow y el Descanso, ubicadas en el centro del departamento del Cesar, Colombia. Posee reservas totales de carbón de más de 2 mil millones de toneladas. En 2018 exportó aproximadamente 32 millones de toneladas de carbón a clientes en más de 30 países en todo el mundo.

Drummond LTD en mina está dividido en varios departamentos, uno de ellos es el departamento de equipo móvil, el cual a su vez se subdivide en flotas (Camiones 793, Camiones 777, Tractores, Cargadores y equipo liviano), donde la flota de tractores se encarga de realizar el mantenimiento a tres modelos de tractores de oruga (D11, D10, D9) y a las excavadoras (345).

El modelo D11 es el tractor de orugas de mayor capacidad producido por CATERPILLAR, representando en la flota tractores el 50% del total de los equipos, son utilizados en las áreas de Dragalina, Pala, Botadero, Vias, Bombas, Carbon, LoadOut (Cargue de trenes) para la función básica de empujar ya sea carbón, aluvión o esteril. Lo que convierte a los tractores D11R en una parte fundamental del proceso.

La empresa para medir, analizar y evaluar la calidad del mantenimiento, se ha enfocado en los siguientes indicadores clave de desempeño (KPI): disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad.

El área de mantenimiento ha realizado grandes esfuerzos en mejorar estos indicadores, alcanzando resultados satisfactorios en cuanto a la disponibilidad y la confiabilidad. Sin embargo, estos esfuerzos no se han visto reflejados en la mantenibilidad de los equipos. La mantenibilidad, en la flota, se mide en horas necesarias para dejar un equipo operativo y el valor óptimo propuesto es 20 horas.

Los procesos de mantenimiento que se desarrollan en la flota tractores se resumen en remplazo basado en condición (CBR), Mantenimiento preventivo (PMs), reparación e instalación (R&I). Siendo el proceso de CBR el más crítico ya que los tiempos de reparación son muy altos, de ahí la baja mantenibilidad que se presenta actualmente en la flota de tractores y excavadoras (promedio mayor a 30 horas) es desfavorable ya que indica que se están empleando recursos mayores a los establecidos para la realización del mantenimiento de los equipos, lo cual repercute en los costos generados. Así, se hace necesario planear y desarrollar una estrategia de mantenimiento más eficiente.

Se iniciará con este proceso piloto de mejora en los tiempos de reparación para el proceso de CBR para los D11R y después se intentará llevar a otros procesos, buscando alcanzar la misión de la flota de mantenibilidad o tiempos medios de

reparación (MTTR) menor a 20 Hrs, al mismo tiempo que se reducen los costos y sin llegar a afectar la confiabilidad. Actualmente el tiempo de reparación en el proceso de CBR es uno de los que mayormente está impactando la disponibilidad de los D11R, lo que se busca es seguir siendo compitiendo en el mercado global para lo que se requiere de un departamento que sea capaz de proveer una gran disponibilidad de la forma más eficientemente posible, por lo que se hace necesario plantear una estrategia de mejora en los tiempos de reparación que permita mejorar la disponibilidad.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar una propuesta de mantenimiento basado en la metodología lean six sigma para mejorar los tiempos medios de reparación del proceso de remplazo basado en condición de los equipos Caterpillar D11R de la empresa Drummond LTD.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir una metodología para aplicar lean six sigma en el proceso de Reparación de los equipos *Caterpillar D11R*.
- Identificar las brechas de rendimientos a través del nivel sigma teniendo en cuenta el desempeño actual y lo que se puede lograr en el proceso de CBR de los equipos *Caterpillar D11R*.
- Determinar las causas raíz y los orígenes de variabilidad del proceso, que impactan en los altos tiempos de reparación en el proceso de CBR para los equipos *Caterpillar D11R*.
- Generar recomendaciones que brinden soluciones a las causas raíz de los altos tiempos en busca de mejorar el proceso de reparación CBR para los equipos *Caterpillar D11R*.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La visión empresarial de Drummond LTD es ser la empresa productora de carbón a largo termino, más seguro, confiable y productivo a bajo costo, siguiendo esta premisa se posicionó durante el 2017 como la empresa minera que mayores recursos obtuvieron, y durante los últimos años siempre ha estado en el top de empresas extractoras de carbón de Colombia.

La flota tractores y excavadoras de la empresa Drummond LTD en su proceso de mejora continua ha identificado la importancia de buscar y desarrollar nuevos métodos de optimización de la estrategia de mantenimiento, contribuyendo a la competitividad de la empresa.

A demás la caída en la cotización del precio internacional del carbón registrada en los últimos cinco meses le está pasando cobro a la producción nacional, así como las exportaciones del mineral. La razón es la variación negativa del 50% que ha presentado la tarifa en el mercado mundial (IEC, futuros Rotterdam) para este producto que no sólo ha traído consigo un decrecimiento marcado en las ventas del carbón colombiano en el exterior, sino que, de paso, ya está Comenzando a afectar su producción en el territorio nacional.

Otra de las variables que ya comienzan a sentir los efectos por la caída internacional de los precios del carbón es la producción nacional del mineral.

El principal afectado por este comportamiento es el flujo de caja, el cual se reduce y de paso se restringe los costos de operación. Al verse afectado los costos de operación, se da un recorte en la operación, en el plan de inversión para el mantenimiento y/o reposición de equipos y la ejecución de proyectos<sup>4</sup>.

El objetivo de esta Monografía es mejorar la efectividad del proceso para lograr una mayor competitividad en un mercado global que está en constante desarrollo y se ve afectado por las constantes fluctuaciones del precio del carbón.

Se iniciará con este proceso piloto de mejora en los tiempos de reparación para el proceso de CBR para los D11R y después se llevará a otros procesos, buscando alcanzar la misión de la flota de mantenibilidad (MTTR) en el proceso de CBR menor a 500 Hrs, al mismo tiempo que se reducen los costos y sin llegar a afectar la confiabilidad

---

<sup>4</sup> LÓPEZ, Alfonso. Caída en precio del carbón ya afecta la operación en el país. En: Portafolio. 09, junio, 2019.

#### 4. MARCO REFERENCIAL

El mantenimiento tiene como función principal conservar la funcionalidad de los equipos y el buen estado de las maquinas a través del tiempo. Con la finalidad de establecerse como un área de mayor importancia en una empresa, el mantenimiento ha evolucionado a lo largo de la historia, adaptándose a las necesidades de los clientes.

En un inicio el mantenimiento se consideraba poco importante y era ejecutado solo por el personal de operación o producción. Durante décadas el rol de mantenimiento fue considerado como un mal necesario del funcionamiento de una organización, en estas empresas la operación de mantenimiento se limitaba a corregir fallos y a atender emergencias, no se tenía conciencia del tiempo de inactividad del equipo, actualmente esa actitud no es aceptable. El mantenimiento con el transcurrir del tiempo ha pasado a ser un departamento de gran importancia en la compañía, reconociéndolo como un elemento estratégico en la generación de ingresos para las empresas.

Ésta área tiene la capacidad de afectar elementos críticos en una compañía como la calidad del producto, niveles de presupuesto operativo, gastos en pólizas e impactos en la seguridad y el medio ambiente, es por esto que el área de mantenimiento posee indicadores claves de desempeño (KPI), en los que encontramos disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad para verificar y evaluar el desempeño de la gestión del mantenimiento.

La gestión de mantenimiento se convierte en una función compleja, que necesita de habilidades técnicas y de gestión, sin dejar de ser flexibles al momento de enfrentar al entorno empresarial dinámico. Las estrategias de mantenimiento han cambiado gradualmente del mantenimiento preventivo, mantenimiento basado en condición, mantenimiento basado en tiempo, el mantenimiento mejorativo, el mantenimiento productivo total y ciclo de vida del activo.

El mantenimiento lo definen como un grupo de actividades técnicas, administrativas y gerenciales que se realizan durante el ciclo de vida del activo. Teniendo como objetivo retener o restaurar su estado funcional<sup>5</sup>. Las estrategias de mantenimiento logran organizar las actividades secuencialmente<sup>6</sup>. Entre estas actividades encontramos inspección, monitoreo, mantenimiento de rutina, revisión, reconstrucción y reparación.

---

<sup>5</sup> ALSYOUF, Imad. The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. [Base de datos en línea]. Enero 2007. International Journal of Production Economics. 105(1) 70-78. (Recuperado en 18 de Octubre de 2019). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092552730600065X>

<sup>6</sup> MULLER, Alexandre; CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo; LUNG, Benoit. On the concept of e-maintenance: Review and current research. [Base de datos en línea]. Agosto 2008. Reliability Engineering & System Safety. 93(8) 1165-1187. (Recuperado en 18 de Octubre de 2019). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832007002189>

Actualmente en el área de mantenimiento existen indicadores claves de desempeño, en los que encontramos disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad.

Hoy día, las empresas para seguir creciendo deben realizar evaluación de si aplicar mantenimiento o reposicionar sus equipos, a partir de la edad, producción y las condiciones del mercado<sup>7</sup>. Es por esto que la eficiencia de la gestión de mantenimiento de una empresa en la actualidad es un objetivo vital para seguir desarrollando su negocio, éstas en su búsqueda de ganar competitividad ante la actual crisis necesitan constantemente soluciones más rentables<sup>8</sup>. En el caso de los equipos que cumplen una función vital en el proceso productivo por lo general se presentan ineficiencias y dificultades al momento de toma de decisiones<sup>9</sup>. Teniendo en cuenta, que el desempeño de una empresa (en términos de calidad, flexibilidad, tiempo y costo) se basa en generar actividades, que buscan la eficiencia general a partir de la eficiencia local mediante una secuencia de operaciones y a través de la suma del desempeño local. Muchas empresas alrededor del mundo se encuentran desarrollando metodologías de gestión que permitan mejorar la toma de decisiones y el servicio que ellas ofrecen, perfeccionando sus procesos y logrando mayor rentabilidad al disminuir costos sin afectar la satisfacción del cliente. Esto se ha buscado a través de enfoques integrados como el de Lean Management y Six Sigma en su gestión. Lean se enfoca principalmente en la eliminación de desechos, utilizando técnicas simples y visuales siempre que sea posible, mientras que, Six Sigma se basa en el control y la reducción de la variabilidad de procesos, utilizando herramientas estadísticas para este propósito.

Lean six sigma (LSS) integra dos filosofías de gestión, la cuales se complementan entre sí para mejorar los procesos y obtener mejores resultados en las empresas, siendo así, una metodología de mejora en la calidad y rentabilidad basado principalmente en cinco pasos, los cuales se abrevian o representan en las siglas DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve and Control). Seguir estos pasos durante la realización de un proyecto, es de gran ayuda para los gerentes de proyectos, puesto que, genera mayor efectividad e

---

<sup>7</sup>SMAIN Aib, et al. Diagnosis of geometrical defects and rebuilt method of machine-tools accuracy. 2012, marzo. [En línea]. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/252068235\\_DIAGNOSIS\\_OF\\_GEOMETRICAL\\_DEFECTS\\_AND\\_REBUILT\\_METHOD\\_OF\\_MACHINE-TOOLS\\_ACCURACY](https://www.researchgate.net/publication/252068235_DIAGNOSIS_OF_GEOMETRICAL_DEFECTS_AND_REBUILT_METHOD_OF_MACHINE-TOOLS_ACCURACY) el 20 de Agosto de 2019

<sup>8</sup> YOUSOUF, A., RACHID, C., and VERZEA, I. Contribution to the Optimization of Strategy of Maintenance by Lean Six Sigma. Physics Procedia, 55, 512–518. Recuperado de doi:10.1016/j.phpro.2014.08.001

<sup>9</sup> RACHID, Chaib, VERZEA, Ion and BENIDIR, Mohamed. Contribution to the Performances Improvement of a Machine Boring Mill Operation. [en línea]. Brasov, Romania. 2010. Disponible en internet. ISSN 1582-0246.

innovación, a continuación, se mencionan algunos de los argumentos para recurrir a la implementación del LSS:

- Conocimiento adecuado de los procesos estadísticos para comprender y mejorar los resultados futuros.
- Una serie de pasos sólidos y herramientas para la mejora de procesos.
- Decisiones basadas en hechos y análisis cuantitativos concretos.
- Conocimiento de la variabilidad para reducir las reacciones instintivas.

## 4.1 LEAN

El pensamiento Lean surgió inicialmente con el desarrollo del Sistema de Producción Toyota (TPS), que Taiichi Ohno y sus colaboradores desarrollaron para Toyota en un escenario de limitaciones de capital y recursos durante la recuperación de la posguerra<sup>10</sup>. El sistema de producción Toyota fue desarrollado en Japón entre 1948 y 1975. El término Lean fue acuñado por James Womack, investigador del Instituto de Tecnología de Massachusetts, EEUU, en su libro “la máquina que cambió el mundo”. La industria automotriz estadounidense comprendió que el enfoque Lean había dado como resultado autos más confiables fabricados de manera más eficiente y a menor costo<sup>11</sup>. La gestión empresarial llamada Lean puede traducirse como (empresa ágil) o (empresa flexible), vincula el rendimiento (seguridad, productividad y calidad) con la flexibilidad de una empresa que debe ser capaz de optimizar y mantener todos sus procesos. Lean busca mejorar el rendimiento y la eliminación de desperdicios.

**4.1.1 Lean manufacturing.** Lean significa usar eficientemente los recursos disponibles al identificar y reducir las actividades que no agregan valor (NVA). Lean manufacturing es una agrupación de prácticas que trabajan en sinergia para crear un sistema de alta calidad que produce productos terminados al ritmo de la demanda del cliente<sup>12</sup>. Definiendo el “desperdicio” como cualquier actividad que agregue costos a un producto o servicio sin agregar valor desde la perspectiva del cliente, estos se pueden agrupar en tres tipos: desperdicios no

---

<sup>10</sup> KURDVE, M., ZACKRISSON, M., WIKTORSSON, M., Harlin, U. Lean and green integration into production system models experiences from Swedish industry. 2014. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.013> el 20 de agosto de 2019

<sup>11</sup> SOMMER, Adir; BLUMENTHAL, Eytan. Implementation of Lean and Six Sigma principles in ophthalmology for improving quality of care and patient flow. [Base de datos en línea]. Septiembre-Octubre de 2019. Survey of Ophthalmology. 64(5) 720-728. (Recuperado en 20 de Diciembre de 2019). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0039625718302108>

<sup>12</sup> SHAH, Rachna; WARD, Peter T. Defining and developing measures of lean production. [Base de datos en línea]. Junio de 2007. Journal of Operations Management. 25(4) 785-805. (Recuperado en 18 de Diciembre de 2019). Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/222434298\\_Defining\\_and\\_Developing\\_Measures\\_of\\_Lean\\_Production](https://www.researchgate.net/publication/222434298_Defining_and_Developing_Measures_of_Lean_Production)

obvios, desperdicios no tan obvios y desperdicios obvios<sup>13</sup>. En los que encontramos inventario innecesario, procesos innecesarios, tiempos de ajustes excesivos, maquinas poco confiables, retrabajo, tiempos de proceso, tiempos de entrega, tasas de rendimiento (productividad), niveles de personal y tasa de demanda. Ohno <sup>14</sup>, en un inicio identifico siete clases de desperdicios dentro del sistema de producción Toyota (TPS). Mas tardes Womack y Jones incluyeron la octava clase de desperdicio<sup>15</sup>.

1. Sobre producción: Se encuentra cuando producimos demasiados artículos o demasiado pronto, lo que repercute en el exceso de inventario.
2. Defectos: Resulta de errores frecuentes en papeleo o problemas de calidad del material/ productos que son rechazados o necesitan de un re trabajo.
3. Procesamiento inapropiado: Uso de un conjunto inapropiado de herramientas, procedimientos o sistemas, a menudo cuando un enfoque más simple puede ser más efectivo.
4. Transporte excesivo: Movimiento excesivo de información o materiales, que resulta en pérdida de tiempo y aumento de costos.
5. Espera: Son los largos periodos de inactividad para personas, información o bienes, lo que resulta en flujo deficiente y largos tiempos de entrega.
6. Movimientos innecesarios: Mala distribución del lugar de trabajo, lo que conlleva a ergonomía deficiente, encontrando flexión o estiramientos excesivos y artículos frecuentemente utilizados.
7. Exceso de inventario: Almacenamiento excesivo y falta de la información o productos, lo que repercute en excesos de inventario y costos.
8. Subutilización de los empleados: Desaprovechar las habilidades y creatividad de los empleados que pueden servir para mejorar los procesos, conocimiento, experiencia o no utilizarlos en el departamento adecuado<sup>16</sup>.

**4.1.2 Lean Maintenance.** El término Lean Maintenance fue introducido a finales del siglo XX, al incluir el pensamiento Lean en las prácticas de mantenimiento<sup>17</sup>. Se definió el Lean Maintenance como un mantenimiento proactivo que emplea actividades planeadas y programadas de mantenimiento a través de prácticas de mantenimiento productivo total (TPM), utilizando prácticas de mantenimiento

---

<sup>13</sup> HOPP, W.J; SPEARMAN, M.L. Commissioned Paper To Pull or Not to Pull: What Is the Question?, *Manufacturing & Service Operations Management*. 6(2004)133-148.

<sup>14</sup> OHNO, Taiichi. *Toyota production system: beyond large-scale production*, Productivity Press, Portland, 1988.

<sup>15</sup> SHERIF, Mostafaa; JANTANEE Dumrakh; HASSAN Soltanc. Lean maintenance roadmap. [Base de datos en línea]. Febrero de 2015. *Procedia Manufacturing*. 2 434-444. (Recuperado en Enero de 2020). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978915000773>

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p. 438.

<sup>17</sup> SMITH, Ricky y HAWKINS, Bruce. *Lean maintenance; reduce cost, improve quality, and increase market share*. Elsevier Butterworth-Heinemann. 2004. ISBN 9780080478906

desarrolladas para la aplicación de la estrategia de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) y que son empleadas por personal capacitado<sup>18</sup>.

Una falla en el equipo además de generar una pérdida de productividad, también hace que no se puedan prestar servicios oportunos a los clientes o incluso puede conducir a problemas de seguridad y medio ambiente llevando a la quiebra de una empresa<sup>19</sup>.

Levitt definió el Lean Maintenance como la prestación de servicios de mantenimiento a clientes con el menos desperdicio posible. Promueve el logro de los resultados en el área de mantenimiento con la menor cantidad de insumos posibles<sup>20</sup>. Estos insumos incluyen: mano de obra, repuestos, herramientas, energía, capital y esfuerzo de gestión. Generando una mayor disponibilidad y un proceso con menor variación.

El Lean maintenance minimiza el consumo de insumos generando un resultado positivo. Este adopta principios y herramientas de Lean Manufacturing en las operaciones de mantenimiento, reparación y revisión, para el proceso de implementación. Dentro de estas herramientas encontramos las 5'S, gestión visual<sup>21</sup>, TPM, efectividad global de equipos (OEE), Kaizen, poka-yoke, mapeo de actividades de proceso, Kanban, sistema de mantenimiento administrado por computadora (CMMS), sistema de gestión de activos empresariales (EAM) y tiempos de ciclo<sup>22,23</sup>. Con estas herramientas se logra eliminar los desperdicios en el mantenimiento al igual que en la manufactura.

**4.1.3 Desperdicios en mantenimiento.** Esta metodología busca la eficiencia del mantenimiento, identificando y eliminando los desperdicios durante el proceso. En el desarrollo del mantenimiento se encuentran los siguientes 8 desperdicios:

- **Mantenimiento improductivo:** Se presenta cuando se realizan tareas de mantenimiento a frecuencias mayores a las necesarias, lo que provoca exceso de trabajos de mantenimiento.

---

<sup>18</sup> SMITH, R. What is Lean maintenance? Elements that need to be in place for success, Maintenance Technology. (2004) 15-21

<sup>19</sup> GÓRNY, A. The work environment in the structure of management system, [in:] Z. Car, J. Kudláček, T. Szalay (eds.), Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2013, Faculty of Engineering University of Rijeka, Rijeka pp. 217 – 220.

<sup>20</sup> LEVITT, J. (2008). Lean Maintenance, Elsevier Butterworth-Heinemann

<sup>21</sup> SMITH, Ricky y HAWKINS, Bruce. Op.Cit., p, 128.

<sup>22</sup> SMITH. Op. Cit., p.18.

<sup>23</sup> DAVIES, C y GREENOUGH, R.M. Measuring the effectiveness of lean thinking activities within maintenance, Available from: [http://www.plantmaintenance.com/articles/Lean\\_Maintenance.pdf](http://www.plantmaintenance.com/articles/Lean_Maintenance.pdf) , 2010

- Esperando insumos de mantenimiento: Implica el tiempo que el personal de mantenimiento está detenido a la espera de herramientas, materiales, información, permisos y transporte necesario para realizar el mantenimiento.
- Gestión deficiente del inventario: No garantizar la disponibilidad de los repuestos requeridos. Un inventario mal gestionado da como resultado una respuesta lenta, averías inesperadas y un alto porcentaje de mano de obra reactiva.
- Mantenimiento centralizado: tener unas bodegas lejos del trabajo, los materiales que son de uso común y no se tienen en inventario, la documentación que se debe buscar y las ordenes de trabajo que no están disponibles causan un exceso de transporte. Por lo tanto, el personal de mantenimiento pasa más tiempo en movimiento buscando lo que necesita, lo que no agrega valor al proceso.
- Movimientos innecesarios: Este movimiento se observa mayormente en tareas de mantenimiento preventivo. La inspección mensual de una bomba que no ha cambiado de estado en tres años debe extenderse a un tiempo mayor teniendo en cuenta la importancia del equipo.
- Mantenimiento deficiente: Realizar una reparación incorrecta es una fuente de mantenimiento deficiente, requiere de un re trabajo para completar la reparación correctamente, esto afecta el costo y el tiempo del mantenimiento y la calidad del producto. Esto puede ser eliminado mediante capacitación y la implementación de procedimientos.
- Gestión de datos ineficaz: Recolección de datos innecesarios o inadecuada puede hacer que se realicen unos diagnósticos errados de causas raíz y estado de los equipos.
- Sub utilización de recursos: Usar técnicos de mantenimiento en trabajos que no generan valor agregado o desaprovechando las habilidades de los equipos de mantenimiento.

## 4.2 SIX SIGMA

Un equipo de ingenieros de Motorola, liderado por Bill Smith a mediados de los años 80, desarrolló la metodología Six Sigma con el objetivo de mejorar el rendimiento del proceso de producción, pero la metodología fue ampliamente difundida<sup>24</sup>. Es una metodología que busca generar productos y servicios con una mayor eficiencia, mediante la estandarización de los procesos.

Six sigma representa una métrica, una filosofía, una meta, definidas a continuación:

---

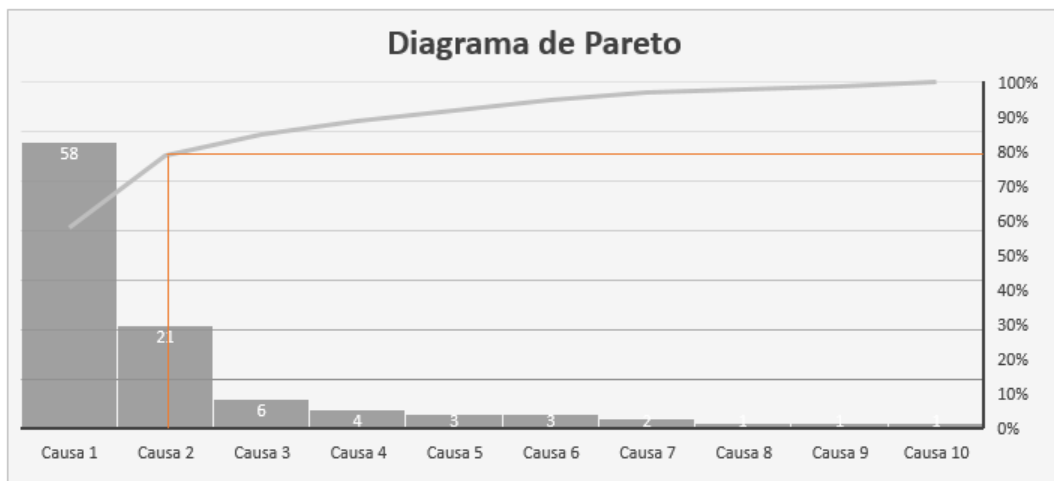
<sup>24</sup> SHAH, R., CHANDRASEKARAN, A., LINDERMAN, K. In pursuit of implementation patterns: the context of Lean and Six Sigma. 2008.Int. J. Prod. Res. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1080/00207540802230504> el 25 de agosto de 2019

- **Métrica:** Brinda la posibilidad de medir un proceso teniendo en cuenta su nivel de productos fuera de especificaciones y compararlos teniendo en cuenta la complejidad.
- **Filosofía:** Como filosofía invita a mejorar de manera continua los procesos y productos, con una metodología definida apoyada en herramientas estadísticas.
- **Meta:** Es una meta y un gran logro alcanzar un proceso que tenga un nivel de calidad six sigma, logrando la meta de tener 3,4 defectos por millón de oportunidades.

Para mejorar los procesos six sigma utiliza herramientas estadísticas y gerenciales, como el Diagrama de Pareto, el diagrama causa-efecto, entre otros, los cuales son explicados a continuación:

- **Diagrama de Pareto:** Desarrollado por el economista Wilfredo Pareto de origen italiano, observó que el 80% de las riquezas las poseían el 20% de las personas en el mundo, proponiendo el principio que determina que los elementos decisivos son relativamente pocos, sin embargo, los que tienen poca importancia son muchos. En los problemas de calidad los defectos son generados por un pequeño número de causas, con esta herramienta se pueden identificar cuáles son los pocos vitales y los muchos triviales, al atacar los pocos vitales se logra impactar de gran manera el proceso. El análisis del diagrama se realiza mediante un diagrama de barras organizado de mayor a menor respecto a su frecuencia.

**Figura 4.** Diagrama de Pareto.



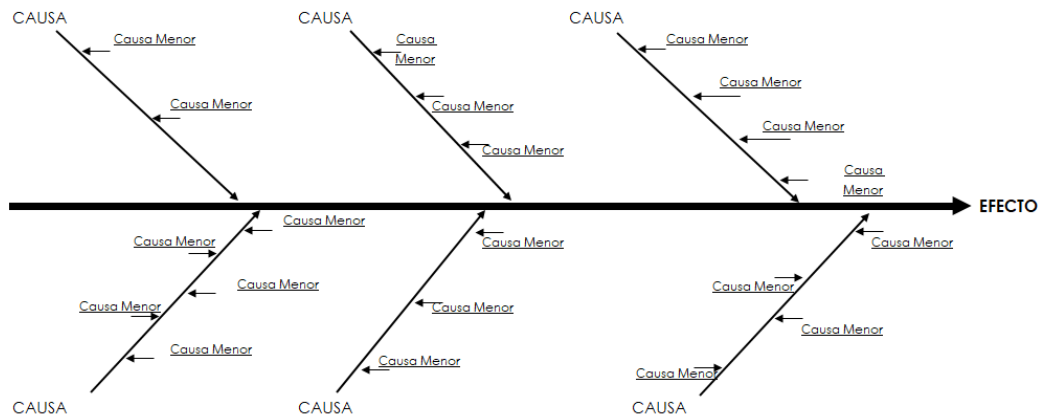
Fuente. Elaboración propia.

- **Diagrama Causa-Efecto:** También conocido como diagrama Ishikawa en honor al ingeniero japonés que impulsó su uso en la mejora de la calidad. El método gráfico se obtiene de una tormenta de ideas, donde se exponen

las causas que generan el efecto, normalmente en las ramas principales se utilizan las 6M (Mente de obra, maquinas, método, materiales, medición y medio ambiente), las 4P (Políticas, procedimientos, instalaciones y personas).

Este diagrama permite listar las causas verdaderas del efecto, una vez se encuentren las causas se pueden brindar soluciones más acertadas.

**Figura 5.** Diagrama causa-efecto



Fuente. Elaboración propia.

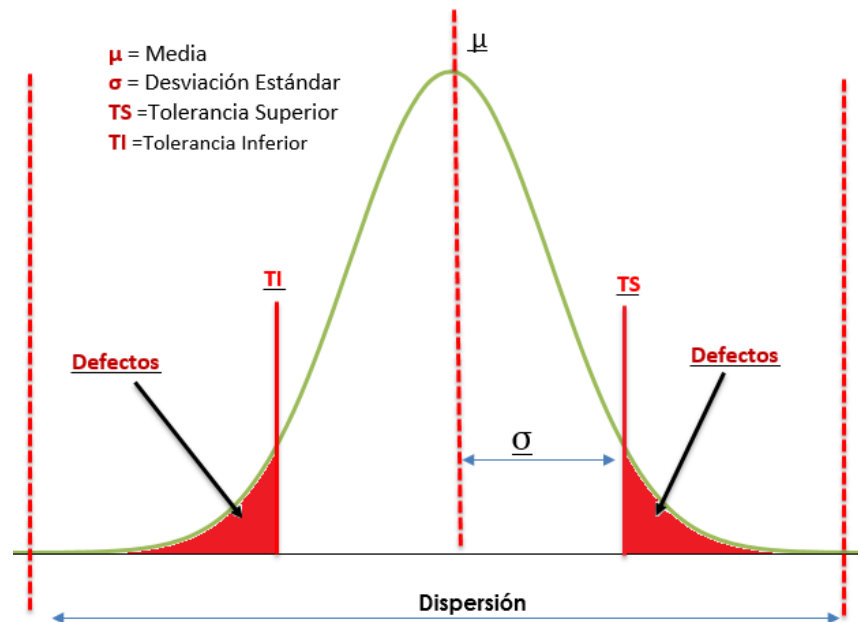
- Diagramas de Dispersión: Gráfico con variables X, Y para identificar correlaciones.
- Gráficos de Control: Permiten monitorear el proceso a lo largo del tiempo. EL eje x del gráfico representa el tiempo. Se tiene un límite de control que representa un objetivo.
- Control Estadístico de Procesos: Conjunto de herramientas estadísticas que, por medio de la recopilación, el estudio y análisis de datos identifica las causas de la variación con el objetivo de eliminar ésta y establecer un control.

La letra griega sigma representa la variabilidad estadística, también llamada desviación estándar, nos indica la dispersión de los resultados alrededor de la media con la ayuda de una escala de medición de 0 a 6. Cuando supera los límites establecidos por el intervalo tolerancia TI, se considera desperdicio. Cuando el numero sigma tiende a 6 los valores se encuentran más cerca al promedio.

Un proceso industrial incluye una serie de tareas repetitivas, el ejemplo más común es la producción en gran volumen de un producto. Un producto debe

cumplir con varios criterios. Sin embargo, todos no pueden ser estrictamente idénticos. Una de las principales preocupaciones de la gestión de calidad es cómo dominar las condiciones de producción buscando el menor desperdicio y la menor insatisfacción del cliente. En la figura 1, se puede observar la dispersión de los datos.

**Figura 6.** Gráfica de distribución normal de datos.

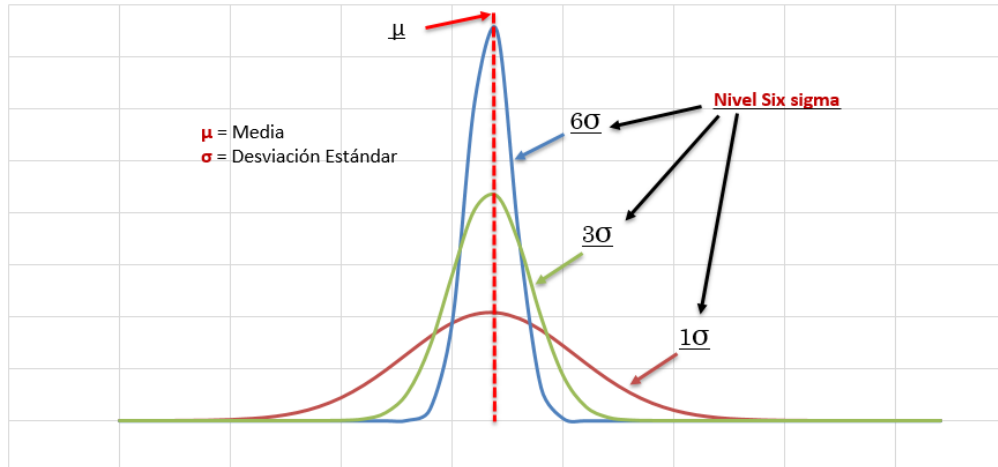


Fuente. YOUSSEUF, A., RACHID, C., and VERZEA, I. Contribution to the Optimization of Strategy of Maintenance by Lean Six Sigma

### 4.3 NIVEL SIGMA

Six sigma representa la meta de una tasa de 3.4 Defectos por millón de oportunidades (DPMO), diciéndolo de otra forma 3.4 productos defectuosos en una muestra de 1 millón, que corresponde a una tasa de calidad de 99.9997%. En la figura 2 se puede observar como es el comportamiento en la dispersión de datos para distintos niveles sigma.

**Figura 7. Gráfica Nivel Sigma**



Fuente. Elaboración propia.

A continuación, en la tabla 1 se ilustra el comportamiento del porcentaje de calidad, porcentaje de defectos y DPMO, de acuerdo, al nivel sigma.

**Tabla 1. Desempeño six sigma**

Sigma	% Calidad	% Defectos	DPMO
1	30,9%	69,10%	691462
2	69,1%	30,90%	308538
3	93,30%	6,70%	66807
4	99,38%	0,62%	6210
5	99,977%	0,023%	233
6	99,9997%	0,00034%	3,4

Fuente. YOUSSEUF, A., RACHID, C., and VERZEA, I. Contribution to the Optimization of Strategy of Maintenance by Lean Six Sigma

#### 4.4 LEAN SIX SIGMA

Es un método de mejora de la calidad y rendimiento, basado en el control estadístico de los procesos. Es un estilo de gestión que busca una organización esbelta. Su metodología enfocada a la mejora en empresa, tiene como objetivo maximizar el valor para el accionista, mejorando así, la calidad, la velocidad, la satisfacción del cliente y disminuyendo los costos. Lo logra combinando herramientas y principios de Lean y Six Sigma<sup>25</sup>.

Esta metodología y estrategia Lean Six Sigma, aumenta el rendimiento de los procesos, obteniendo una mayor satisfacción del cliente y mejores resultados

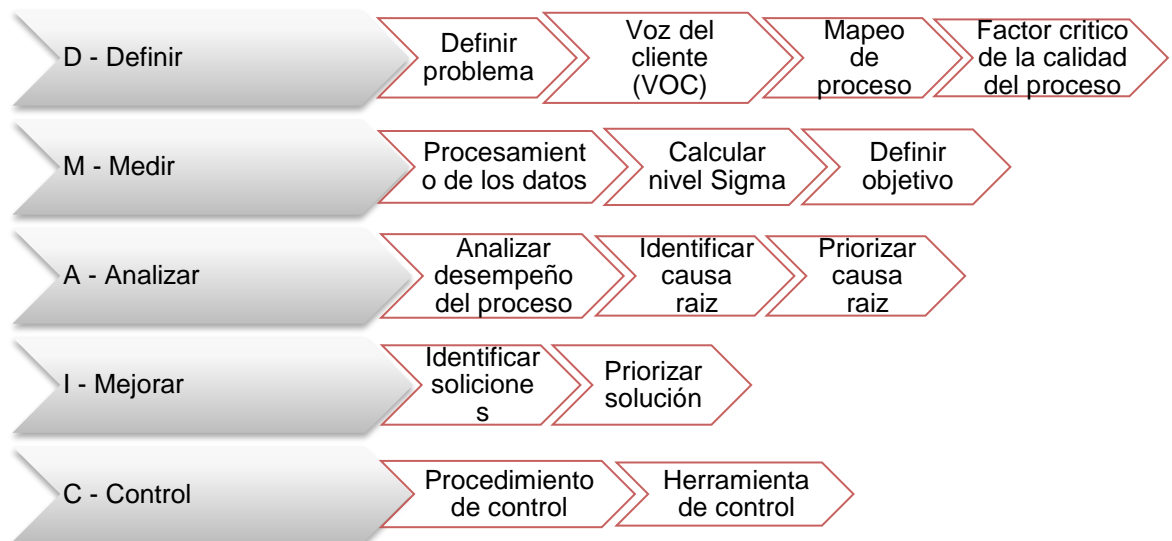
<sup>25</sup> GEORGE, M.L. Lean Six Sigma for Services. New York, NY,; McGraw-Hill, 2003.

finales. También se reconoce ampliamente que Lean Six Sigma es una herramienta efectiva de desarrollo de liderazgo<sup>26</sup>.

Tanto Six Sigma como Lean Management han evolucionado hacia un sistema de gestión integral. En cada caso, su implementación efectiva implica cambios culturales de la organización, nuevos enfoques en la producción y el servicio a los clientes, además de un alto grado de capacitación y educación de los empleados, desde la alta gerencia hasta el trabajador de línea<sup>27</sup>.

**4.4.1 Fases DMAIC.** Con la finalidad de obtener resultados confiables en la implementación de la metodología Lean Six Sigma, es necesario realizar 5 pasos secuenciales, tal como se ilustra de forma sencilla en la figura 5, donde el resultado de cada paso está respaldado por herramientas y métodos específicos acorde con el proceso a realizar.

**Figura 8.** Fases DMAIC.



Fuente. TENERA, A., and PINTO, L. C. A Lean Six Sigma (LSS) Project Management Improvement Model<sup>28</sup>. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 119, pp. 912–920, 2014.

Donde la fase definir (Define D) es el inicio de un enfoque clásico DMAIC, mediante el cual se define el problema principal detectado, esta fase ayuda a aclarar los problemas del proyecto, identificar las expectativas del cliente, establecer objetivos

<sup>26</sup> SNEE, R.D. Lean Six Sigma getting better all the time. *International Journal of Lean Six Sigma*. 1(1), pp. 9-29. 2010

<sup>27</sup> ARNHNEITER, E.D. and MALEYEFF, J. The integration of Lean management and Six Sigma. *The TQM Magazine*, 17(1), pp. 5-18. 2005.

<sup>28</sup> TENERA, A., and PINTO, L.C. A Lean Six Sigma (LSS) Project Management Improvement Model. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 119, pp. 912–920, 2014.

y a quienes conforman el equipo del proyecto. El primero paso es centrarse en el proceso que genera el producto o servicio.

Mientras que en el segundo paso Medir (Measure M), se recopilan datos sobre parámetros medibles del proceso. El objetivo es determinar qué es capaz de proporcionar el proceso en cuestión, es decir, su nivel sigma. Durante esta etapa, es importante tener claro los parámetros críticos para la calidad, aquellos de mayor impacto en el resultado.

En esta etapa Analizar (Analyze A), ya se ha obtenido una serie de datos, permitiendo calcular las brechas de rendimiento, esto es, las diferencias entre el desempeño actual y lo que se puede lograr. Luego se estudian los orígenes de la variabilidad del proceso y se determina la causa raíz, con la finalidad de proponer soluciones de mejora para eliminar las causas fundamentales de la variabilidad del proceso y así cumplir con los objetivos propuestos.

Luego en la fase Mejorar (Improve I), el equipo del proyecto desarrolla soluciones para atacar la causa raíz del problema, sugiriendo cambios, además, de un plan de acción para la implementación de las soluciones obtenidas.

Por último, en el paso Controlar (Control C), como su nombre lo indica, se controla el proceso, garantizando así que el problema se resuelva y se mantenga en el nivel de calidad alcanzado. Durante este paso, se debe mantener los beneficios obtenidos al estandarizar el proceso<sup>29</sup>.

La aplicación de este método al proceso de mantenimiento busca identificar los malos actores que se presentan en el proceso y que impactan en el tiempo de reparación, buscando la optimización de proceso en términos de rentabilidad y calidad.

---

<sup>29</sup> YOUSSEF. Op. Cit., p. 514

## 5. ANTECEDENTES

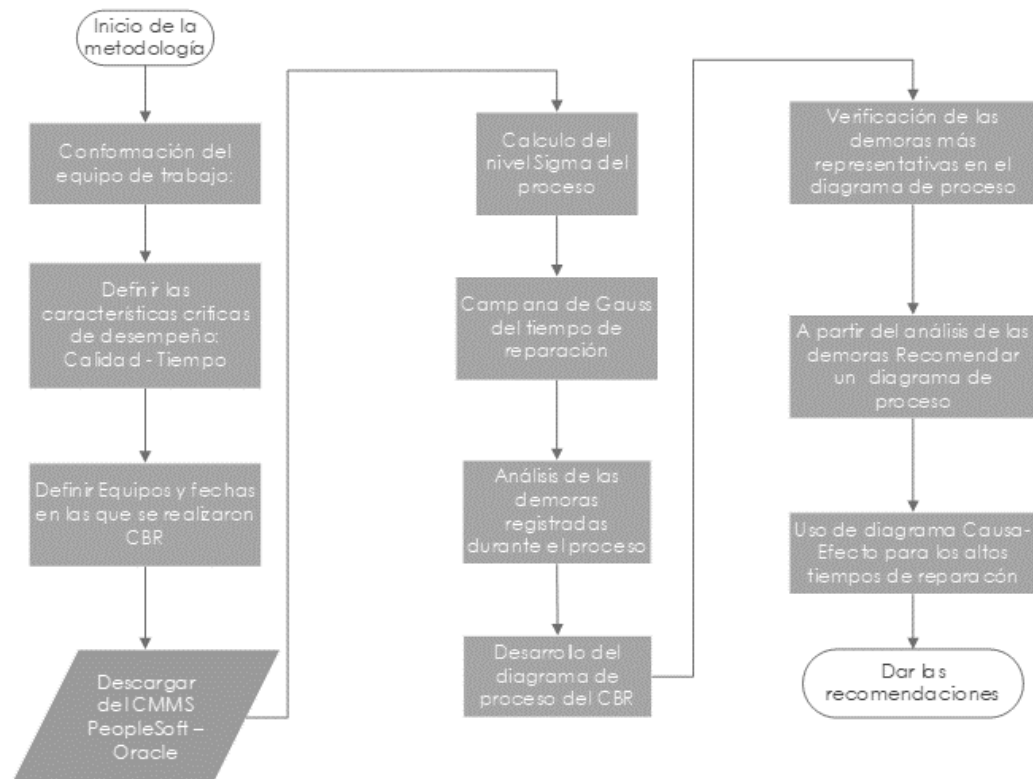
En el 2007, López Jeiner desarrolló una metodología seis sigma aplicada a la gestión del mantenimiento en la empresa Drummond LTD- Colombia. Enfocada en la reducción de errores generados durante las rutinas de mantenimiento preventivo, que impactaban en la disponibilidad de los tractores de oruga D11R Caterpillar, y proponiendo acciones que permitieran definir, medir, analizar, mejorar y controlar las labores de mantenimiento a partir de la metodología seis sigma, herramientas que ayudaron a desarrollar y controlar las actividades.

Luego en el 2011, Arzuaga José, propuso un modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) en la flota de equipos de oruga D11N de la empresa minera Drummond Ltd- Colombia. El cual se convirtió en un proyecto piloto con los equipos D11 asignados al área de botadero, con el fin de encontrar las tareas, frecuencias y recursos de mantenimiento necesarios para mejorar la disponibilidad y confiabilidad, utilizando la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

## 6. METODOLOGÍA

La metodología ilustrada en la figura 9, está basada en cuatro de los cinco pasos del Lean Six Sigma, Definir, Medir, Analizar y Mejorar. En la fase **definir** se comenzará por conformar el equipo de trabajo, definir qué es lo importante para nuestro cliente interno (características críticas de desempeño), identificar los equipos a los que se les realizó el proceso de CBR y las fechas en que se realizaron para descargar la información, en la fase **medir** se descargará la información para calcular el nivel sigma del proceso teniendo como base la duración total de cada una de las intervenciones, se procede a buscar cual es la media del tiempo empleado y con la ayuda de la herramienta six sigma (Diagrama de Pareto) se buscan las demoras más representativas, mientras que, en la fase **analizar** se identifican estas demoras y se procede a dibujar el diagrama actual de proceso de CBR, el cual se verifica con la ayuda del equipo de trabajo, verificando en que parte del diagrama de proceso se presentan los desperdicios enunciados en el pensamiento Lean y como el proceso actual genera las demoras más representativas en todo el proceso, por último, en la fase **mejorar**, ya con la información analizada por el equipo de trabajo se pasa a sugerir un nuevo diagrama de proceso y generar recomendaciones que busquen eliminar los desperdicios.

**Figura 9.** Descripción metodológica de cuatro pasos del Lean Six Sigma.

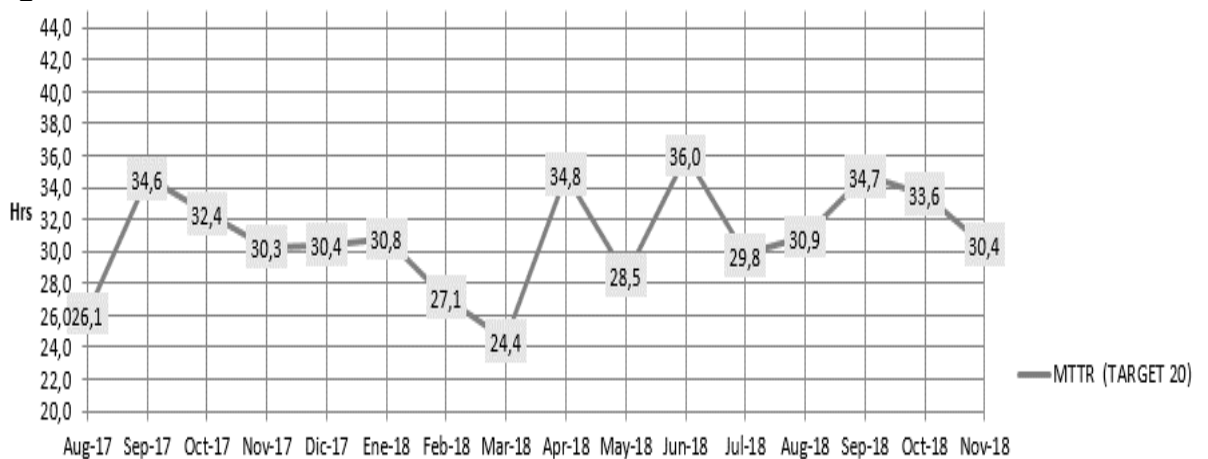


Fuente. Elaboración propia.

## 6.1 DEFINIR

En el departamento de mantenimiento se toman las decisiones basados en los indicadores claves de desempeño (KPI), la selección del proyecto que se desarrolla a continuación se realizó en base al comportamiento de uno de los KPI, históricamente el indicador de mantenibilidad ha sido mayor a los benchmark que recomienda el fabricante para los tractores de oruga D11 Caterpillar, por esta razón nace el interés del superintendente asistente de la flota plantear un proyecto alineado con la estrategia de la compañía para mejorar la mantenibilidad de los D11R comenzando por el proceso de CBR.

**Figura 10. MTTR tractores D11.**



Fuente. Elaboración propia.

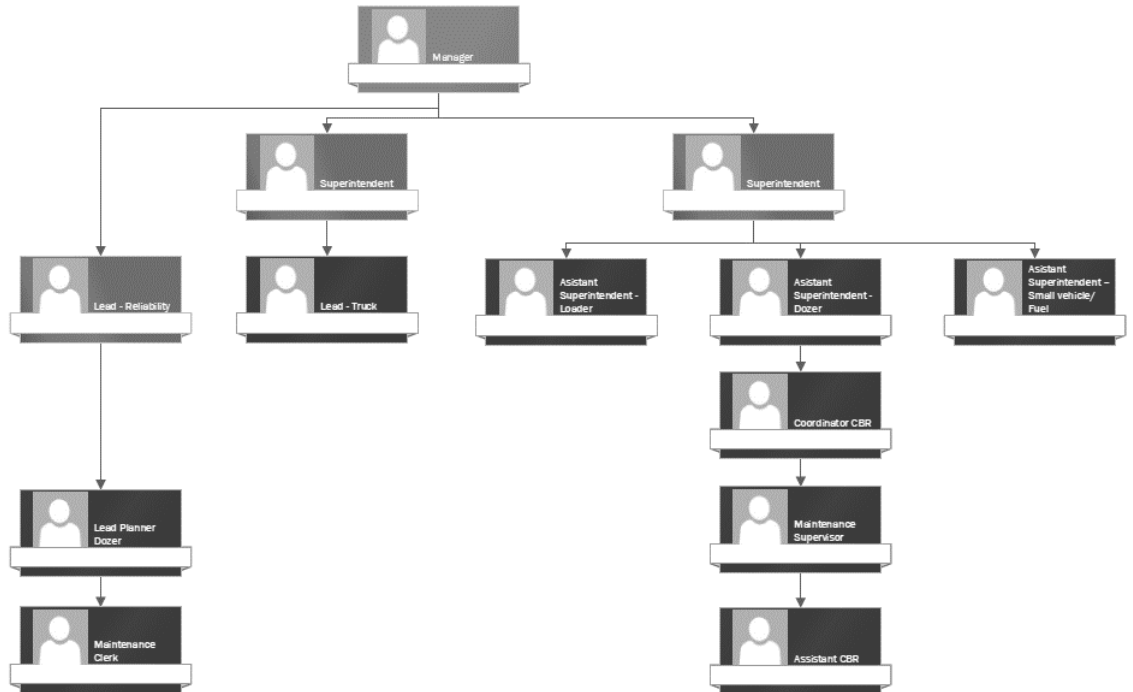
La fase definir es una de las más importantes, lo que se desea es aumentar la probabilidad de éxito del proyecto y para esto se inicia determinando quienes conforman el equipo de trabajo, los alcances del proyecto, quienes son los clientes, como se obtendrán los datos analizar, que es lo que busca nuestro cliente y que se considera un defecto.

Para la conformación del equipo de trabajo se tomó en cuenta la experiencia de cada integrante en el proceso, siendo formado por el superintendente asistente de mantenimiento y líder de la flota de tractores (Especialista en Gerencia de Mantenimiento), el coordinador del proceso de R&I y CBR (Ingeniero Mecatrónico), el asistente de CBR (Ingeniero Mecatrónico) y el asistente de mantenimiento (Ingeniero Mecánico). La primera tarea del grupo del proyecto es definir el alcance del proyecto, se comunican los objetivos entre los integrantes, la segunda es verificar que el proyecto este alineado y cumpla con los siguientes 6 aspectos:

- Relacionado con un parámetro importante para el cliente.
- De gran importancia para la organización.
- De alcance razonable.
- Sea de interés común para todos los miembros del equipo.

- Tenga una métrica adecuada.
- Cuente con el apoyo de la administración.

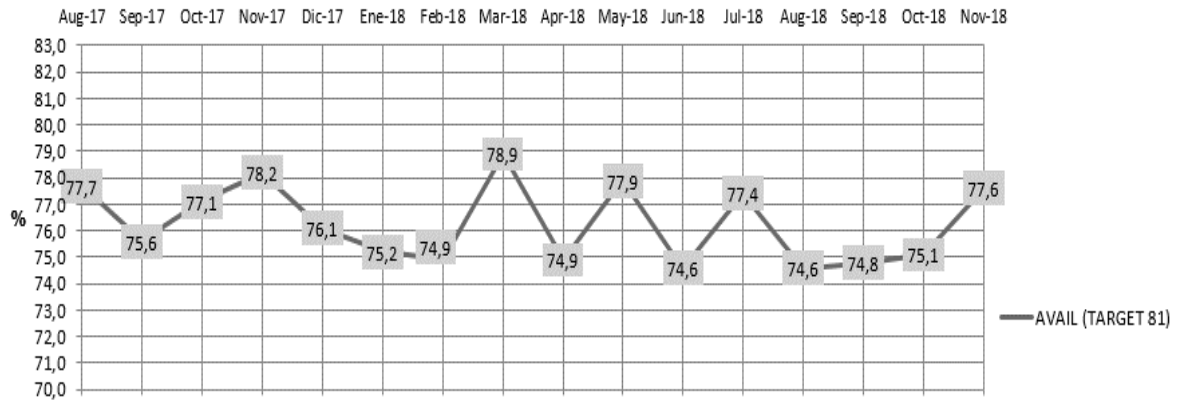
**Figura 11.** Organigrama de mantenimiento Drummond Ltd.



Fuente. Elaboración propia.

Ya con el alcance definido “proceso de CBR que se realiza en el taller backline de la mina Pribbenow a los tractores de oruga D11R”, lo que sigue determinar que es un defecto y se parte de que la cantidad de trabajo que se realiza durante una intervención de cambio de componentes por condición puede variar, sin embargo, para razones prácticas se determina como tiempo objetivo el que se emplearía en cambiar la totalidad de los componentes (Anexo A), por lo tanto, cualquier caso en el que el tiempo se superior a este se definirá como un defecto. Por otro lado, los clientes de la flota de tractores son clientes internos que esperan tener una disponibilidad superior al 81% y así garantizar el normal funcionamiento de las operaciones en la mina, esa disponibilidad es función de la confiabilidad (Calidad en reparaciones) y la mantenibilidad (Tiempo en las reparaciones). En la Figura 12 se observa el comportamiento de la disponibilidad de los tractores D11.

**Figura 12.** Disponibilidad de tractores D11.



Fuente. Elaboración propia.

**Tabla 2.** Duración del proceso de CBR para un tractor D11 Caterpillar.

Duración de un CBR	
Número total de tareas	111
Horas totales [hr]	506

Fuente. Elaboración propia.

Por otro lado, se descarga la información del CMMS relacionados en la tabla 3 los equipos a los cuales se le realizó CBR durante las fechas mencionadas.

**Tabla 3.** Información de los equipos a los que se les realizó CBR obtenidas del CMMS.

Equipo	Modelo	Entrada	Salida	Duración
M05257	D11R	19/12/2017	20/02/2018	1512
M05265	D11R	18/07/2018	3/08/2018	394
M05268	D11R	19/05/2018	3/07/2018	1092
M05271	D11R	30/07/2018	16/10/2018	1881
M05276	D11R	17/09/2017	12/11/2017	1344
M05279	D11R	8/04/2018	24/04/2018	381
M05667	D11R	6/11/2017	14/01/2018	1647
M05672	D11R	30/07/2018	16/10/2018	1872
M05675	D11R	13/04/2018	1/06/2018	1180
M05677	D11R	20/08/2017	29/09/2017	960
M05678	D11R	17/09/2018	6/10/2018	455
M05679	D11R	9/01/2018	19/01/2018	240
M05695	D11R	22/07/2017	17/09/2017	1368
M05707	D11R	5/02/2018	24/02/2018	447

M05711	D11R	31/05/2017	21/06/2017	504
M05712	D11R	17/07/2017	17/08/2017	744
M05715	D11R	17/09/2018	2/11/2018	1107
M05717	D11R	16/06/2017	4/07/2017	432
M05719	D11R	5/05/2018	27/05/2018	529
M05720	D11R	5/07/2018	29/07/2018	573
M05723	D11R	18/03/2018	15/04/2018	673
M05724	D11R	2/02/2018	8/03/2018	816
M05727	D11R	25/09/2018	11/10/2018	371
M05735	D11R	23/03/2018	10/04/2018	432
M05737	D11R	13/12/2017	2/01/2018	480
M05747	D11R	19/03/2017	22/10/2017	5208

Fuente. CMMS PeopleSoft. Drummond LTD.

## 6.2 FASE MEDIR

Esta fase busca describir el proceso para comprenderlo, con la ayuda del equipo conformado para el proyecto se procede a crear un diagrama de flujo del estado actual con el fin de comprenderlo en la totalidad y obtener los puntos claves donde se presentan los desperdicios del pensamiento Lean, puesto que para mejorar un proceso es bueno tener claro el estado actual, para posteriormente en la fase analizar se identifiquen problemas potenciales y causas en el proceso (Anexo B).

**6.2.1 Nivel Sigma.** Las decisiones lean six sigma se basan en datos, por tanto, la recolección de datos debe ser clara a fin de evitar cometer errores, en la fase anterior ya se determinaron los rangos de tiempos en los que se descargara la información del CMMS, estos datos son la base que nos ayudaran a medir el desempeño del proceso, los datos se obtendrán del CMMS de mantenimiento PeopleSoft de Oracle para cada uno de los equipos que se les realizó el proceso durante los años 2017-2018.

Para determinar el desempeño del proceso existen varias métricas como lo son la efectividad total de los equipos (OEE), el nivel sigma, los defectos por millón de oportunidades (DPMO), entre otros. Para el caso de estudio se calculará el nivel sigma utilizando el concepto de DPMO partiendo del tiempo base determinado en la fase anterior y en los equipos que presenten un tiempo superior se marcaran como un defecto.

**Tabla 4.** Duración y defecto del CBR de equipos entre 2017 y 2018.

<b>Duración CBR Equipos en CBR entre 2017-2018</b>					
<b>Equipo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Duración</b>	<b>DEFECTO</b>
M05257	D11R	19/12/2017	20/02/2018	1512	DEFECTO
M05265	D11R	18/07/2018	3/08/2018	394	OK
M05268	D11R	19/05/2018	3/07/2018	1092	DEFECTO
M05271	D11R	30/07/2018	16/10/2018	1881	DEFECTO
M05276	D11R	17/09/2017	12/11/2017	1344	DEFECTO
M05279	D11R	8/04/2018	24/04/2018	381	OK
M05667	D11R	6/11/2017	14/01/2018	1647	DEFECTO
M05672	D11R	30/07/2018	16/10/2018	1872	DEFECTO
M05675	D11R	13/04/2018	1/06/2018	1180	DEFECTO
M05677	D11R	20/08/2017	29/09/2017	960	DEFECTO
M05678	D11R	17/09/2018	6/10/2018	455	OK
M05679	D11R	9/01/2018	19/01/2018	240	OK
M05695	D11R	22/07/2017	17/09/2017	1368	DEFECTO
M05707	D11R	5/02/2018	24/02/2018	447	OK
M05711	D11R	31/05/2017	21/06/2017	504	DEFECTO
M05712	D11R	17/07/2017	17/08/2017	744	DEFECTO
M05715	D11R	17/09/2018	2/11/2018	1107	DEFECTO
M05717	D11R	16/06/2017	4/07/2017	432	OK
M05719	D11R	5/05/2018	27/05/2018	529	DEFECTO
M05720	D11R	5/07/2018	29/07/2018	573	DEFECTO
M05723	D11R	18/03/2018	15/04/2018	673	DEFECTO
M05724	D11R	2/02/2018	8/03/2018	816	DEFECTO
M05727	D11R	25/09/2018	11/10/2018	371	OK
M05735	D11R	23/03/2018	10/04/2018	432	OK
M05737	D11R	13/12/2017	2/01/2018	480	OK
M05747	D11R	19/03/2017	22/10/2017	5208	DEFECTO

Fuente. Elaboración propia.

En la tabla 5, se observa las variables para el cálculo de DPMO y su respectivo resultado, teniendo en cuenta, que el cálculo de los defectos se hace por un millón de oportunidades, a partir de la ecuación 1.

$$DPMO = \frac{\text{Defectos}}{\text{Unidades} \cdot \text{Oportunidades}} \times 1'000.000 \quad \text{Ec 1.}$$

**Tabla 5.** Parámetros para el cálculo de DPMO y su respectivo resultado.

<b>Parámetros para el cálculo de DPMO</b>	
Oportunidades	1
Total	26

Defectos	16
DPMO	307692

Fuente. Elaboración propia.

El cálculo del nivel sigma se realiza en base al rendimiento del proceso o a los defectos por millón de oportunidades, del cálculo anterior se determina que el nivel sigma del proceso es aproximadamente 2, por lo que se concluye que el proceso tiene una gran oportunidad de mejora.

**Tabla 6.** Desempeño six sigma.

Sigma	% Calidad	% Defectos	DPMO
1	30,9%	69,10%	691462
2	69,1%	30,90%	308538
3	93,30%	6,70%	66807
4	99,38%	0,62%	6210
5	99,977%	0,023%	233
6	99,9997%	0,00034%	3,4

Fuente. YOUSOUF, A., RACHID, C., and VERZEA, I. Contribution to the Optimization of Strategy of Maintenance by Lean Six Sigma.

### 6.3 FASE ANALIZAR

Esta es una etapa determinante, busca reconocer las principales fuentes de variación y desperdicios del proceso y se determina las mejoras que se plantearán en la siguiente fase. Se utilizarán herramientas de estadísticas básicas y luego con la ayuda del equipo de trabajo y se analizarán cada uno de los aspectos obtenidos.

En la actualidad la estadística se ha extendido a ser más que un servicio del estado, siendo usada por organizaciones y personas en la toma de decisiones. A continuación, se grafica la distribución de los tiempos de reparación empleados en el proceso de cambio de componentes por condición para observar gráficamente como se está comportando el proceso, cálculo de indicadores de tendencia central (media), ecuación 2, e indicadores de dispersión (varianza y desviación estándar) ecuación 3 y ecuación 4 respectivamente.

Media aritmética

$$\mu = \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ec 2.}$$

$$\mu = 857 \text{ [horas]}$$

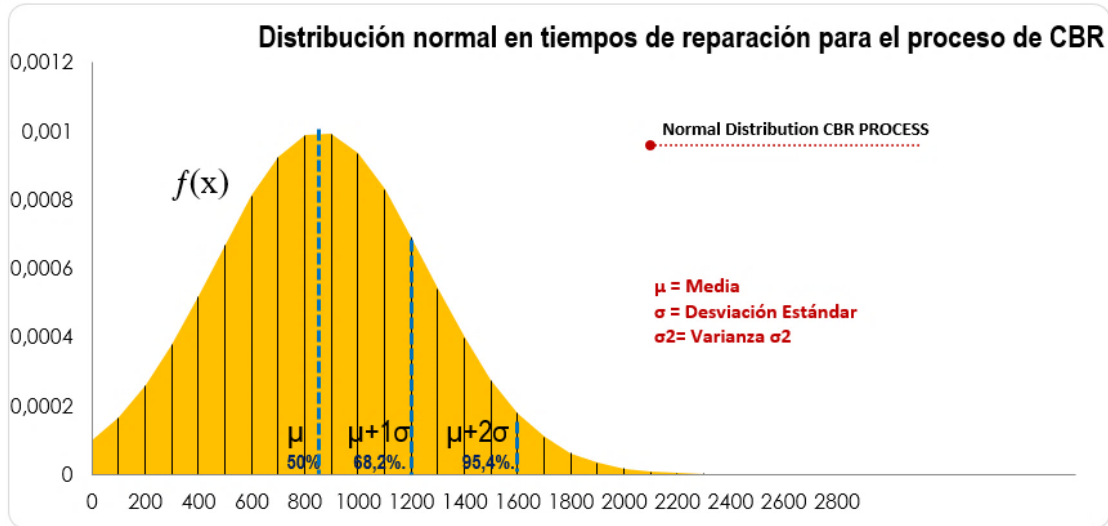
Varianza

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{X_i - \bar{X}}{n-1} \quad \text{Ec 3.}$$

Desviación estándar

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{Ec 4.}$$

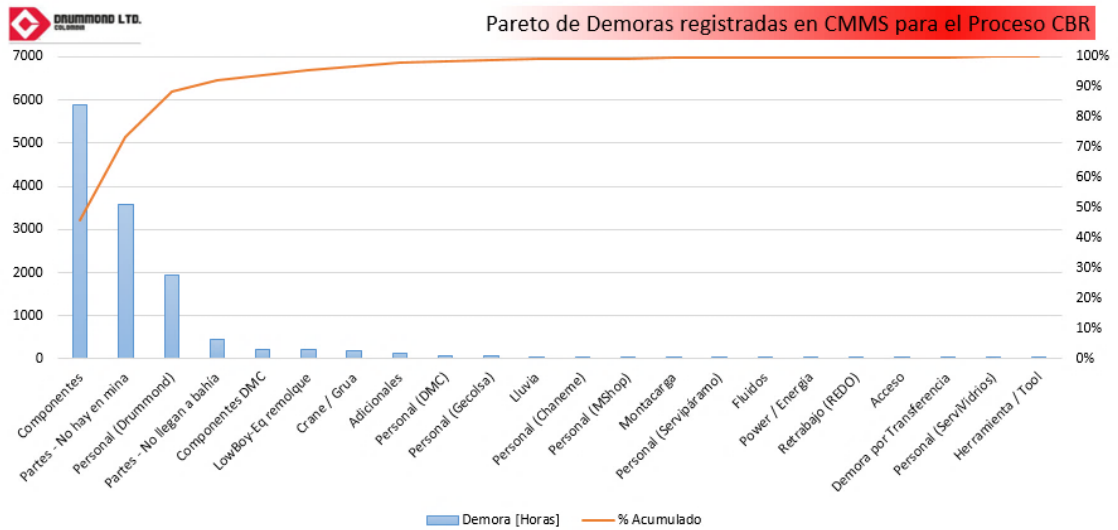
**Figura 13.** Distribución normal en tiempos de reparación para el proceso de CBR



Fuente. Elaboración propia.

La meta del Lean six sigma es reducir la variación y la media aritmética, por tanto, una vez se identifica como se está comportando el proceso y la gran variación que tiene, se procede a medir cuales son las fuentes de variación y cuáles son los desperdicios que hacen que el proceso posea tiempos mayores a los esperados definidos en cada una de las tareas, por esta razón se recurre a descargar información contenida en el CMMS de las demoras registradas y hacer uso del análisis de Pareto, el cual nos dividirá los pocos vitales de los muchos triviales.

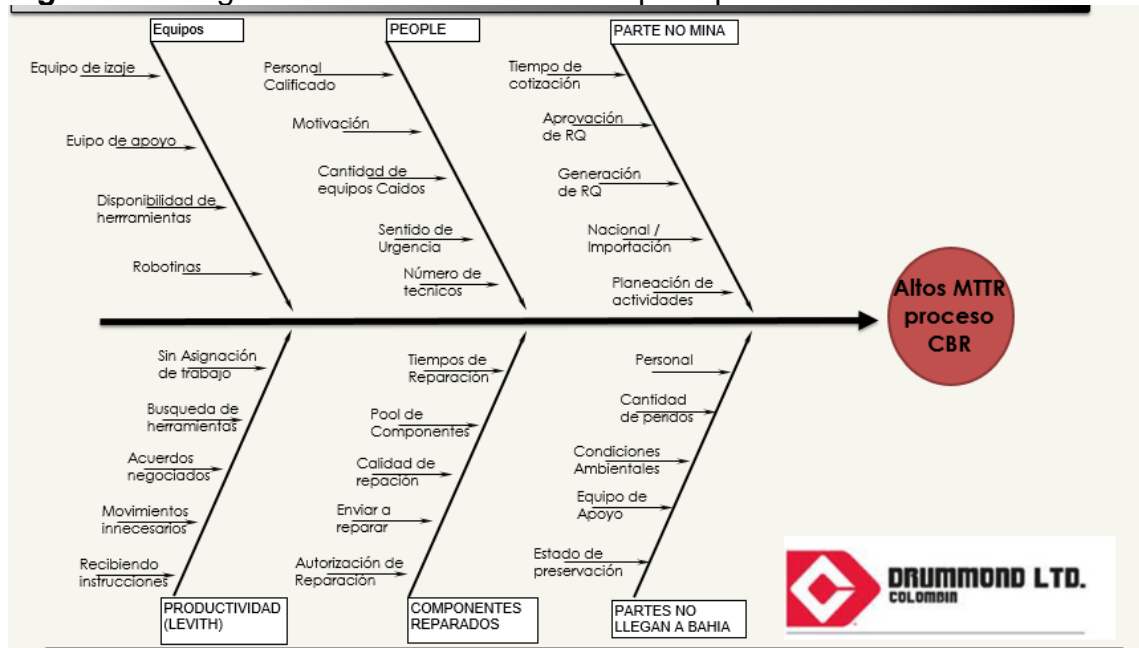
**Figura 14.** Diagrama de Pareto de demoras registradas en el CMMS.



Fuente. Elaboración propia.

Del Pareto se obtiene que las demoras (Desperdicios) más significativos son los Componentes, Partes – No hay en mina, Personal, Partes – No llegan a bahía, para el análisis de estos pocos vitales utilizamos otras de las herramientas del lean six sigma el diagrama causa efecto, el cual con la ayuda del equipo de trabajo se determinarán las causas de estos desperdicios.

**Figura 15.** Diagrama Causa – Efecto de las principales demoras.



Fuente. Elaboración propia.

El desperdicio provocado por la demora de parte no mina es producto de la no existencia en inventario de la parte necesitada para realizar el mantenimiento, teniendo que solicitar todo el proceso de requisición cuando se va a utilizar la parte.

El desperdicio generado por la demora de parte no llega a bahía es producto del tiempo que emplea bodega para entregar los repuestos solicitados en el taller. El desperdicio provocado por la demora de People es producto de la cantidad de personal que se tiene disponible para atender la totalidad de los equipos caídos en el momento.

El desperdicio provocado por la demora Componentes es producto del cero stock de componentes mayores (Motor, Mando final, Transmisión, etc) que son enviados a reparar y están agotados en el momento que son solicitados.

El desperdicio provocado por la Productividad es producto de lo que se enuncia en el libro de Joel Levitt Basics of Fleet Maintenance<sup>30</sup> y el cual fue verificado en un estudio de tiempos que se realizó en la empresa Drummond Ltd a los talleres de mantenimiento.

**Tabla 7. Desperdicios listados por Joel Levitt.**

Áreas y cantidades de tiempo perdido cada día	
Pérdidas de tiempo en acuerdos negociados, comidas, descansos, limpieza antes de terminar turno	78 [min]
Tiempo parado, sin asignacion de trabajo, sin autorización, demoras evitables	44 [min]
Tiempo personal excedido, comiendo, hablando, bebiendo, fumando o descansando excediendo los tiempos en los acuerdos negociados	35 [min]
Arranque de turno tarde o finalización de turno antes de tiempo, al inicio o fin de turno y entre las comidas	21 [min]
Moviendose desde y hacia el trabajo asignado, transportanco partes, herramientas, etc	77 [min]
Esperando Partes, herramientas	22 [min]
Esperando asignación de trabajo e instrucciones	21 [min]
Recogiendo y entregando herramientas	25 [min]

Fuente: Basics of Fleet Maintenance.

<sup>30</sup> LEVITT, Joel. Basics of Fleet Maintenance. (2008) Elsevier Butterworth-Heinemann.

**Tabla 8.** Estudio de tiempos improductivos en los talleres de mantenimiento Drummond Ltd.

Evento	Tiempo
Caminando	29 [Min]
Buscando Manual/ Herramienta	22 [Min]
Hablando	22 [Min]
Parado/ Esperando/ Haciendo Nada	14 [Min]
Baño	15 [Min]
Otro	8 [Min]
Lockers	3 [Min]
Total	113 [Min]

Fuente: 2018 - Time Study Methods Engineering February-2018 "Drummond LTD"

#### **6.4 PROPUESTA DE MANTENIMIENTO PARA MEJORAR LOS TIEMPOS DE REPARACIÓN DEL PROCESO DE CBR - FASE MEJORAR.**

Luego de realizar el análisis en la fase anterior con la ayuda del equipo de trabajo e identificar las fuentes de las demoras en el proceso, se procede a generar las mejoras en el proceso que ataquen los pocos vitales, estableciendo nuevas condiciones en el proceso de operación, las cuales van a ser presentadas al director.

Con el fin de atacar varios desperdicios a la vez, se propone:

- 1- Generar un nuevo diagrama de flujo del proceso de CBR realizado a los tractores D11 en la mina Pribbenow en el cual se verifique desde que inicie el mantenimiento que partes posiblemente se utilizaran para verificar la existencia en bodega y generar unas alertas tempranas para que cuando se vayan a solicitar las partes estén disponibles.



- 4- Solicitar las partes que se van a utilizar con anticipación y almacenarlas en un lugar definido en el taller para que cuando se vayan a utilizar no generen pérdidas de tiempo al proceso.
- 5- Descargando del CMMS PeopleSoft la información de los repuestos que se han requerido más de tres veces en los últimos 5 años e iniciar el proceso de incluirlas a inventario y aumentar las cantidades de máximos y mínimos de los repuestos que normalmente se están utilizando en el proceso de reparación CBR, logrará evitar que necesiten solicitarlas en el momento de necesitarlas.
- 6- Verificar que procedimientos se necesitan para cada una de las actividades que se realizaran en el turno para ser entregados por el supervisor a los técnicos con el fin de mejorar la productividad del personal técnico.
- 7- Solicitar el aumento de la cantidad de técnicos disponibles en taller para atender los equipos que se encuentren caídos esperando por personal.
- 8- Realizar auditorías periódicas a las herramientas disponibles en la herramienta con el fin de garantizar que las herramientas que se encuentren en allí estén disponibles y en buen estado.
- 9- Coordinar con el personal de bodega un canal para gestionar las solicitudes de repuestos que sean catalogadas prioridad para garantizar que sean entregadas en el menor tiempo posible.

## 7. CONCLUSIÓN

- Con el nivel sigma del proceso de cambio de componentes por condición en los equipos Caterpillar D11R, se identificó que el proceso presenta brechas de rendimiento que actualmente necesitan ser mejoradas.
- Se determinó que el proceso de cambio de componentes por condición en los equipos Caterpillar D11R esta impactado negativamente en gran medida por cuatro desperdicios principales; 1. Demoras de entrega de partes por la bodega en la mina Pribbenow, 2. Demora por repuestos que no son de inventario y son necesarias para el desarrollo normal del proceso de CBR, 3. Falta de personal suficiente para realizar todas las tareas pertinentes y 4. Retrasos por no tener componentes mayores que son enviados a reparar a proveedores externos y no están disponibles cuando se necesitan, estos desperdicios corresponden al 92 % del total de las demoras que se presentan durante el cambio de componente por condición para los equipos Caterpillar D11R.
- Se logró que la metodología lean six sigma utilizada en las áreas de producción fuera aplicada exitosamente en cuatro de sus cinco pasos en uno de los procesos de mantenimiento que se realizan en la flota de tractores en la mina Pribbenow de la empresa Drummond Ltd.
- Finalmente, se propone gestionar la estrategia de cambio de componentes asignando recomendaciones y sugerencias necesarias buscando disminuir los tiempos de reparación y garantizar un mayor control de las causas que impactan negativamente y generar gran variación entre cambios de componentes basados en condición para los equipos Caterpillar D11R en la mina Pribbenow de la empresa Drummond Ltd.

## BIBLIOGRAFÍA

ALSYOUF, Imad, The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. [Base de datos en línea]. Enero 2007. International Journal of Production Economics. 105(1) 70-78. (Recuperado en 18 de Octubre de 2019). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092552730600065X>.

ARNHNEITER, E.D. and MALEYEFF, J. The integration of Lean management and Six Sigma. The TQM Magazine, 17(1), pp. 5-18. 2005.

Drummond. [En línea]. Bogotá D.C. Disponible en <http://www.drummondLtd.com/quienes-somos/drummond-en-colombia/>

GEORGE, M.L. Lean Six Sigma for Services. New York, NY,; McGraw-Hill, 2003.  
HOPP, W.J; SPEARMAN, M.L. Commissioned Paper To Pull or Not to Pull: What Is the Question?, Manufacturing & Service Operations Management. 6(2004)133-148.

KURDVE, M., ZACKRISSON, M., WIKTORSSON, M., Harlin, U. Lean and green integration into production system models experiences from Swedish industry. 2014. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.013> el 20 de agosto de 2019.

LEVITT, Joel. Basics of Fleet Maintenance. (2008) Elsevier Butterworth-Heinemann.

LEVITT, Joel. Basic of fleet Maintenance. Reliabilityweb.com – Edición:1<sup>st</sup>.2010.

LÓPEZ, Alfonso. Caída en precio del carbón ya afecta la operación en el país. En: Portafolio. 09, junio, 2019.

MULLER, Alexandre; CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo; LUNG, Benoit. On the concept of e-maintenance: Review and current research. [Base de datos en línea]. Agosto 2008. Reliability Engineering & System Safety. 93(8) 1165-1187. (Recuperado en 18 de Octubre de 2019). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832007002189>.

OHNO, Taiichi. Toyota production system: beyond large-scale production, Productivity Press, Portland, 1988.

RACHID, Chaib, VERZEA, Ion and BENIDIR, Mohamed. Contribution to the Performances Improvement of a Machine Boring Mill Operation. [en línea]. Brasov, Romania. 2010. Disponible en internet. ISSN 1582-0246.

SHAH, R., CHANDRASEKARAN, A., LINDERMAN, K. In pursuit of implementation patterns: the context of Lean and Six Sigma. 2008. *Int. J. Prod. Res.* Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1080/00207540802230504> el 25 de agosto de 2019.

SHAH, Rachna; WARD, Peter T. Defining and developing measures of lean production. [Base de datos en línea]. Junio de 2007. *Journal of Operations Management*. 25(4) 785-805. (Recuperado en 18 de Diciembre de 2019). Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/222434298\\_Defining\\_and\\_Developing\\_Measures\\_of\\_Lean\\_Production](https://www.researchgate.net/publication/222434298_Defining_and_Developing_Measures_of_Lean_Production).

SHERIF, Mostafaa; JANTANEE Dumrakb; HASSAN Soltanc. Lean maintenance roadmap. [Base de datos en línea]. Febrero de 2015. *Procedia Manufacturing*. 2 434-444. (Recuperado en Enero de 2020). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978915000773>.

SMAIN Aib, et al. Diagnosis of geometrical defects and rebuilt method of machine-tools accuracy. 2012, marzo. [En línea]. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/252068235\\_DIAGNOSIS\\_OF\\_GEOMETRICAL\\_DEFECTS\\_AND\\_REBUILT\\_METHOD\\_OF\\_MACHINE-TOOLS\\_ACCURACY](https://www.researchgate.net/publication/252068235_DIAGNOSIS_OF_GEOMETRICAL_DEFECTS_AND_REBUILT_METHOD_OF_MACHINE-TOOLS_ACCURACY) el 20 de Agosto de 2019.

SMITH, Ricky y HAWKINS, Bruce. *Lean maintenance; reduce cost, improve quality, and increase market share*. Elsevier Butterworth-Heinemann. 2004. ISBN 9780080478906.

SMITH, Ricky. What is Lean maintenance? Elements that need to be in place for success, *Maintenance Technology*. (2004) 15-21.

SNEE, R.D. Lean Six Sigma getting better all the time. *International Journal of Lean Six Sigma*. 1(1), pp. 9-29. 2010.

SOMMER, Adir; BLUMENTHAL, Eytan. Implementation of Lean and Six Sigma principles in ophthalmology for improving quality of care and patient flow. [Base de datos en línea]. Septiembre-Octubre de 2019. *Survey of Ophtalmology*. 64(5) 720-728. (Recuperado en 20 de Diciembre de 2019). Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0039625718302108>.

TENERA, A., and PINTO, L. C. A Lean Six Sigma (LSS) Project Management Improvement Model. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 119, pp. 912–920, 2014.

YOUSSEF, A., RACHID, C., and VERZEA, I. Contribution to the Optimization of Strategy of Maintenance by Lean Six Sigma. *Physics Procedia*, 55, 512–518. Recuperado de [doi:10.1016/j.phpro.2014.08.001](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.001).

## ANEXOS

### ANEXO A. Tareas durante un cambio de componentes por condición.

Item	Tareas a programar Armado CBR total	Tiempo
1	Instalar puente de cabina	4
2	Instalar Fender RH	5
3	Instalar Fender LH	5
4	Instalar harnees de Fender RH	6
5	Instalar harnees de Fender LH	6
6	Instalar cables de alta y baterías	8
7	Instalar careta	4
8	Instalar carcasas de filtros de xmns y T/C	6
9	Instalar manifold de lubricación en housing de xmns	2
10	Instalar funda nivel y tubo de llenado de xmns.	4
11	Instalar líneas de llenado pivot y wiggin de xmns	4
12	Instalar soporte de control electro hidráulico	2
13	Solicitar enfriador de xmns.	
13	Instalar enfriador de xmns, instalar tuberías	6
14	Solicitar control del dozer	2
15	Instalar control del dozer	3
16	Solicitar control del ripper	2
17	Instalar control del ripper	2
18	Instalar control electrohidráulico	3
19	Instalar tanque hidráulico	4
20	Instalar V/V lógica, acumulador y V/V PCO	2
21	Instalar líneas de levante (Anacondas) y enrute	4
22	Instalar líneas de inclinación que van hacia la careta y enrute	4
23	Instalar línea de enfriamiento de xmns y enrute	4
24	Instalar línea piloto que va del TK Hid/co al motor del fan y línea piloto que va a válvula dual.	8
25	Instalar V/V de prioridad	2
26	Instalar V/V dirección y frenos	2
27	Instalar housing de bomba de xmns	4

Fuente: Elaboración propia.

Continuación tabla anterior

28	Instalar bomba de xmns	4
29	Instalar líneas de bombas de xmns, filtros de xmns, V/V de prioridad y manifold de xmns.	8
30	Instalar líneas pilotos de control del dozer, control E/H,	6
31	Instalar líneas control del ripper a manifold LH	6
32	Instalar líneas de V/V lógica, PCO y TK hid/co.	4
33	Instalar TK de combustible	6
34	Instalar TKS PQS Tecno fuego	6
35	Solicitar motor diésel	1
36	Solicitar convertidor	1
37	Solicitar bomba de fan y piloto	1
38	Solicitar bomba de implementos	1
39	Alistar motor, acoplar convertidor, bombas y bloque solenoide del fan	12
40	Alistar motor, adecuar parte eléctrica, SSI (Tecno fuego) y a/c (aire caribe)	6
41	Retirar plataformas del chasis e Instalar línea de screen bomba del fan al motor del fan	3
42	Inspeccionar enrutamiento Hidráulico y parte eléctrica	4
43	Instalar motor / Torqueo bases	3
44	Instalar cardan principal y guardas (Si NO tuvo cambio de Xmns)	6
45	Acoplar líneas de convertidor	4
46	Instalar líneas de la bomba de implementos e inclinación	4
47	Instalar líneas tipo "C"	4
48	Instalar guardas traseras del motor	6
49	Instalar líneas de la bomba del fan y piloto	3
50	Instalar cardan de bomba de xmns y guardas	3
51	Solicitar Radiador y probar	4
52	Instalar Radiador	5
53	Cerrar careta, acoplar líneas de bombas de agua	6
54	Acoplar líneas de levante (Anacondas) y líneas de inclinación a la careta	5

Fuente: Elaboración propia.

Continuación tabla anterior

55	Acoplar líneas del motor del fan y líneas piloto retorno carcasa y V/V dual a la careta	5
56	Instalar tubos del radiador	5
57	Instalar tanque de expansión y conectar líneas	5
58	Instalar capó y accesorios Admisión y escape	5
59	Solicitar cilindro de levante dozer RH	5
60	Solicitar cilindro de levante dozer LH	5
61	Instalar cilindro de levante dozer LH y líneas	5
62	Instalar cilindro de levante dozer RH y líneas	5
63	Instalar cabina y ROPS,	6
64	Conectar parte eléctrica de la cabina y el motor	6
65	Instalar sistema de aire acondicionado en general	8
66	Instalar sistema supresor de incendios en general	8
67	Solicitar xmns	1
68	instalar xmns	5
69	Instalar líneas y tuberías de xmns	3
70	Instalar cardan principal y guardas (Si tuvo cambio de Xmns)	6
71	Solicitar mando final RH	1
72	Solicitar mando final LH	1
73	Instalar mando final RH	5
74	Instalar ejes y adicionar aceite al mando final RH	3
75	Instalar mando final LH	5
76	Instalar ejes y adicionar aceite al mando final LH	3
77	Instalar mesa del ripper	4
78	Instalar guarda de la xmns	4
79	Solicitar cilindro de levante ripper RH	1
80	Solicitar cilindro de levante ripper LH	1
81	Instalar cilindro de levante ripper RH	3
82	Instalar cilindro de levante ripper LH	3
83	Instalar líneas de los cilindros de levante ripper	4
84	Instalar porta espada	4
85	Solicitar cilindro de Inclinación ripper RH	1
86	Solicitar cilindro de Inclinación ripper LH	1
87	Instalar cilindro de Inclinación ripper RH	3

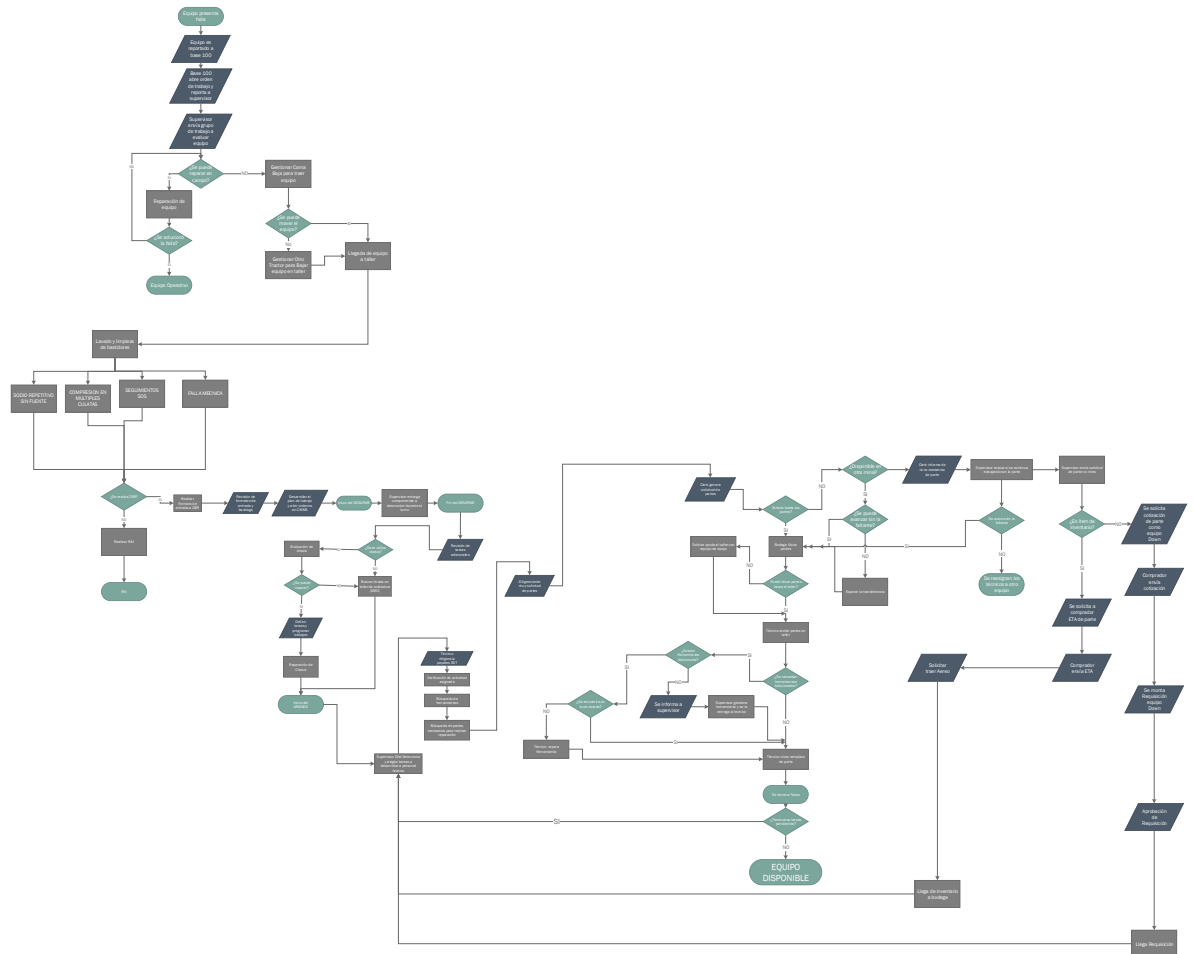
Fuente: Elaboración propia.

Continuación tabla anterior

88	Instalar cilindro de Inclinación ripper LH	3
89	Instalar líneas de los cilindros de Inclinación ripper	4
90	Instalar líneas de grasa del ripper	6
91	Completar todos los niveles, purgar y prender	6
92	Instalar barra ecualizadora	6
93	Instalar sistema de lubricación de la barra ecualizadora	8
94	Instalar eje pivote	4
95	Instalar bastidor RH y trunnion	6
96	Instalar bastidor LH y trunnion	6
97	Instalar cadena RH, tensionar y adicionar aceite al bastidor RH	4
98	Instalar cadena LH, tensionar y adicionar aceite al bastidor LH	4
99	Desbloquear equipo, Desbloquear buggies de los bastidores	4
100	Llevar equipo a las carpas para acoplar dozer	2
101	Acoplar brazos de empuje y barra estabilizadora	5
102	Acoplar cilindros de levante dozer RH y LH	4
103	Acoplar líneas de los cilindros de inclinación en la careta y los cilindros LH y RH	5
104	Acoplar cilindros de inclinación RH y LH a los brazos de empuje.	5
105	Pre-entrega general del equipo	12
106	Prueba Dino y Verificación de fugas	6
107	PM H CBR	36
108	Instalar guardas laterales de motor	12
109	Instalar pechera #1 y #2.	2
110	Instalar pechera #3 y #4.	2
111	Revisión final	4

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO B.** Diagrama de flujo del proceso actual de cambio de componente por condición.



Fuente: Elaboración propia.