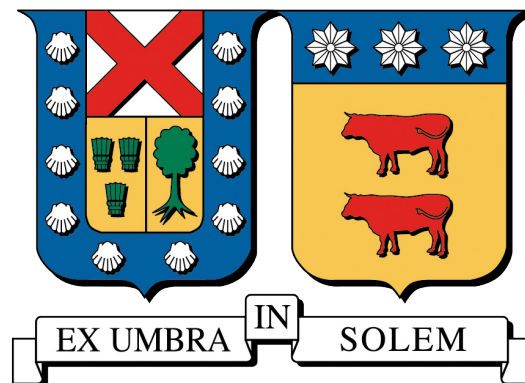


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS  
SANTIAGO - CHILE



**ANÁLISIS DE DATOS REQUERIDOS PARA LA MEDICIÓN DE  
KPI PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE MANTENIMIENTO Y  
SUMINISTROS DE ACUERDO A ESTÁNDARES  
INTERNACIONALES**

**IGNACIO JAVIER ROLDÁN BARRAZA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : PROF. MÓNICA LÓPEZ.  
PROFESOR CORREFERENTE : PROF. TOMÁS GRUBESSICH

NOVIEMBRE 2016

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres que me han apoyado y motivado a salir siempre adelante en mis sueños y proyectos de vida, agradecer también mis amigos, especialmente Alexis que estuvo siempre presente en todo el proceso y a Yanara por su valiosa compañía y constante apoyo, y por supuesto está demás mencionar a mi excelente profesora guía Mónica.

---

## RESUMEN EJECUTIVO

Ante un creciente interés por la gestión de mantenimiento dentro de las industrias que manejan activos fijos de alto valor (Lattero, 2004), las empresas han encontrado dificultades en la implementación de buenas políticas de mantenimiento, y dentro de sus grandes problemáticas, está la buena gestión de inventario de partes de repuestos (Autologica, 2013). Con esto, es que los académicos han trabajado en los últimos años en formular marcos de referencia y modelos para gestionar de forma conjunta el área de mantenimiento con la de inventario de repuestos, por da ejemplos Kennedy et al. (2002); Cavalieri y Garetti (2008); Chemweno et al. (2015); Hellingrath et al. (2015); Kader et al. (2015); Nguyen et al. (2014), sin embargo, respecto a la evaluación de desempeño, existen pocos marcos de referencia y guías para que una empresa pueda integrar una correcta gestión conjunta de mantenimiento e inventario de partes de repuesto, es por esto que esta investigación contribuye a definir los requerimientos de información propios de la medición de desempeño de ambas áreas basado en los KPIs más utilizado por las compañías que gestionan su mantenimiento hoy en día. El procedimiento consistió en una vasta recopilación de indicadores de mantenimiento e inventarios para definir sus requerimientos de información, su interacción dentro de un proceso diagramado en BPMN de gestión conjunta de mantenimiento e inventario de repuestos basado en el Ciclo PDCA de Deming, y una definición de pautas generales para la gestión de la información.

**Palabras Clave.** Mantenimiento, Repuestos, KPI de Mantenimiento, KPI de Inventario de Repuestos, Medición de Desempeño

---

## ABSTRACT

With a growing concern for maintenance management in the industries that handle high value assets (Lattero, 2004), the companies have had issues while implementing maintenance policies, especially with the spare parts inventory management (Autologica, 2013). In response to that, academics have worked in the last years on formulating guidelines, models and frameworks for a joint maintenance and spare parts inventory management, e.g. Kennedy et al. (2002); Cavalieri y Garetti (2008); Chemweno et al. (2015); Hellingrath et al. (2015); Kader et al. (2015); Nguyen et al. (2014). However, the performance measurement (PM) is a topic that has not been broadly boarded, existing few references to PM frameworks and guides for a joint maintenance and spare parts inventory management. This research contributes to define the information requirements associated to performance measurement of both maintenance and inventory management based on the KPIs most commonly used by maintenance and inventory managers. The procedure consisted on a vast recompilation of maintenance and inventory indicators to define their information requirements, their interaction with a joint management process diagrammed with BPMN based on the PDCA Cycle, and a definition of a general guideline for information management.

**Keywords.** Maintenance, Spare Parts, Maintenance KPI, Spare Parts Inventory KPI, Joint Maintenance & Spare Parts Management, Performance Measurement

# Índice de Contenidos

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Problemática  | 1         |
| 1.2. Objetivos   | 4         |
| 1.2.1. Objetivo General  | 4         |
| 1.2.2. Objetivos Específicos   | 4         |
| 1.3. Alcance   | 5         |
| 1.4. Metodología   | 6         |
| 1.4.1. Revisión Bibliográfica de métricas y KPIs                       | 6         |
| 1.4.2. Organización y clasificación de métricas y KPIs                 | 6         |
| 1.4.3. Relacionar KPIs dentro del proceso de gestión                   | 7         |
| 1.4.4. Propuesta de relación lógica entre los elementos de información | 7         |
| 1.4.5. Conclusiones y pautas para la gestión de la información         | 8         |
| 1.5. Marco Teórico   | 9         |
| 1.5.1. Antecedentes  | 9         |
| 1.5.2. Sobre Gestión de Mantenimiento                                  | 11        |
| 1.5.2.1. Métodos de Análisis de Mantenimiento                          | 13        |
| 1.5.2.2. Políticas de Mantenimiento                                    | 15        |
| 1.5.2.3. Medición del desempeño de Mantenimiento                       | 19        |
| 1.5.3. Sobre Inventario de Repuestos                                   | 24        |
| 1.5.3.1. Codificación y Clasificación de partes                        | 25        |
| 1.5.3.2. Pronóstico de demanda de partes:                              | 27        |
| 1.5.3.3. Política de Inventario  | 28        |
| 1.5.3.4. Prueba y validación de política                               | 30        |
| 1.5.3.5. Medición de Desempeño de Inventario                           | 30        |
| <b>2. Desarrollo</b>   | <b>33</b> |
| 2.1. Recopilación de Indicadores y Métricas                            | 33        |
| 2.1.1. Indicadores de Mantenimiento                                    | 33        |
| 2.1.1.1. Indicadores de Costos   | 34        |
| 2.1.1.2. Indicadores de Equipos o procesos                             | 38        |
| 2.1.1.3. Indicadores de HSE y R.R.H.H.                                 | 41        |
| 2.1.1.4. Datos adicionales   | 43        |
| 2.1.2. Indicadores de Inventario de Repuestos                          | 44        |
| 2.1.2.1. Indicadores de Costos   | 45        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.1.2.2.  | Indicadores de Equipos o procesos . . . . .  | 47        |
| 2.1.2.3.  | Datos adicionales . . . . .  | 51        |
| 2.2.      | Diagrama de Proceso de Mantenimiento . . . . .   | 52        |
| 2.2.1.    | Etapa Planificar . . . . .   | 53        |
| 2.2.1.1.  | Descripción general de la etapa Planificar . . . . .   | 53        |
| 2.2.1.2.  | Diagrama BPMN de la etapa Planificar . . . . .   | 54        |
| 2.2.1.3.  | Descripción del diagrama . . . . .   | 55        |
| 2.2.2.    | Etapa Hacer . . . . .  | 56        |
| 2.2.2.1.  | Descripción general de la etapa Hacer . . . . .  | 56        |
| 2.2.3.    | Etapa Controlar . . . . .  | 56        |
| 2.2.3.1.  | Descripción general de la etapa Controlar . . . . .  | 56        |
| 2.2.3.2.  | Diagrama BPMN de la etapa Controlar . . . . .  | 57        |
| 2.2.3.3.  | Descripción del diagrama . . . . .   | 58        |
| 2.2.4.    | Etapa Analizar . . . . .   | 58        |
| 2.2.4.1.  | Descripción general de la etapa Analizar . . . . .   | 58        |
| 2.2.4.2.  | Diagrama BPMN de la etapa Analizar . . . . .   | 59        |
| 2.2.4.3.  | Descripción del diagrama . . . . .   | 60        |
| 2.3.      | Organización de la información . . . . .   | 61        |
| 2.3.1.    | Orden de Trabajo . . . . .   | 61        |
| 2.3.2.    | Orden de Compra . . . . .  | 62        |
| 2.3.3.    | Propuesta de diagrama de clase . . . . .   | 64        |
| 2.3.4.    | Descripción del diagrama . . . . .   | 64        |
| 2.4.      | Análisis de pautas para la gestión de la información de mantenimiento e inventarios de repuestos . . . . . | 66        |
| <b>3.</b> | <b>Conclusiones y Recomendaciones</b>  | <b>68</b> |
|           | <b>Bibliografía</b>  | <b>70</b> |
|           | <b>A. Sobre indicadores ICO y FPD</b>  | <b>73</b> |
|           | <b>B. Indicadores y métricas estudiadas</b>  | <b>76</b> |
| B.1.      | Indicadores de Mantenimiento . . . . .   | 76        |
| B.1.1.    | Métricas de la norma EN-15341 . . . . .  | 76        |
| B.1.2.    | Indicadores y métricas adicionales a la norma EN-15341 . . . . .   | 81        |
| B.1.3.    | Recopilación de indicadores de equipos o procesos de mantenimiento   | 83        |
| B.2.      | Indicadores de Inventario de Repuestos . . . . .   | 86        |
| B.2.1.    | Recopilación de indicadores de inventario de repuestos . . . . .   | 86        |

# Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Técnicas alternativas para mantenimiento correctivo (Sheut y Krajewski, 1994) . . . . . | 16 |
| 2.1. Resumen de recopilación de indicadores y métricas de mantenimiento . . . . .            | 35 |
| 2.2. Recopilación de indicadores de costos de mantenimiento . . . . .                        | 36 |
| 2.3. Recopilación de indicadores de HSE y R.R.H.H de mantenimiento . . . . .                 | 42 |
| 2.4. Recopilación de datos adicionales para KPIs de mantenimiento . . . . .                  | 43 |
| 2.5. Resumen de recopilación de indicadores y métricas de inventario de repuestos . . . . .  | 45 |
| 2.6. Recopilación de indicadores de costos de inventario de repuestos . . . . .              | 46 |
| 2.7. Recopilación de indicadores de equipos o procesos de inventario de repuestos . . . . .  | 48 |
| 2.8. Recopilación de datos adicionales de inventario de repuestos . . . . .                  | 51 |
| B.1. Métricas (Factores) de los KPIs de la norma EN-15341 . . . . .                          | 80 |
| B.2. Recopilación de indicadores de mantenimiento adicionales . . . . .                      | 82 |
| B.3. Recopilación de indicadores de equipos o procesos . . . . .                             | 85 |
| B.4. Recopilación de indicadores de inventario de repuestos . . . . .                        | 88 |

# Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Ciclo PDCA de gestión de mantenimiento (Elaboración propia) . . . . .   | 12 |
| 1.2. Fases de CBM (Basado en Hellingrath y Cordes (2014)) . . . . .  | 18 |
| 1.3. Proyecto de proceso de armonización de indicadores (Kumar et al., 2013)   | 21 |
| 1.4. Factores de influencia en el mantenimiento e Indicadores Clave de Rendimiento en Mantenimiento (EN-15341, 2007) . . . . . | 21 |
| 1.5. Marco de referencia multi-criterio para MPM (Parida, 2006) . . . . .  | 22 |
| 1.6. Adaptación de Alsyouf (2006) del Maintenance Scorecard de Tsang (1999) citado en Kumar et al. (2013) . . . . .            | 23 |
| 1.7. Componentes de tiempo típicos del downtime de un equipo (Cavalieri y Garetti, 2008) . . . . .                             | 26 |
| 1.8. Los 5 pasos para la toma de decisiones (Cavalieri y Garetti, 2008) . . . . .  | 26 |
| 1.9. Ejemplos de piramides de métricas de desempeño (Martin, 2010) . . . . .   | 31 |
| 2.1. Ciclo PDCA (Elaboración propia) . . . . .   | 52 |
| 2.2. Diagrama BPMN de etapa de Planificación en ciclo PDCA (Elaboración propia) . . . . .                                      | 54 |
| 2.3. Diagrama BPMN de etapa de Control en ciclo PDCA (Elaboración propia)  | 57 |
| 2.4. Diagrama BPMN de etapa de Análisis en ciclo PDCA (Elaboración propia)   | 59 |
| 2.5. Diagrama de clase para objetos de información de mantenimiento e inventario de repuestos . . . . .                        | 64 |

# 1 | Introducción

## 1.1. Problemática

Hoy en día, las empresas buscan orientar su toma de decisiones evaluando no solo las problemáticas de cada uno de sus departamentos por separado, sino que evaluando las consecuencias que tiene estas decisiones a lo largo de toda la cadena de suministros ([Heizer y Render, 2004](#)). De esta manera, se apunta a que las decisiones de la empresa vayan en pro de mejorar a ésta como un todo y no perjudicarla de forma indirecta.

Si bien, dentro de la cadena de suministro, se encuentran bien desarrollados temas de logística, producción e inventarios, hay un tema que en los últimos años ha adquirido un mayor grado de relevancia pero que se ha evaluado muchas veces apartada de la cadena de suministro. Este tema corresponde al mantenimiento.

El área de mantenimiento y confiabilidad se está desarrollando con fuerza durante estos últimos años, apareciendo cada vez más, nuevas técnicas y herramientas que ayudan y mejoran la toma de decisiones respecto a temas de que tan confiable es un sistema, cual es la disponibilidad de este y muy importante, técnicas de predicción de fallas que permiten definir políticas preventivas de mantenimiento justificadas estadísticamente. A pesar de esto, muy pocas empresas realmente se preocupan por implementar una buena política de mantenimiento ([Lattero, 2004](#)).

Para algunas industrias en particular, el mantenimiento es un factor importante dentro del desarrollo de su actividad económica, en particular, se pueden destacar las empresas mineras, industrias de petróleo y gas natural, la industria nuclear, aerolíneas o la industria automotriz ([Parida, 2006](#)).

En la minería por ejemplo, los equipos utilizados para la extracción y procesamiento de los minerales obtenidos producto de la explotación de las faenas son sumamente especializados y fundamentales para el ejercicio de la empresa. En estos casos, una falla de un equipo no solo puede conllevar a la detención de la producción, sino que también puede significar un riesgo importante para la integridad de los trabajadores en faena. De esta forma, resulta indispensable una buena prevención de fallas en los equipos mediante un mantenimiento preventivo.

Junto con las decisiones de mantenimiento se debe agregar la planificación de un elemento fundamental para la ejecución de los trabajos de mantención: *los repuestos*, y el inventario de éstos. El hecho de mantener un inventario de repuestos genera una serie de necesidades tales como la disposición de una infraestructura especializada para el almacenamiento de repuestos, capital de trabajo asociado al cuidado y preservación de los repuestos, estudios de rotación de inventario, entre otros (Altay y Lewis, 2011).

La gestión del mantenimiento e inventario de repuestos es todo un desafío que presenta serios problemas para la gerencia, según Slater (2016), el principal problema en la gestión de inventario de partes de repuesto es la toma de decisiones en base a conjeturas, la falta de información y la mala calidad de estas genera un efecto en cadena que desenlaza en diversos problemas como en stock-outs, problemas en la determinación de la criticidad y disponibilidad o redundancia de stock, entre otros.

La buena administración de la información es la base para generar una buena gestión del mantenimiento y los inventarios de partes de repuesto, el exceso de información, la falta de estandarización en los procesos, en la toma de datos y otros generan que la información procesada sea errónea y conlleve a la toma de malas decisiones.

Por otro lado existe una gran diversidad de indicadores basados en distintas normas tales como la norma europea de indicadores de mantenimiento UNE-EN 15341, la norma ISO/DIS 14224 para las industrias petrolera, petroquímica y de gas natural, o las métricas propuestas por la SMRP (*Society for Maintenance and Reliability Professionals*) entre muchas más. El manejo de todos estas métricas puede llegar a ser bastante complejo y junto a las dificultades en el manejo de la información pueden resultar en un exceso de información poco útil para la toma de decisiones.

Con todo esto, la problemática en general es la falta de una guía para el manejo de los datos e información de mantenimiento e inventario de partes de repuesto que permita generar información de calidad para una buena toma de decisiones.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Reducir la brecha entre la literatura y la práctica respecto a los requerimientos de información y manejo de los datos para su utilización en modelos de gestión y sistemas de información relacionados con mantenimiento e inventario de repuestos de tal forma de facilitar la generación de información de calidad para la correcta y eficiente toma de decisiones.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Realizar una revisión bibliográfica de los KPI más importantes para mantenimiento.
- Realizar una revisión bibliográfica de los KPI más importantes para la gestión de suministro de repuesto.
- Definir los requerimientos de información para ambos grupos de KPI.
- Identificar la relación de los elementos de información con el proceso de gestión de mantenimiento e inventario de repuestos.
- Establecer relación lógica entre los elementos de información.

## 1.3. Alcance

Esta investigación busca cubrir la definición de requerimientos de información para KPIs de la gestión de mantenimiento e inventario de repuestos de forma transversal a todas las industrias que hagan uso intensivo de estas técnicas, lo que significa que se deja de lado todos aquellos indicadores específicos por industria, además se abarca desde una perspectiva general de forma que no se especificará el proceso de gestión de forma específica. Por otro lado esta investigación cubrirá los requerimientos de información y la relación lógica de los elementos de información y la relación de éstos con el proceso en si, no se abarcarán métodos de medición o adquisición de datos ni se profundizará en métodos de procesamiento de datos como *Data Mining* o *Big Data*.

## 1.4. Metodología

La metodología a emplear en esta investigación se dividirá en las siguientes etapas.

- Revisión Bibliográfica de métricas y KPIs.
- Organización y clasificación de métricas y KPIs.
- Relacionar KPIs dentro del proceso de gestión.
- Propuesta de relación lógica entre los elementos de información.
- Conclusiones y pautas para la gestión de la información.

### 1.4.1. Revisión Bibliográfica de métricas y KPIs

Para la revisión bibliográfica se tomarán en consideración normas internacionales, artículos y tesis que presenten los indicadores más utilizados y necesarios dentro de la gestión de las políticas de mantenimiento e inventario de repuestos. La revisión de estos artículos será primordialmente a través de portales como Scopus ([www.scopus.com](http://www.scopus.com)), ScienceDirect ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)), Springer ([www.springer.com](http://www.springer.com)) o el portal de biblioteca la UTFSM ([www.bibliotecas.usm.cl](http://www.bibliotecas.usm.cl)). Se utilizará un documento base y se incluirán otros indicadores de otras fuentes bibliográficas para completar la selección.

### 1.4.2. Organización y clasificación de métricas y KPIs

Con el fin de reducir la cantidad de información y determinar los requerimientos de información de los distintos KPI, estos se clasificarán según los siguiente criterios.

- **Indicador/Conjunto de Indicadores:** Con el fin de reducir la cantidad de indicadores a estudiar, estos se clasificarán según indicadores globales (Ej: Disponibilidad o Lead time) o conjuntos de indicadores (Ej: Indicadores de tiempo o Indicadores de personal), de esta forma, se hará referencia a estos conjuntos de indicadores durante el resto de la investigación.

- **Tipo de Indicador:** Con esta clasificación se categorizarán los indicadores en los siguientes grupos:
  - *Equipos o Procesos:* Son los indicadores o métricas relacionadas con características y desempeño de los equipos y procesos tales como actividades de mantenimiento, disponibilidad de un equipo, etc.
  - *Costos:* Son los indicadores o métricas que tengan relación con costos tales como los costos de mantenimiento, de personal, costos de almacenamiento, etc.
  - *HSE & R.R.H.H.:* Son los indicadores o métricas asociadas con seguridad, salud y medioambiente además de los relacionados con el departamento de recursos humanos.
  - *Datos Adicionales:* Debido a que el enfoque de esta investigación es respecto a la gestión de mantenimiento e inventario de repuestos, se considerará como datos externos al proceso todos aquellos que sean responsabilidad de otros departamentos tales como Finanzas u Operaciones.
- **Departamento:** Esta categorización señala los departamentos a los que están vinculados los indicadores y métricas.

### 1.4.3. Relacionar KPIs dentro del proceso de gestión

En esta etapa primero se procede a diagramar el proceso de gestión de las políticas de mantenimiento e inventario de repuestos siguiendo la estructura del ciclo de Deming, se diagramará cada parte del ciclo como un proceso en BPMN y se mostrará dentro de estos diagramas la relación que tiene el proceso con los distintos indicadores seleccionados.

### 1.4.4. Propuesta de relación lógica entre los elementos de información

Para determinar los requerimientos de información y organizarlo de forma práctica y replicable se diagramará la relación lógica entre los distintos elementos de información necesarios para determinar de forma organizada y certera los distintos KPIs asociados a

la gestión integrada de mantenimiento e inventario de repuesto, esto mediante el lenguaje UML utilizando en particular los Diagramas de Clase.

### **1.4.5. Conclusiones y pautas para la gestión de la información**

Finalmente, se propondrán un grupo de recomendaciones generales para a la recolección y manejo de la información orientadas a determinar KPIs de mantenimiento e inventario de repuestos.

## 1.5. Marco Teórico

### 1.5.1. Antecedentes

Una encuesta realizada por la empresa [Autologica \(2013\)](#) arrojó que un 73 % de las concesionarias tienen problemas con su inventario de repuestos para mantenimiento, y que el 26 % del total son problemas muy serios. Esto viene explicado porque en un 22 % de los casos no existe una gestión apropiada de los inventarios de repuesto, además de que no existe un seguimiento apropiado en la mitad de los casos y hay un mal registro de las pérdidas generadas por la falta de repuestos.

Esta situación puede extrapolarse a una gran parte de la industria que requiere del manejo de inventario de repuestos. De aquí se observa que en la actualidad no se está realizando una gestión apropiada de los inventarios de repuestos y por tanto, no existe un control apropiado sobre este proceso.

Por su parte, el portal latinoamericano [Mantenimiento Mundial \(2011\)](#) señala el problema de gestión eficiente de inventario como uno de los 7 inconvenientes que afectan más la gestión de mantenimiento a las empresas en Latinoamérica.

En [Cavaliere y Garetti \(2008\)](#) se comenta que las empresas han estado haciendo su gestión de mantenimiento y de repuestos de forma independiente, mientras que la gestión de mantenimiento ha desarrollado sus propias técnicas basadas en análisis de modos de falla (FMECA) o confiabilidad (RCM), la gestión del inventario de repuesto se ha trabajado de forma similar a la gestión de otros tipos de inventario como Work-In-Process o de productos finales siendo que tienen un comportamiento muy distinto ([Kennedy et al., 2002](#)) no sólo por un tema de comportamiento de demanda sino porque tiene objetivos muy distintos ([Hellingrath et al., 2015](#)).

El punto de unión de estos dos mundos y que ha sido ignorado muchas veces por los gerentes de las distintas empresas por un tema de facilitar la gestión, radica en la predicción de la demanda de repuestos. La demanda de repuestos está directamente vinculada a las decisiones en la política de mantenimiento y en el comportamiento de los equipos en general, sin embargo, para estimar la demanda de repuestos son ampliamente utilizados

métodos predictivos como series de tiempo, suavizamiento exponencial, media móvil y otros primordialmente basados en datos históricos muchas veces incluso mezclando datos de equipos entre si (Hellingrath y Cordes, 2014).

Con el tiempo, la literatura disponible sobre la gestión del inventario de partes de repuesto ha ido avanzando en dirección de extender la cadena de suministro de repuesto hacia la gestión de mantenimiento. Desde Kennedy et al. (2002) que presenta una recopilación bibliográfica respecto al inventario de repuestos hasta el año 2002, para ese entonces ya se hablaba de un mantenimiento bajo una política FTM (*Fixed Time Method*) como mecanismo para predecir la demanda de repuestos.

En los últimos años se han propuesto marcos de referencias como Cavalieri y Garetti (2008) y Driessen et al. (2014) que orientan a la buena gestión de los repuestos para mantenimiento, sin embargo no señalan más allá de un pequeño acercamiento a los métodos de predicción de demanda, la relación que existe entre la política de mantenimiento y la de inventario de partes de repuesto, mucho menos en términos de indicadores.

Sin embargo, existen varios intentos de presentar mecanismos para gestionar ambas políticas de forma conjunta. Desde una perspectiva matemática por ejemplo, Kader et al. (2015) presenta un conjunto de modelos de optimización que buscan optimizar la cadena de suministro desde el plan de producción hasta el inventario de repuesto pasando por la gestión de mantenimiento, esto considerando a la vez un carácter ecológico respecto a la reducción de la huella de carbono en uso de empaques. Por otro lado, Nguyen et al. (2014) presenta una política de mantenimiento y aprovisionamiento de repuestos para sistemas complejos basándose en la confiabilidad de los equipos, además propone sus propios indicadores para evaluar la política conjunta en términos de costos. Chemweno et al. (2015) Por su lado, presenta un modelo de gestión conjunta adaptado para plantas termoeléctricas que contempla sistemas reparables y gran número de variables como iteraciones en el proceso de mantenimiento, si la condición del equipo es AGAN o ABAO después del mantenimiento, entre otros, incorporándolos dentro de un modelo de simulación. El uso de tecnologías de información y los llamados IMS (*Intelligent Maintenance System*) para gestionar la cadena de suministro de los repuestos también es mencionado por Hellingrath et al. (2015) quien señala que un sistema basado en arquitectura orientada a servicios es

adecuada para la integración de los IMS a la gestión de mantenimiento e inventario de repuestos.

Con los estudios avanzando en la integración de ambas políticas es necesario definir un esquema de control y gestión basado en KPIs ajustados a las necesidades gerenciales para la correcta toma de decisiones, [Lin y Ghodrati \(2011\)](#) ha hecho un avance en este sentido proponiendo utilizar su *HOMM-spare* para la gestión y evaluación de rendimiento de los inventario de repuestos. Para entender esta propuesta y continuar con las bases de esta investigación es necesario comprender que es la gestión de mantenimiento y como se relaciona con los inventario de repuestos.

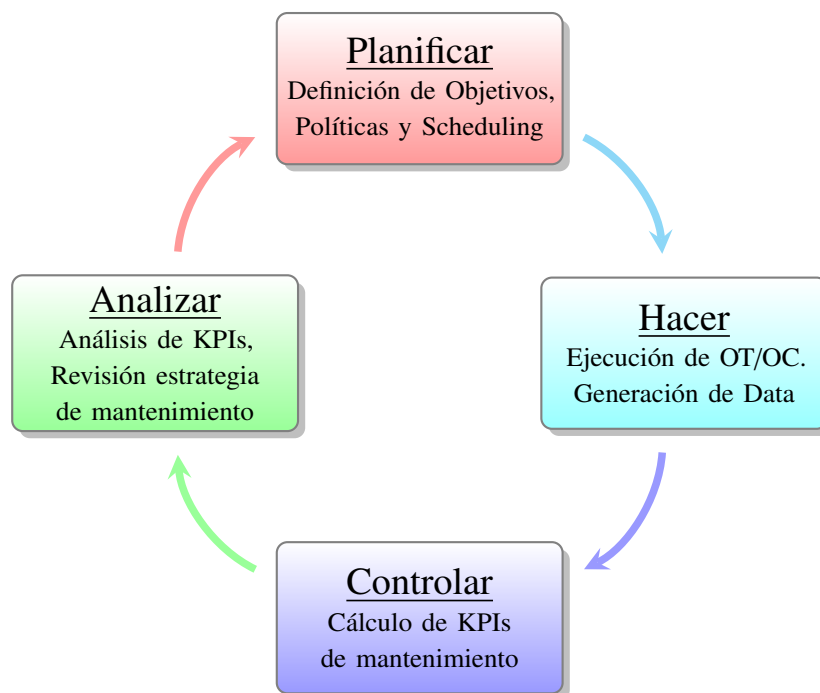
### 1.5.2. Sobre Gestión de Mantenimiento

La gestión de mantenimiento se entiende como las actividades realizadas para asegurar que los activos operen en un estado adecuado al menor costo posible sin perjudicar HSE y que el mantenimiento sea realizado de tal forma de conseguir mejoramiento continuo en confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad ([Milje, 2011](#)).

Así como cualquier proceso de gestión con un enfoque en calidad y mejora continua, la gestión de mantenimiento puede entenderse bajo el esquema del ciclo de Deming o ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) bajo el esquema que se presenta en la Figura 1.1. De esta forma el ciclo PDCA de mantenimiento se caracteriza por las siguientes etapas:

**Planificar:** En la etapa de planificación se toman las decisiones de mantenimiento a nivel estratégico, táctico y operativo, esta etapa se alimenta de análisis RCM, FMECA, RBM, entre otros para definir los objetivos de mantenimiento, la política a utilizar y la planificación de las ordenes de trabajo.

**Hacer:** En esta etapa es donde se ejecutan las órdenes de trabajos de mantenimiento, dependiendo de la política y tipo de falla, esto bajo el objetivo de realizar el mantenimiento de forma eficiente en términos de costos y/o disponibilidad de los equipos o el sistema. En esta etapa además se debe generar el registro de toda la data en términos operativos que permitirá después generar KPIs.



**Figura 1.1:** Ciclo PDCA de gestión de mantenimiento (Elaboración propia)

**Controlar:** La etapa de control determina los valores de los KPIs basándose en la data obtenida en la etapa anterior. La calidad de estos indicadores dependerá de la calidad de la información recopilada, así esté organizada y categorizada correctamente y sea reportada apropiadamente según el nivel estratégico, táctico u operacional de los requerimientos de estos indicadores.

**Analizar:** En la etapa de analizar se realizan todos los análisis de los indicadores y datos obtenidos, así se lleva a cabo análisis de criticidad, de ciclo de vida de los equipos, de costos o RCM, además, esta etapa se realiza la optimización de los recursos, estrategias y KPIs de mantenimiento preparando la toma de decisiones para la siguiente etapa del ciclo.

Dentro de este esquema se destacan 3 elementos fundamentales para la comprensión del proceso de gestión de mantenimiento, estos son el método de análisis, las políticas de mantenimiento y los KPIs de mantenimiento.

### 1.5.2.1. Métodos de Análisis de Mantenimiento

Estos métodos buscan definir la forma en que se decide qué tipo de mantenimiento se realizará (Milje, 2011), dentro de estos métodos se destacan principalmente 3: FMECA, RCM y RBI.

**Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA):** Este método es quizás el más utilizado para el análisis de confiabilidad (Park, 1998), proviene de la norma US MIL-STD-1629<sup>1</sup> y la norma BS EN 3811:1993<sup>2</sup> lo define como “Método cuantitativo de análisis de confiabilidad que involucra un análisis de modos de falla y efectos juntos con una consideración de la probabilidad de modos de falla, sus consecuencias y ranking de efectos y la gravedad de las fallas”. El procedimiento se realiza en 4 etapas (Park, 1998):

- *Establecer el alcance del análisis:* Se deben identificar las fronteras del sistema a estudiar y la profundidad del análisis, en base a esto se determina que tanta información se recopilará de las fallas potenciales de cada componente (causa raíz, posibles efectos, medios de detección, salvaguardias, frecuencia y criticidad de los efectos).
- *Recopilación de información:* Se recopila información de diseño como planos, información CAD, memorias y análisis de esfuerzos, resultados experimentales, etc. o predicciones de confiabilidad para el análisis de criticidad.
- *Preparar la lista de componentes:* Se deben especificar las funciones, condiciones de operación y ambientales de los componentes, construir un diagrama funcional de bloques para guiar y comprender el análisis completo.
- *Completando las fichas:* En la ficha se identifican:
  - **Componente:** Identificación del componente de forma específica.
  - **Función:** Breve, en casos innecesaria.

<sup>1</sup>Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis

<sup>2</sup>British Standard Glossary of terms

- Modo de falla: por vejez, condición de operación, condición ambiental o clase de operación.
- Frecuencia de falla: ej. MTBF, tasa de falla.
- Criticidad: clasificación de la criticidad del componente según su efecto sobre confiabilidad, disponibilidad y seguridad.

Este método tiene la ventaja de poder ser utilizado sin data previa, ya que puede utilizar la información de diseño de los componentes para el análisis, además es un método relativamente simple de aplicar sin embargo, al no considerar la información histórica de los equipos, los resultados del FMECA son limitados y sesgados, por lo mismo es que se propone utilizarlo en caso de escasos de datos hasta haber recopilado la suficiente información para aplicar el análisis RCM.

**Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM):** RCM es un método utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de los equipos que se basa en el estudio del comportamiento histórico de los componentes para determinar su función de confiabilidad, disponibilidad y criticidad.

El análisis de RCM es a nivel de componente, esto puede ser un aspecto positivo ya que simplifica la aplicación del método (Bloom, 2006), pero al mismo tiempo puede resultar ineficiente para analizar el funcionamiento de una planta compleja, debido a que el método consume tiempo y recursos (Milje, 2011), en estos casos se debe utilizar un criterio de selección adicional para reducir el número de componentes a estudiar (Bloom, 2006).

La importancia de entender el mantenimiento a nivel de componentes es que los requerimientos de mantenimiento preventivo (MP) dependen de las condiciones de uso y funciones del equipo, así dos equipos idénticos pueden tener comportamientos y modos de falla distintos dependiendo de para que se les use.

El seguimiento del comportamiento de los equipos se hace de forma individual y el análisis parte definiendo las funciones y modos de falla por cada componente, para esto se puede usar un FMECA o un COFA (Bloom, 2006). Con esto se puede generar una base de datos histórica por ítem mantenible y estudiar el comportamiento estadístico de las

fallas determinando una función de confiabilidad para lo cual normalmente se utilizando la función Weibull (Scholz, 2002).

**Inspección basada en riesgo (RBI):** Este método se basa en la cuantificación del riesgo de los sistemas para planificar las inspecciones. Las inspecciones son priorizadas por la importancia y los diferentes comportamientos de deterioro de los componentes (Milje, 2011). Este método no se verá con mayor profundidad ya que se priorizarán los métodos señalados con anterioridad.

### 1.5.2.2. Políticas de Mantenimiento

Los métodos de análisis de mantenimiento como el RCM y FMECA sirven para definir cuál política de mantenimiento se adoptará para los distintos equipos, las políticas de mantenimiento definen cuando o bajo qué condiciones se realizarán los trabajos de mantenimiento. Las políticas de mantenimiento comúnmente utilizadas son las siguientes:

**Mantenimiento Correctivo** El mantenimiento correctivo es aquel que se lleva a cabo cuando se detecta una falla en el equipo, esta política es la más sencilla de aplicar y gestionar pero en gran cantidad de casos tiende a resultar ineficiente en términos de costos debido a que genera largos tiempos de *downtime* no planificados, sin embargo para equipos no reparables de baja criticidad, aplicar mantenimiento correctivo puede ser eficiente en costos (Kumar y Kumar, 2004).

Aunque esta política define realizar el mantenimiento ante la ocurrencia de la falla, no significa que no se deba gestionar, la gestión de este tipo de mantenimiento se centra en reducir el impacto de las fallas. Sheut y Krajewski (1994) señala posibilidades para mitigar el impacto agilizando el proceso de mantenimiento o reduciendo el efecto de la falla del equipo en el sistema (Tabla 1.1).

Dentro de estas alternativas se hace notar la gestión del inventario de repuestos que afecta directamente el downtime, una buena gestión de los inventarios permitirá tener disponibles los repuestos a tiempo reduciendo significativamente el downtime mejorando la disponibilidad de los equipos.

---

*Acelerando el servicio de reparación*

---

Aumentar el tamaño del personal de mantenimiento

Determinar el mejor método de reparación

Capacitar al personal de mantenimiento

Mejorar las instalaciones de reparación para facilitar el mantenimiento

Crear un inventario de repuesto

---

*Facilitando los trabajos de reparación*

---

Designando equipo para facilitar mantenimiento

Uso de diseños modulares para los equipos

Reparar componente con fallada con repuestos y reparar el componente después

---

*Proveer output alternativo durante el tiempo de reparación*

---

Equipos en redundancia

Ruteos alternativos

Equipos más versátiles

Inventario de bienes terminados

Inventario de Work-in-Process

Horas-extras para personal de mantenimiento

---

**Tabla 1.1:** Técnicas alternativas para mantenimiento correctivo (Sheut y Krajewski, 1994)

**Mantenimiento Preventivo (FTM)** El mantenimiento preventivo como lo dice su nombre, busca prevenir la ocurrencia de la falla, es decir, esta política busca intervenir el equipo de forma controlada antes de que el equipo falle y genere cualquier complicación asociada a esta falla. En general, el mantenimiento preventivo se puede entender como cualquier mantenimiento no correctivo pero en este caso se entenderá en base al FTM (*Fixed-Time Method*) o mantenimiento a edad constante. El método define un periodo de tiempo de operación del equipo durante el cual se le dejará operar, una vez transcurrido este periodo de tiempo se le realiza mantenimiento al equipo, el criterio para determinar este periodo de tiempo puede ser optimizando la disponibilidad del equipo o el costo estimado de mantenimiento por unidad de tiempo. El método está estructurado de la siguiente manera

a) *Determinación de la función de confiabilidad*

El método requiere de conocer la función de confiabilidad, para esto se necesita saber los datos históricos de operación del componente en estudio, esto significa llevar registro de las fallas y del horómetro de cada equipo separado por tipo de falla. Con estos datos de tiempos de funcionamiento se puede estimar la función de confiabilidad estimándola como una distribución Weibull. Al-Fawzan (2000) hace una recopilación de algunos

métodos para realizar la estimación: Métodos gráficos, Método de mínimos cuadrados (LSM), Método de Momentos (MOM), estimador de máxima verosimilitud (MLE).

b) *Iteración para selección de política*

La selección de la política será básicamente definir cada cuanto tiempo o edad  $T$  se realizará el mantenimiento al equipo, esta decisión se puede tomar minimizando costos de mantenimiento o maximizando disponibilidad. Si el criterio será la minimización de costos se puede utilizar el costo estimado de mantenimiento por unidad de tiempo ( $E_C$ ) (Stegmaier et al., 2014). Este valor puede ser calculado con las siguientes expresiones:

$$E_C = \frac{C_E F(T) + C_P R(T)}{MTBM_T + MTTR_T} \quad (1.1)$$

$$MTBM_T = R(T)T + F(T)MTBF_T \quad (1.2)$$

$$MTTR_T = R(T)MTTR_P + F(T)MTTR_E \quad (1.3)$$

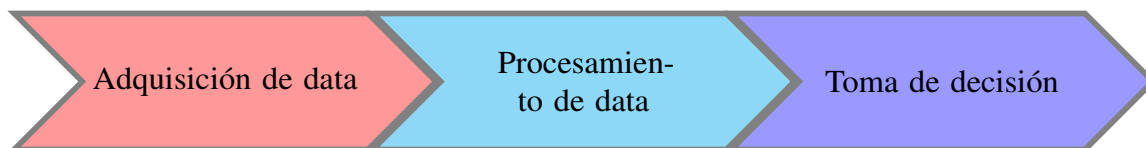
Donde  $C_E$  es el costo de reparación de emergencia,  $C_P$  es el costo de reparación preventiva,  $R(T)$  es la función de confiabilidad y  $F(T) = 1 - R(T)$  es la función de probabilidad de falla.

$$MTBF_T = \frac{\sum_{i=0}^T \{[F(t_i) - F(t_{i-1})] [(t_i + t_{i-1})/2]\}}{F(T)} \quad (1.4)$$

Si se desea utilizar el criterio de la disponibilidad, ésta se puede estimar como:

$$A_T = \frac{MTBF_T}{MTBF_T + MTTR_T} \quad (1.5)$$

Se deberá calcular estos valores para distintas alternativas de  $T$ , posiblemente a intervalos fijos de tiempo, y determinar en cuál tiempo  $T$  se minimizan los costos o se maximiza la disponibilidad



**Figura 1.2:** Fases de CBM (Basado en [Hellingrath y Cordes \(2014\)](#))

**Mantenimiento predictivo (CBM)** El mantenimiento predictivo o mantenimiento basado en condición (CBM) es una política que busca intervenir el componente antes de que ocurra la falla, para esto se estudia la condición del equipo incluyendo el entorno en donde opera y prediciendo el riesgo de que el equipo falle en tiempo real, basado en la recopilación de data sobre el componente ([Shin y Jun, 2015](#)).

Según señala [Shin y Jun \(2015\)](#), CBM tiene un gran número de ventajas como una mayor precisión en la predicción de fallas, aumenta la seguridad, mejora la experiencia del consumidor final asegurando calidad, mejora la planificación de mantenimiento reduciendo el número de inspecciones, reduce el presupuesto de mantenimiento y mejora la productividad. Sin embargo cerca de un 30 % de los equipos industriales no se beneficia por este método debido al alto costo de inversión que significa adquirir los sensores y el equipamiento de monitoreo además de la capacitación del personal, esto junto a las pocas garantías de que los métodos de pronóstico y diagnóstico funcionan correctamente vuelven la implementación del CBM una inversión riesgosa y en algunos casos poco atractivo para algunas empresas.

El método se compone de 3 fases ([Figura 1.2](#)), Adquisición de data, procesamiento de data y toma de decisión ([Hellingrath y Cordes, 2014](#)).

- *Adquisición de data*

El primer paso en la implementación de CBM, es la adquisición de data sobre las condiciones de operación del equipo, se busca monitorear una variable que tenga relación con el deterioro del equipo y permita estimar su vida útil restante o RUL por sus siglas en inglés. El deterioro puede medirse a través de variables como flujo, presión consumo energético, temperatura o vibraciones ([Milje, 2011](#); [Grall et al., 2002](#))

- *Procesamiento de data*

Luego de que la data es recopilada y almacenada es necesario procesarla, esto significa en términos generales limpiarla y condensarla, para lo cual se pueden utilizar técnicas como “*data mining*” (Shin y Jun, 2015).

- *Toma de decisiones*

La toma de decisiones se refiere al uso que se le da a la data ya procesada, en esta fase se realizan los diagnósticos y pronósticos de los equipos. El diagnóstico se refiere al aislamiento del origen de la falla que permite determinar la localización de la falla y el modo de falla. El Pronóstico consiste en utilizar los datos ya conociendo los modos de falla y sus características para predecir y pronosticar el tiempo de vida restante del equipo.

**Mantenimiento de Mejora** El mantenimiento de mejora es cuando un equipo es intervenido con la intención de mejorar sus características ya sea para mejorar su productividad, su confiabilidad, seguridad o cualquier otro tipo de mejora. Este tipo de mantenimiento no está enfocado en prevenir o corregir fallas por lo que no se abarcará con profundidad.

**Mantenimiento Sistemático** El mantenimiento sistemático es referido al mantenimiento realizado a equipos a los cuales no se les puede realizar inspección durante su periodo de operación por lo que es necesario realizar mantenimiento preventivo programado según los momentos en los que el equipo no se encuentre operando, un ejemplo de este tipo de mantenimiento puede ser la turbina de un avión comercial, el mantenimiento de ésta debe realizarse cuando el avión se encuentre en tierra. Debido a la especificidad de este tipo de mantenimiento, no se abordará con mayor profundidad dentro de este estudio.

### 1.5.2.3. Medición del desempeño de Mantenimiento

La medición del desempeño de mantenimiento o MPM por sus siglas en inglés es según Parida (2006) “un proceso multidisciplinario de medición y justificación del valor creado por la inversión en mantenimiento”. Tener definido un buen sistema de MPM permite (Kumar et al., 2013):

- Clarificar los objetivos estratégicos
- Vincular los objetivos del departamento de mantenimiento con los procesos de negocio.
- Centrar las acciones en factores críticos de éxito.
- Mantenerse al tanto de tendencias en desarrollos.
- Identificar posibles soluciones a problemas.

En términos generales, un buen MPM permite alinear los objetivos estratégicos con los distintos niveles jerárquicos de la organización, lo que permite visualizar los objetivos y metas de la compañía (Parida y Kumar, 2009).

**KPIs de mantenimiento** Para la utilización de un buen sistema de MPM es necesario definir *Key Performance Indicators* (KPIs) para cada elemento del plan estratégico (Parida y Kumar, 2009). Hoy en día existe un gran número de indicadores definidos en la literatura, tanto en ámbito financiero como técnico, y para distintos niveles jerárquicos en las organizaciones, sin embargo, no existe consenso en la industria respecto a que indicadores utilizar, y en algunos casos tampoco hay consenso en sus definiciones ni en su forma de cálculo (Kumar et al., 2013).

Kumar et al. (2013) señala sin embargo, que existen dos iniciativas que están trabajando juntas para formar un estándar internacional en KPIs de mantenimiento, estas son la Sociedad de Profesionales de Mantenimiento y Confiabilidad (SMRP) y la norma EN-15341 (ver Figura 1.3) La SMRP tiene definido 68 indicadores divididos en 5 pilares, Negocio y administración, Confiabilidad en procesos de manufactura, confiabilidad de equipos, organización y liderazgo y administración de trabajos. Estos indicadores se encuentran publicados en el sitio web de la SMRP<sup>3</sup>, además tienen incluida una sección de indicadores homogeneizados con la norma EN-15341.

La norma UNE-EN 15341:2007 contempla la definición de 71 KPIs de mantenimiento organizados bajo dos criterios, primero, según el grupo de indicadores que pueden ser

<sup>3</sup>[http://library.smrp.org/ind\\_metrics](http://library.smrp.org/ind_metrics)

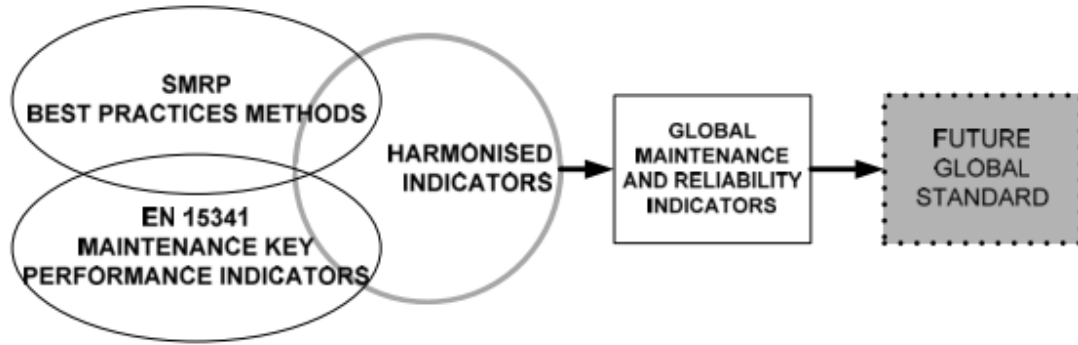


Figura 1.3: Proyecto de proceso de armonización de indicadores (Kumar et al., 2013)

|   |   |                                     |                            |                                    |  |
|---|---|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--|
| <b>Factores de influencia externos</b><br>Lugar<br>Cultura de la sociedad<br>Coste de la mano de obra nacional<br>Situación del mercado<br>Leyes y reglamentos<br>Sector/Derivaciones | <b>Factores de influencia internos</b><br>Cultura de la compañía<br>Severidad del proceso<br>Mezcla de productos<br>Tamaño de la instalación<br>Índice de utilización<br>Antigüedad de la instalación<br>Criticidad | <b>Grupos de indicadores</b>        | <b>Nivel del indicador</b> |                                    |  |
|   |   |                                     | <b>Nivel 1</b>             | <b>Nivel 2</b>                     | <b>Nivel 3</b>   |
|   |   | <b>Indicadores económicos</b>       | E1 E2 E3 E4<br>E5 E6       | E7 E8 E9 E10<br>E11 E12 E13<br>E14 | E15 E16 E17<br>E18 E19 E20<br>E21 E22 E23<br>E24                               |
|   |   | <b>Indicadores técnicos</b>         | T1 T2 T3 T4<br>T5          | T6 T7                              | T8 T9 T10 T11<br>T12 T13 T14<br>T15 T16 T17<br>T18 T19 T20<br>T21              |
|   |   | <b>Indicadores organizacionales</b> | O1 O2 O3 O4<br>O5 O6 O7 O8 | O9 O10                             | O11 O12 O13<br>O14 O15 O16<br>O17 O18 O19<br>O20 O21 O22<br>O23 O24 O25<br>O26 |

Figura 1.4: Factores de influencia en el mantenimiento e Indicadores Clave de Rendimiento en Mantenimiento (EN-15341, 2007)

económicos, técnicos u organizacionales, estos a su vez están divididos en 3 niveles que no corresponden a los niveles jerárquicos de la organización sino que más bien a un nivel de desagregación, así los indicadores de nivel 1 son más globales y los indicadores de nivel 3 son más específicos (Ver Figura 1.4). También hacen referencia a los factores de influencia separándolos en externos e internos.

Aparte de estas fuentes, hay otros autores que se refieren a KPIs de mantenimiento, por ejemplo Parida (2006) propone un marco de referencia jerárquico multi-criterio para MPM (Ver Figura 1.5), Mitchell (2002) Propone métricas en distintos niveles jerárquicos categorizados en indicadores de activos/capital, Desempeño de la industria, efectividad

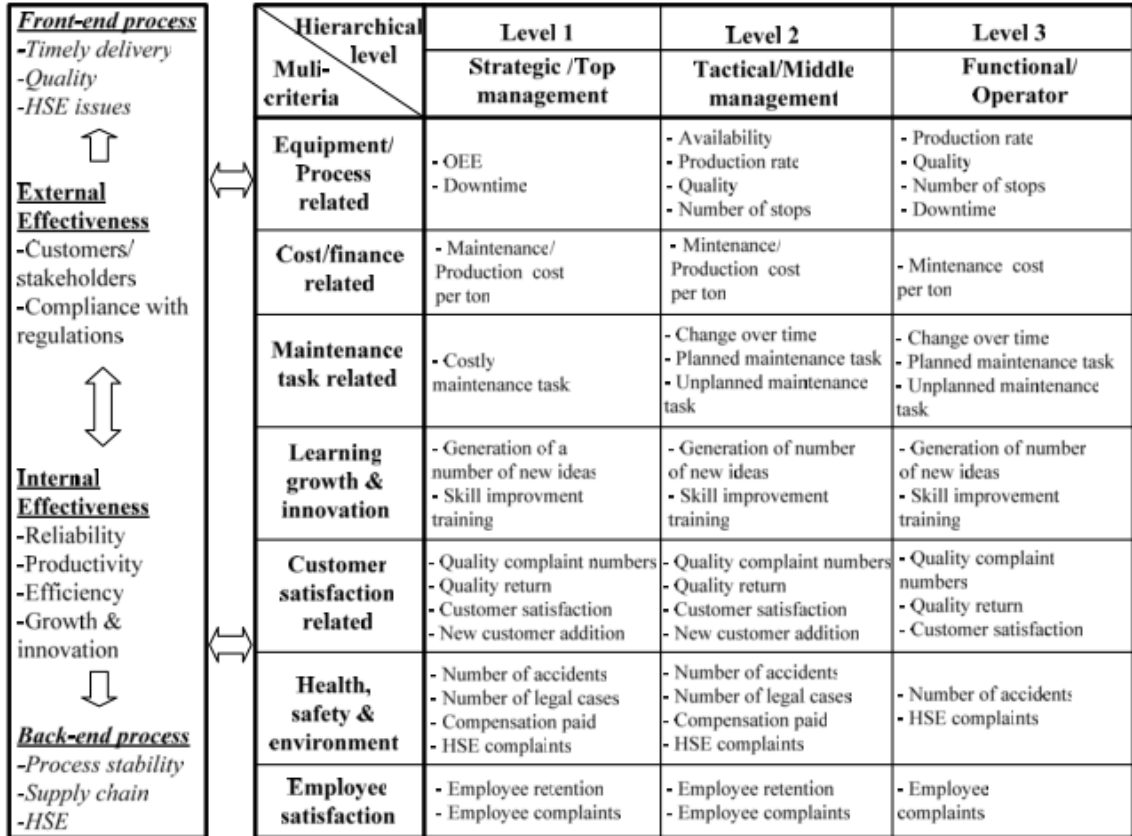
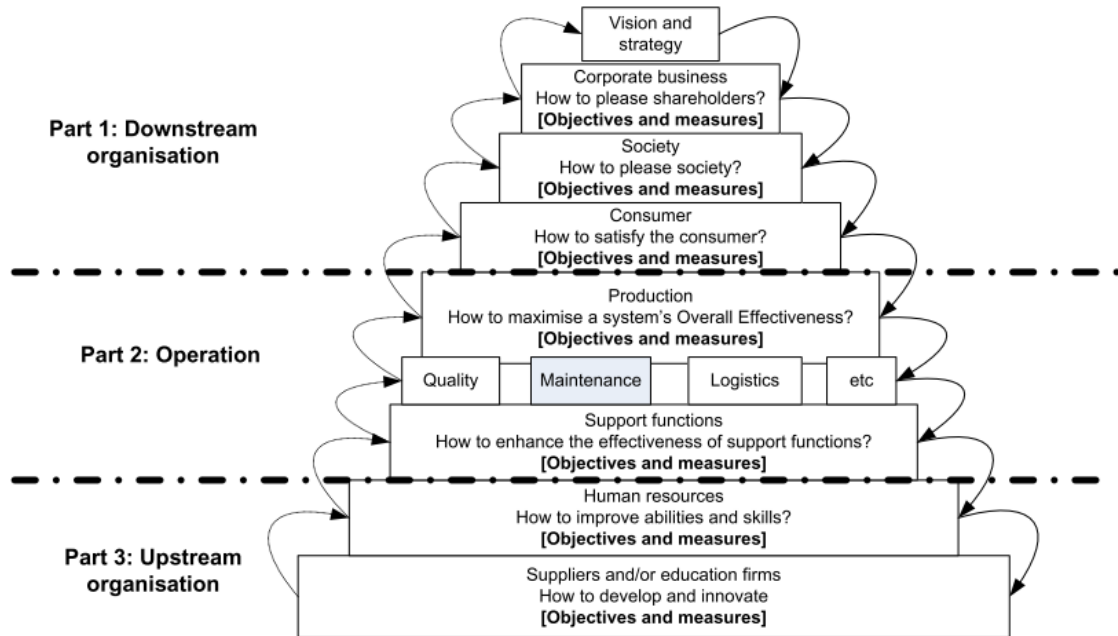


Figura 1.5: Marco de referencia multi-criterio para MPM (Parida, 2006)

operativa, gestión de confiabilidad, eficiencia de procesos y efectividad de programas.

Estos indicadores son algunos ejemplos de los utilizados por la industria y son apropiados para realizar benchmarking, lo que viene a continuación es la selección de cuáles indicadores se utilizarán finalmente para el MPM.

**Selección de KPIs** La SMRP y la norma EN-15341 ofrecen un buen espectro de indicadores para sostener el MPM, el siguiente paso es elegir cuál de estos indicadores se utilizarán. Para esto la norma señala que se debe partir con la definición de los objetivos de mantenimiento, sin embargo es necesario ir más allá, los objetivos de mantenimiento deben estar alineados con las metas de la compañía por lo que se recomienda definir los conjuntos de indicadores utilizado el popular método de Balanced Scorecard (Kumar et al., 2013). Este popular método creado por Kaplan y Norton en 1992 ha sido adaptado para mantenimiento por Tsung et al. (1999), luego Alsyouf (2006) criticando la falta de jerar-



**Figura 1.6:** Adaptación de Alsayouf (2006) del Maintenance Scorecard de Tsang (1999) citado en [Kumar et al. \(2013\)](#)

quización en el modelo lo que no tomaba en consideración la cadena de valor extendida, quizo desarrollar su propia adaptación, de esta forma se llega al método ejemplificado por ([Kumar et al., 2013](#)) en la Figura 1.6.

El número de indicadores a elegir debe ser reducido, el exceso de información puede generar problemas en la gerencia al momento de tomar decisiones. Normalmente un gerente es capaz de manejar entre 4 a 8 indicadores a la vez por lo que se recomienda seleccionar alrededor de 6 KPIs por gerencia ([Kumar et al., 2013](#)).

**Criticidad** Otro concepto importante dentro del análisis de los equipos para su mantenimiento es su criticidad, la criticidad se entiende como el nivel de importancia que tiene un equipo para sostener las labores de producción de una compañía de una forma segura y eficiente ([Cavalieri y Garetti, 2008](#)). Existen varios métodos para determinar la criticidad de un equipo o componente, [Cavalieri y Garetti \(2008\)](#) los divide en métodos cuantitativos y cualitativos.

Para los métodos cuantitativos existen herramientas basadas en Pareto, por ejemplo, análisis ABC sobre MTTF o MTTR, o también sobre demanda anual o costo anual de

compras en repuestos (esto principalmente para clasificar la criticidad de los repuestos).

También [Kristjanpoller et al. \(2017\)](#) propone los indicadores de Impacto esperado de Criticidad Operacional (ICO) y el Factor de Propagación del tiempo de Detención (FPD) que evalúan el impacto de la falla de un equipo o subsistema en la disponibilidad total del sistema según su configuración lógica (Ver Anexo A).

Por otro lado, existen métodos cualitativos, [Cavalieri y Garetti \(2008\)](#) propone la utilización del análisis VED, que clasifica según criterio de experto o en base a información tal como costos, downtime, etc., a los componentes como Vitales, Esenciales o Deseables. Es posible agregar un sistema de score para eliminar la subjetividad en la clasificación.

### 1.5.3. Sobre Inventario de Repuestos

El inventario se entiende como el almacenamiento de cualquier ítem o recurso usado en una organización, la gestión de mantenimiento debe definir las políticas de mecanismo de control para decidir que niveles de inventario mantener, cuando se debe reponer el stock y de qué tamaño deben ser las órdenes de compra ([Jacobs y Chase, 2013](#)).

La gestión del inventario tiene variadas funciones dependiendo del tipo de inventario que se esté almacenando, sin embargo, el inventario de repuestos se caracteriza por ser especialmente distinto a los otros tipos de inventario sean WIP o de productos finales ([Kennedy et al., 2002](#)). Las principales aspectos únicos de los inventarios de repuestos según [Kennedy et al. \(2002\)](#) son:

- Las políticas de mantenimiento dictan la demanda de repuestos, pero en estas políticas existen la posibilidad de reparar el componente con falla además de reemplazarlo, lo que reduce cantidad necesaria de repuesto, además está la decisión de con cuanta redundancia trabajar, lo que permite reparar de una sola vez un buen número de equipos si es que existe hartos equipos en redundancia. Estas posibilidades no se encuentran en inventario de WIP o productos finales.
- La información de confiabilidad no siempre está disponible para un buen pronóstico de fallas y por tanto de la demanda de partes de repuesto, esto especialmente en equipos nuevos.

- Las fallas de los componentes son muchas veces dependientes, esto es especialmente problemático si no se sabe el tipo de dependencia.
- La demanda de algunos componentes es suplida a través de canibalismo de otras partes de unidades.
- Los costos por stock-out incluyen pérdidas de calidad y riesgos de seguridad además de bajas en la producción, estos costos son difíciles de cuantificar.
- La obsolescencia de los equipos puede perjudicar el inventario de repuestos destinados a estos equipos obsoletos.
- Es más común mantener stock de componentes de equipos más que unidades completas si es que el equipo es de alto costo y la reparación puede ser preferida sobre el reemplazo en estos casos.

Entendido esto, el principal objetivo de la gestión de inventario de repuestos es reducir el downtime generado por problemas logísticos y de administración debido a la falta de disponibilidad de repuestos al momento de necesitar realizar una intervención a un componente (Cavalieri y Garetti, 2008). En la Figura 1.7 se observa los tiempos que componen el downtime, de estos, los retrasos generados por necesidades administrativas al momento de contactar y negociar la compra de repuestos, o los retrasos de logística debido a la falta de repuestos en los talleres de mantenimiento cuando se necesitan.

Para explicar el procedimiento en la gestión del inventario de repuestos, Cavalieri y Garetti (2008) desarrolló un marco de referencia sencillo y práctico abarcando el procedimiento en 5 fases (Ver Figura 1.8). Estas fases serán explicadas a grandes rasgos a continuación agregando conceptos relacionados con esta investigación.

### 1.5.3.1. Codificación y Clasificación de partes

**Codificación de partes:** Se debe utilizar una codificación especial para las partes de repuesto, el código debe ofrecer un entendimiento sobre las características técnicas del ítem, del árbol de equipo que pertenece, los proveedores asociados y la ubicación física de donde están almacenados si es que lo están. Sin embargo en la actualidad, los sistemas

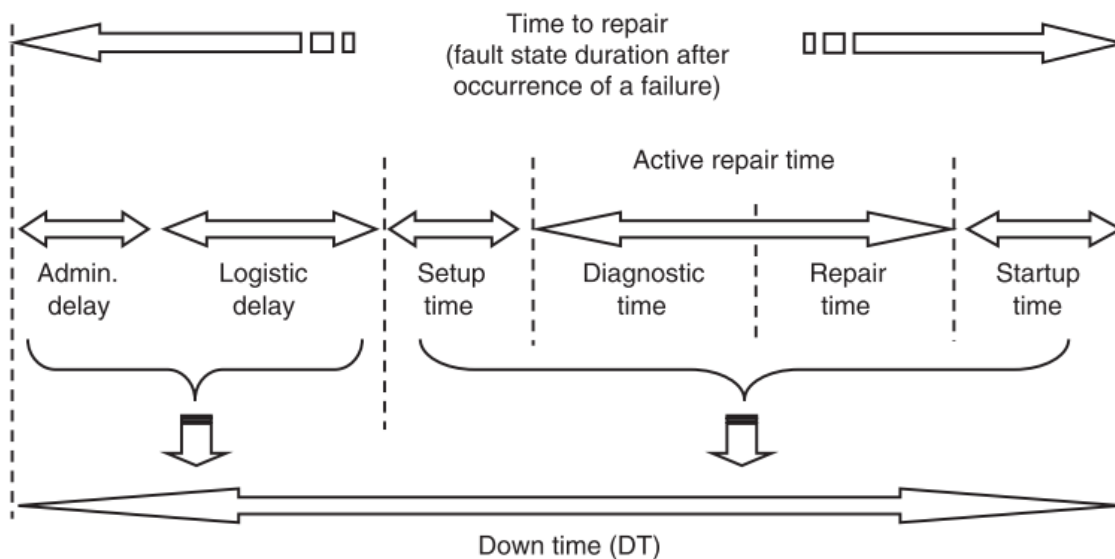


Figura 1.7: Componentes de tiempo típicos del downtime de un equipo (Cavalieri y Garetti, 2008)

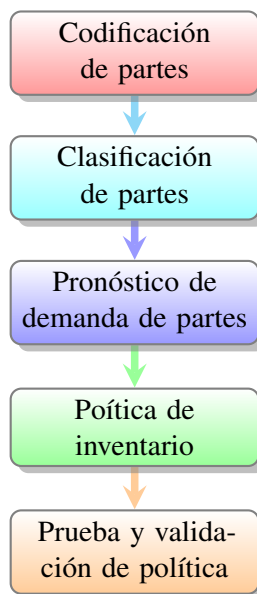


Figura 1.8: Los 5 pasos para la toma de decisiones (Cavalieri y Garetti, 2008)

de información modernos como ERP o CMMS (*Computerized Maintenance Management System*) ya tienen incorporados sistemas de codificación de partes de repuesto.

**Clasificación de partes:** Es necesario clasificar las partes debido a que en plantas de producción, formadas por distintos equipos, los repuestos y materiales destinados directa o indirectamente a labores de mantenimiento pueden ser muy variados, esto junto con que las características intrínsecas técnicas y económicas de las partes como criticidad, especificidad, valor y tipo de proveedor pueden ser muy distintas, obliga a tener una buena clasificación que permita definir las políticas de inventario de cada componente.

[Cavalieri y Garetti \(2008\)](#) Propone la siguiente clasificación de los repuestos.

- *Materiales consumibles y auxiliares:* Caracterizados por consumo continuo y estable, con una vasta base de proveedores.
- *Repuesto genéricos:* Estos son repuesto que pueden ser utilizados en distintos equipos, normalmente son fáciles de adquirir.
- *Repuestos específicos:* Son repuestos específicos a equipos particulares y están disponibles sólo a través de proveedores específicos.
- *Repuestos estratégicos:* Son repuestos específicos cuyo desgaste no es predecible y se caracterizan por largos tiempos de entrega, altos costos demanda esporádica.

### Criticidad

La criticidad es un concepto de suma importancia al momento de clasificar los repuestos, si un equipo es crítico entonces sus repuestos también lo son, es por esto que los esfuerzos en la gestión de inventario de repuestos deben estar focalizada en repuestos críticos. Más detalles sobre el concepto de criticidad fueron abordados en la sección [1.5.2.3](#).

#### **1.5.3.2. Pronóstico de demanda de partes:**

El pronóstico de la demanda es el punto esencial donde la gestión de mantenimiento y la de inventario de repuestos se unen, establecer una buena base de datos para evaluar y predecir el comportamiento de la confiabilidad de un equipo es esencial para gestionar

correctamente los inventarios de repuestos. La demanda de repuestos estará dictada principalmente por la política de mantenimiento que se opte utilizar, dentro de las políticas mencionadas en la Sección 1.5.2.2, se comentará respecto al mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo.

En el caso de mantenimiento correctivo, la predicción de la demanda de inventario gira básicamente en predecir cuál es la tasa de falla ( $\lambda$ ) de los equipos, con este objetivo normalmente se utiliza el análisis de ciclo de vida de los equipos, para este análisis es necesario tener registro de los momentos de las fallas de un equipo, categorizados por tipo de falla y por sobre todo, no mezclar data de equipos distintos, incluso si dos equipos tienen las mismas características técnicas, el modo de uso, ubicación física o configuración lógica por ejemplo, pueden afectar el desgaste de los equipos y con esto su tasa de falla (Bloom, 2006).

El análisis normalmente busca ajustar el comportamiento de las fallas a una función de distribución Weibull, para esto existe una amplia disponibilidad de literatura respecto a métodos de ajuste, por ejemplo Al-Fawzan (2000) hace una recopilación y evaluación de varios métodos (MLE, MOM, LSM y método gráfico) llegando a la conclusión de que el método más preciso es el método de momentos (MOM). Luego si la tasa de falla es constante (cuando el equipo se encuentra en la etapa de vida útil), el perfil de demanda se puede asumir como una distribución de Poisson (Cavalieri y Garetti, 2008).

En el caso de mantenimiento preventivo o por FTM, la política determina cuando se realizarán las intervenciones a un periodo de tiempo constante, por lo que se puede asumir un patrón de demanda determinístico y mantener un stock de seguridad para solventar los casos de fallas previas a las órdenes de trabajo planificadas.

En caso de mantenimiento basado en condición, se puede pronosticar la tasa de falla del equipo en base al modelamiento estadístico de la variable de deterioro monitoreada.

### 1.5.3.3. Política de Inventario

La construcción de la política de inventario se ve a través de cuatro decisiones sobre la estructura de la política, la política de orden, política de revisión, la política de *shortage* y el tipo de nivel de servicio.

**Política de Orden:** La política de orden define cuanto y cuando ordenar, la decisión se muestra bajo dos parámetros, un valor  $x$  que definen el criterio de cuando ordenar y un valor  $y$  que define el tamaño de la orden, estos valores se presentan como un par ordenado  $(x, y)$  y sus valores e interpretaciones dependen de la política escogida (Cavalieri y Garetti, 2008).

Según Cavalieri y Garetti (2008), las políticas más utilizadas para manejar inventario de repuestos son:

- Modelo de revisión continua, con punto de pedido fijo ( $r$ ) y tamaño de pedido fijo ( $Q$ ) referido como  $(Q, r)$ .
- Modelo de revisión continua, con punto de pedido fijo ( $s$ ) y pedido hasta alcanzar nivel ( $S$ ), referido como  $(s, S)$ .
- Modelo de revisión periódica, con periodo entre pedidos fijo ( $T$ ) y pedido hasta alcanzar nivel ( $R$ ), referido como  $(T, R)$ .
- Modelo de revisión continua, con pedidos hasta alcanzar nivel ( $S$ ) y reabastecimiento frente a demanda, referido como  $(S - 1, S)$ .

**Política de Revisión:** Consiste básicamente en decidir si la revisión del nivel de inventario para decidir si reabastecer o no se hará de forma continua o periódica, esta decisión está por lo general vinculada al modelo de inventario escogido, así el modelo  $(Q, r)$  en general se realiza con revisiones continuas o de intervalos pequeños de tiempo.

**Política de Shortage:** Esta decisión va en definir que se hace en caso de no tener inventario para responder a la demanda, existen dos opciones, puede aceptarse la posibilidad de atender la demanda con retraso, lo que se conoce como *backorder*, o simplemente asumir el costo de no satisfacer la demanda, conocido como *lost sales*. En caso de mantenimiento, las ordenes de trabajo deben realizarse de forma que naturalmente se considerará un caso de backorder.

**Tipo de nivel de servicio:** El nivel de servicio, SL o CSL (*cycle service level*), se define como la probabilidad de no tener stock-out, dependiendo de su definición exacta pueden cambiar sus valores y modos de cálculo. Existen varias definiciones de SL pero la más apropiada para la gestión de mantenimiento es la denominada “Ready-Rate”, que se define como la probabilidad de que el inventario sea mayor o igual a la demanda dentro del periodo en cuestión, normalmente el lead time.

El nivel de servicio deseado por la compañía debe ser una decisión previa a la parametrización de la política de inventario, ya que el nivel de servicio será una condición que debe cumplir la política. El nivel de servicio puede ser determinado en base a la optimización del trade-off entre Holding Costs y Stock-Out Cost, o puede ser determinado por algún otro criterio.

**Elección de política:** Para la elección de la política se tienen que tomar en consideración varios aspectos de las partes de repuesto, principalmente en 3 dimensiones, primero que nada, el tipo de demanda, si es estocástica o determinística, si es que las partes son reparables o no y si el soporte de logística es centralizado o descentralizado. Como guía de que política utilizar y como abordarla consultar [Cavalieri y Garetti \(2008\)](#).

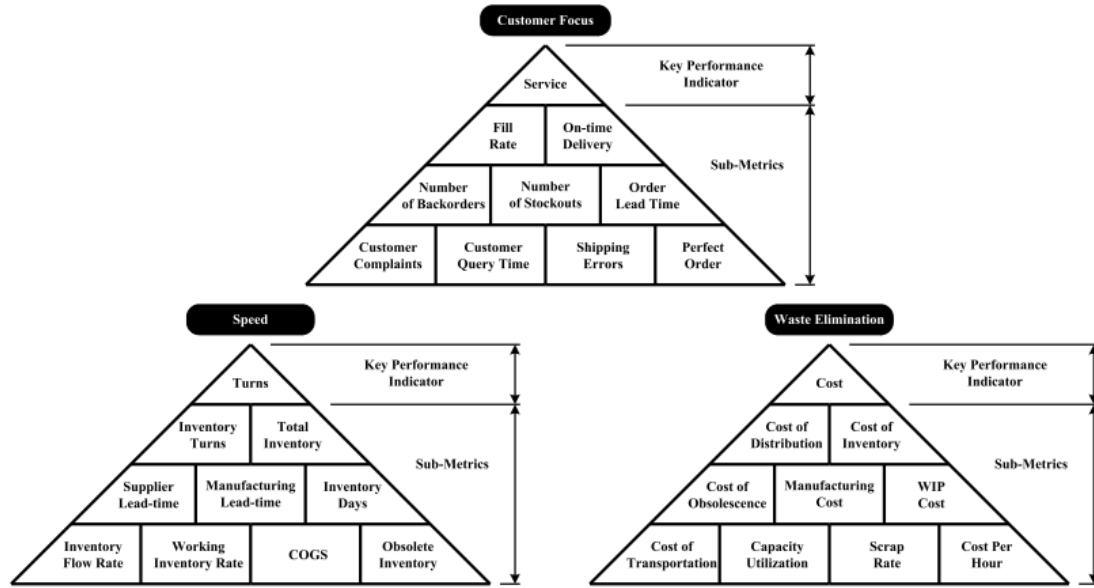
#### 1.5.3.4. Prueba y validación de política

La validación del modelo de inventario a implementar normalmente se realiza a través de DES (*Discrete-Event Simulation*, estas simulaciones generalmente comprueban que el se esté cumpliendo con el nivel de servicio exigido.

Las simulaciones también pueden ser utilizadas para definir la política óptima en términos de sus parámetros debido a su gran versatilidad haciendo un acercamiento híbrido entre DES con un método de búsqueda “inteligente” ([Cavalieri y Garetti, 2008](#)).

#### 1.5.3.5. Medición de Desempeño de Inventario

La medición del desempeño de inventarios generalmente se basa en KPIs ([Lin y Ghodrati, 2011](#)), éstos se abordan desde 3 grandes focos: Desde la perspectiva del consumidor, según la velocidad y según la eliminación de desechos ([Martin, 2010](#)), según esto los KPIs



**Figura 1.9:** Ejemplos de pirámides de métricas de desempeño (Martin, 2010)

de inventario son el servicio, la rotación y los costos de inventario (Ver Figura 1.9).

Ahora, desde la perspectiva de la medición de desempeño para los inventarios de repuestos, no hay una gran disponibilidad de literatura destinada a adaptar los KPIs de inventario a este caso específico, salvo por algunas excepciones como DeWald (2011) que muestra una selección de 24 indicadores útiles para la medición de desempeño de inventarios junto con sus fórmulas de cálculo, valores de benchmarking, la regularidad de su medición y su nivel de importancia.

Para una buena selección de KPIs, Lin y Ghodrati (2011) señala una serie de preguntas para asegurar estar realizando un buen trabajo al momento de definir los indicadores.

- Si los KPIs para gestión de repuestos han sido definidos considerando las necesidades de los distintos niveles jerárquicos de la organización, en términos amplios, a nivel estratégico, táctico y operativo.
- Si los KPIs para gestión de repuestos han sido definidos considerando diferentes usuarios de los repuestos, incluyendo diferentes departamentos, diferentes canales, diferentes equipos, diferentes órdenes de trabajo con diferentes estrategias de mantenimiento y diferentes criticidades.

- Si los KPIs para gestión de repuestos han sido definidos considerando diferentes periodos de tiempo.
- Si los KPIs para gestión de repuestos han sido definidos considerando la confiabilidad de los repuestos (análisis de ciclo de vida), gestión de inventario de repuestos (índices de control de inventarios como costo de repuestos, costos de mantener stock, etc.), proceso de negocio de repuestos, y la evaluación de los proveedores de repuestos.
- ¿Qué tan exactos son los KPIs actuales para gestión de repuestos con datos exactos?
- ¿Cuál es el porcentaje de KPIs para gestión de repuestos que se han utilizado cuando se toman decisiones?

El objetivo de esta investigación será abordar los requerimientos de información para la determinación de estos KPIs de inventario de repuestos junto con los de mantenimiento dentro de un proceso de negocio de gestión conjunta de estas dos áreas.

## 2 | Desarrollo

Esta investigación está orientada a identificar los KPIs y métricas más importantes para la medición de desempeño de mantenimiento e inventario de repuestos y ubicarlos dentro de un proceso de gestión conjunta de ambas políticas, identificando sus requerimientos de información, el desarrollo de este documento está estructurado de la siguiente manera: en primer lugar, en la sección 2.1 se presentarán la recopilación de indicadores y métricas utilizadas generalmente para ambas políticas; luego en la sección 2.2 se presentará la diagramación del proceso de negocio para gestionar mantenimiento y repuestos de forma simultánea y se identificarán en él los indicadores más destacados; más adelante, en la sección 2.3 se presenta una propuesta de relación lógica de la información de mantenimiento e inventario de repuestos utilizando un diagrama UML de clase; finalmente, en la Sección 2.4 se analizan los resultados y se define una pauta general para la gestión de la información.

### 2.1. Recopilación de Indicadores y Métricas

En esta sección se estudiaron que indicadores de mantenimiento y de inventario de repuestos se están usando en la industria, con el fin de identificarlos y determinar métricas y requerimientos de información necesarios para su cálculo, se organizaron por grupos de indicadores y se clasificaron según se comentó en la Sección 1.4.2.

#### 2.1.1. Indicadores de Mantenimiento

Como se señaló en la Sección 1.5.2.3 en la página 19, existe una gran disponibilidad de indicadores para mantenimiento, sin embargo Kumar et al. (2013) recomienda el uso de los KPIs propuestos por la norma EN-15341 y por la SMRP. En base a esto, para

esta investigación se consideraron como fuente principal los indicadores de la norma EN-15341, esta norma presenta 71 KPIs, todos como ratios entre dos métricas o factores distintos, estas métricas fueron agrupadas y categorizadas en la Tabla B.1 del anexo B.1.1 de forma tal de identificar a grandes rasgos grupos de indicadores relacionados con mismos requerimientos de información. La norma sin embargo no contempla de forma directa algunos indicadores utilizados por las compañías como MTBF o MTTR, de tal forma que se hizo una recopilación de otras fuentes alternativas considerando aquellos indicadores no mencionados directamente por la norma, estos se presentan en la Tabla B.2. Con todo esto, se recopilaron un total de 118 métricas e indicadores que están agrupados según muestra la Tabla 2.1.

A continuación se analizarán los grupos de indicadores según su categorización para comentar los principales requerimientos de información de estos indicadores.

#### 2.1.1.1. Indicadores de Costos

Respecto a los indicadores relacionados con costos, se definen 5 indicadores o grupos de indicadores que se detallan a continuación.

**Costo de personal de mantenimiento:** Este grupo contempla los indicadores relacionados a costos de personal respecto a su contratación y formación. Dentro de los costos relacionados a personal de mantenimiento se distinguen los siguientes requerimientos:

- Costo de formación el personal.
- Tipo de personal, que puede ser interno (esto incluye personal directo e indirecto de mantenimiento) o externo.
- Tipo de mantenimiento realizado, que puede ser según el tipo de falla del equipo (eléctrico, mecánico, de la instrumentación)

**Costos de mantenimiento:** Este grupo de indicadores contempla los costos de mantenimiento generales referente a las tareas de mantenimiento y el total de costos de mantenimiento. Los costos de mantenimiento contemplan:

| <b>Grupo de Indicadores</b>        | <b>Cuenta de Indicador/(Factor)</b> |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Costos                             | 18                                  |
| Costo de personal de mantenimiento | 8                                   |
| Costos de mantenimiento            | 7                                   |
| Costos globales                    | 1                                   |
| Costos de indisponibilidad         | 1                                   |
| Costos de ineficiencia             | 1                                   |
| Equipos o procesos                 | 54                                  |
| Indicadores de tiempo              | 36                                  |
| Órdenes de trabajo                 | 6                                   |
| Número de detenciones              | 2                                   |
| Disponibilidad                     | 2                                   |
| Indicadores de sistemas            | 2                                   |
| Criticidad                         | 2                                   |
| OEE                                | 1                                   |
| Tasa de falla                      | 1                                   |
| Confiabilidad                      | 1                                   |
| Mantenibilidad                     | 1                                   |
| HSE & RRHH                         | 27                                  |
| Indicadores de personal            | 16                                  |
| Indicadores HSE                    | 11                                  |
| Datos Adicionales                  | 19                                  |
| Indicadores de producción          | 7                                   |
| Indicadores financieros            | 6                                   |
| Indicadores de calidad             | 3                                   |
| OEE                                | 2                                   |
| Nuevos Clientes                    | 1                                   |
| <b>Total general</b>               | <b>118</b>                          |

**Tabla 2.1:** Resumen de recopilación de indicadores y métricas de mantenimiento

| <b>Grupo de Indicadores</b>  | <b>Cuenta de Indicador/(Factor)</b> |
|--|-------------------------------------|
| <b>Costo de personal de mantenimiento</b>                              | <b>8</b>                            |
| Costo de formación del personal de mantenimiento                       | 1                                   |
| Costo total de la contratación   | 1                                   |
| Costo total de personal interno empleado en mantenimiento              | 1                                   |
| Costos totales de contratación del mantenimiento                       | 1                                   |
| Costos totales de contratación del mantenimiento de la instrumentación | 1                                   |
| Costos totales de contratación del mantenimiento eléctrico             | 1                                   |
| Costos totales de contratación del mantenimiento mecánico              | 1                                   |
| Costo total de personal externo empleado en mantenimiento              | 1                                   |
| <b>Costos de mantenimiento</b>   | <b>7</b>                            |
| Costo de mantenimiento preventivo                                      | 1                                   |
| Costo de paradas programadas para mantenimiento                        | 1                                   |
| Costo del mantenimiento basado en condición                            | 1                                   |
| Costo del mantenimiento de mejora                                      | 1                                   |
| Costo del mantenimiento sistemático                                    | 1                                   |
| Costo mantenimiento correctivo   | 1                                   |
| Costo total del mantenimiento  | 1                                   |
| <b>Costos globales</b>   | <b>1</b>                            |
| <b>Costos de indisponibilidad</b>                                      | <b>1</b>                            |
| <b>Costos de ineficiencia</b>  | <b>1</b>                            |

**Tabla 2.2:** Recopilación de indicadores de costos de mantenimiento

- Si la orden de trabajo fue programada o no.
- La política de mantenimiento con la cual se efectuó el mantenimiento (Ver Sección 1.5.2.2 para los 5 tipos de políticas de mantenimiento)

**Costos globales:** Los costos globales es un indicador para medir el impacto económico de alguna medida que altere las condiciones de operación de los equipos, principalmente medidas que cambien la disponibilidad de los sistemas (Stegmaier et al., 2014). Este valor se calcula según la ecuación 2.1.

$$CG = Inversión + [Ejercicio + (1 - A_s) * H * C_i] * Fa \quad (2.1)$$

Este indicador requiere definir:

- *Inversin*: La inversión realizada en la opción a evaluar.
- *Ejercicio*: (Optativo) Los costos anuales de operación
- $A_s$ : Disponibilidad del sistema, este indicador es presentado en el grupo de indicadores de “Equipos o procesos”.
- $H$ : Tiempo de operación anual, visto como parte de los indicadores de producción en ‘Datos adicionales’.
- $C_i$ : Costos de ineficiencia, explicados más adelante en esta sección.
- $Fa$ : Factor de actualización que requiere definir una tasa de retorno esperada de la inversión.

**Costos de indisponibilidad:** Los costos de indisponibilidad estiman los costos ocultos debido a la indisponibilidad del sistema, se estima como los costos de ineficiencia incurridos en la porción del tiempo total de operación en el cual el sistema estuvo no disponible (Ecuación 2.2). Los costos de indisponibilidad son parte de los costos globales mencionados previamente y sus requerimientos están contemplados dentro de los de costos globales.

$$C_{indisponibilidad} = (1 - A_s) * H * C_i \quad (2.2)$$

**Costos de ineficiencia:** Los costos de ineficiencia se estiman como las ganancias potenciales no adquiridas por unidad de tiempo no producida. Se puede calcular según la Ecuación 2.3:

$$C_i = F' - C_v \quad (2.3)$$

Donde  $F'$  es la facturación perdida y  $C_v$  son los costos variables, por lo que es necesario tener clara definición de los costos variables y la facturación potencial por unidad de tiempo.

#### 2.1.1.2. Indicadores de Equipos o procesos

Con respecto a equipos y procesos, se definieron 10 indicadores/grupo de indicadores (ver Tabla B.3) principalmente enfocados en el manejo de tiempos de operación de los equipos y de las tareas de mantenimiento. Estos grupos se detallan a continuación.

**Indicadores de tiempo:** Este grupo de indicadores contiene el 31 % de las métricas estudiadas y definen la base para el cálculo de varios otros indicadores de mantenimiento, tener un buen registro y control de los tiempos en mantenimiento es parte fundamental en el MPM y la gestión de mantenimiento. Estos indicadores contemplan los siguientes elementos:

- Tiempo destinado a la orden de trabajo de mantenimiento
- Registro de fallas según tipo de falla (eléctrica, mecánica o de instrumentación) y por ítem mantenible.
- Si la orden de trabajo fue programada o no.
- La política de mantenimiento con la cual se efectuó el mantenimiento (Ver Sección 1.5.2.2 para los 5 tipos de políticas de mantenimiento)
- Horas-hombre utilizadas en labores de mantenimiento
- Tipo de personal, (Interno directo, interno indirecto, interno de producción, externo)
- Tiempo de indisponibilidad

Los datos de fallas deben estar tomados por ítem mantenible y por modo de falla, no deben mezclarse los datos de distintos equipo ni de distintos modos de falla incluso si dos equipos son exactamente iguales, ya que las condiciones de uso afectan el comportamiento de falla de un equipo (Bloom, 2006).

De las métricas de tiempo se determinan los indicadores de tiempo más utilizados que son el MTBF (Mean Time Between Failures) y el MTTR (Mean Time To Repair), además de otros como MTTF (Mean time to Failure) o MTBM (Mean Time between Maintenance) en caso de mantenimiento preventivo.

**Órdenes de trabajo:** Los indicadores agrupados en este grupo hacen referencia a la cantidad de órdenes de trabajos de mantenimiento que cumplen ciertas características, en definitiva, estas características son:

- Si la orden de trabajo fue programada o no.
- Si efectivamente se realizó la orden de trabajo según lo programado
- Si la orden de trabajo causó tiempo de indisponibilidad

**Número de detenciones:** Se debe contar el número de detenciones a causa de fallas o programadas.

**Disponibilidad:** La disponibilidad es uno de los indicadores más importantes en mantenimiento, señala la porción del tiempo total de operación en que un equipo o sistema puede realmente operar (está disponible), este indicador se calcula normalmente como:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.4)$$

La disponibilidad se determina tanto por equipo como después a nivel de subsistema y sistema, se denota por la letra  $A$  y se entiende el concepto de indisponibilidad como  $1 - A$ .

**Indicadores de sistemas:** Con respecto a los sistemas, la norma pide identificar cuantos sistemas tienen un análisis de criticidad con respecto al total de sistemas.

**Criticidad:** La criticidad de los equipos es un indicador vital para optimizar las tareas de mantenimiento identificando los equipos críticos en términos de disponibilidad o costos. Los métodos para determinar la criticidad son discutidos en la Sección 1.5.2.3, sin embargo, en esta sección se discutirán los indicadores propuestos por [Kristjanpoller et al. \(2017\)](#), el ICO (Impacto esperado de Criticidad Operacional) y el FPD (Factor de Propagación de Fallo Esperado).

Estos indicadores son un método cuantitativo de medir el impacto que tienen los tiempos de indisponibilidad de un equipo o subsistema respecto al total de equipos o subsistemas, además de ver el impacto global en el sistema según su configuración lógica. Estos indicadores muestran una forma novedosa de abordar la definición de criticidad pero que debe ser complementada con otros métodos, para ver más detalles respecto al cálculo de estos indicadores, ver anexo A.

**OEE:** El Overall Equipment Effectiveness (OEE) es un indicador que mide la eficiencia del sistema productivo completo, está dividido en tres componentes y se calcula de según la Ecuación 2.5.

$$OEE = Disponibilidad * Rendimiento * Calidad \quad (2.5)$$

El rendimiento y la calidad son indicadores que serán explicados en el grupo de indicadores de “Datos adicionales”.

**Tasa de falla:** La tasa de falla señala la frecuencia de falla de un equipo, este indicador es propio del análisis de ciclo de vida de los equipos y puede tener una tasa creciente, decreciente o puede ser constante dependiendo de la etapa de vida del equipo. Esta tasa se puede estimar bajo ajuste de curvas o en base al MTBF como  $1/MTBF$  si es que el equipo se encuentra en plena vida útil. Es la tasa de falla el valor principal utilizado para predecir la demanda de partes de repuesto al momento de gestionar sus inventarios ([Cavalieri y Garetti, 2008](#)).

**Confiabilidad:** La confiabilidad es una función de distribución de la probabilidad de que un equipo funcione de forma continua sin fallas durante un periodo de tiempo  $t$ . Este valor

se puede estimar como el ajuste a una función de distribución Weibull de los datos de las fallas por equipo y por modo de falla.

**Mantenibilidad:** La mantenibilidad es una función de distribución de la probabilidad del tiempo que tarda en realizarse una labor de mantenimiento, así como la confiabilidad, debe ser por equipo y por modo de falla.

### 2.1.1.3. Indicadores de HSE y R.R.H.H.

Este grupo contempla indicadores relacionados con salud, seguridad y medioambiente además de indicadores relacionados con recursos, estos indicadores están agrupados en dos grandes grupos, los relacionados con el personal de mantenimiento y los relacionados con HSE (ver Tabla 2.3).

**Indicadores de personal:** Las métricas de personal pueden considerar los siguientes elementos.

- Tipo de personal (Interno directo, interno indirecto, interno de producción, externo).
- Número de actividades distintas en las que participa
- Si tiene manejo de sistemas informáticos
- Horas contratadas
- Turnos de trabajo
- Horas de capacitación u otra medida de entrenamiento para mejora de habilidades
- Registro de las ideas generadas por el personal de mantenimiento

**Indicadores HSE:** Estos indicadores están destinados a medir el impacto del mantenimiento en la salud y seguridad de los empleados además de medir el impacto en el medio ambiente. Estos indicadores contemplan:

- Consecuencias de las fallas, si estas generaron daños al medio ambiente, lesiones o riesgo de lesiones.

| <b>Grupo de Indicadores</b>  | <b>Cuenta de Indicador/(Factor)</b> |
|--|-------------------------------------|
| <b>Indicadores de personal</b>   | <b>16</b>                           |
| Efectivo de personal directo de mantenimiento  | 1                                   |
| Efectivo de personal indirecto de mantenimiento                                      | 1                                   |
| Efectivo de personal interno de mantenimiento  | 1                                   |
| Efectivo de personal interno de mantenimiento con varias actividades                 | 1                                   |
| Efectivo de personal interno directo de mantenimiento                                | 1                                   |
| Efectivo de personal interno directo de mantenimiento que usa programas informáticos | 1                                   |
| Efectivo del personal de mantenimiento   | 1                                   |
| Efectivo total de empleados internos   | 1                                   |
| Horas-hombre totales de mantenimiento disponibles                                    | 1                                   |
| Número de horas-hombre para formación del personal interno de mantenimiento          | 1                                   |
| Personal directo de mantenimiento que trabaja por turnos                             | 1                                   |
| Generación de nuevas ideas   | 1                                   |
| Entrenamiento para mejorar habilidades   | 1                                   |
| Cambio % de empleados  | 1                                   |
| Retención de empleados   | 1                                   |
| Reclamos de empleados  | 1                                   |
| <b>Indicadores HSE</b>   | <b>11</b>                           |
| Horas-hombre perdidas por lesiones del personal de mantenimiento                     | 1                                   |
| Número de fallos que causan daño al medio ambiente                                   | 1                                   |
| Número de fallos que causan lesiones al personal                                     | 1                                   |
| Número de fallos que pueden causar lesiones al personal                              | 1                                   |
| Número de lesiones del personal de mantenimiento                                     | 1                                   |
| Número de lesiones del personal debidas al mantenimiento                             | 1                                   |
| Volumen anual de residuos o de efectos nocivos relacionados con el mantenimiento     | 1                                   |
| Número de accidentes   | 1                                   |
| Número de casos legales  | 1                                   |
| Compensaciones pagadas   | 1                                   |
| Reclamos HSE   | 1                                   |

**Tabla 2.3:** Recopilación de indicadores de HSE y R.R.H.H de mantenimiento

- Número de lesiones y cuantas de estas se generaron debido a labores de mantenimiento
- Volumen de residuos con efectos nocivos relacionados con mantenimiento
- Monto utilizado en pago de compensaciones
- Registro de reclamos por HSE

#### 2.1.1.4. Datos adicionales

| Grupo de Indicadores                                | Cuenta de Indicador/(Factor) |
|---|------------------------------|
| <b>Indicadores de producción</b>                    | <b>7</b>                     |
| Cantidad producida                                  | 1                            |
| Costo de transformación de la producción            | 1                            |
| Energía total utilizada                             | 1                            |
| Horas-hombre totales de los operarios de producción | 1                            |
| Production rate                                     | 1                            |
| Tiempo requerido                                    | 1                            |
| Valor añadido más costos externos de mantenimiento  | 1                            |
| <b>Indicadores financieros</b>                      | <b>6</b>                     |
| Valor de sustitución de los activos (ARV)           | 1                            |
| ROI   | 1                            |
| ROA   | 1                            |
| VAN   | 1                            |
| Cambio % de ventas                                  | 1                            |
| Cambio % de activos                                 | 1                            |
| <b>Indicadores de calidad</b>                       | <b>3</b>                     |
| Número de reclamos por calidad                      | 1                            |
| Retornos por calidad                                | 1                            |
| Satisfacción del cliente                            | 1                            |
| <b>OEE</b>  | <b>2</b>                     |
| Calidad   | 1                            |
| Desempeño   | 1                            |
| <b>Nuevos Clientes</b>                              | <b>1</b>                     |

**Tabla 2.4:** Recopilación de datos adicionales para KPIs de mantenimiento

Como ya se señaló en la Sección 2.1.1.2, el OEE es un indicador que mide la eficiencia global de los sistemas, Vorne presenta todo lo que se necesita saber sobre este indicador

en un sitio web completamente destinado a éste<sup>4</sup>. Su cálculo es según la Ecuación 2.5. Para calcular el OEE es necesario determinar además de la disponibilidad del sistema, el rendimiento y la calidad.

El rendimiento toma en consideración todo aquello que ralentiza el proceso de manufactura, se mide como el tiempo ideal de manufactura dividido el tiempo total de operación. Se calcula según la Ecuación 2.6.

$$\text{Rendimiento} = (\text{TiempoCicloIdeal} * \text{TotalPartesProducidas}) / \text{TiempoDeOperación} \quad (2.6)$$

La calidad es un indicador que toma en cuenta cuantas unidades no lograron cumplir con los requisitos para su comercialización. Se calcula como:

$$\text{Calidad} = \text{ProductosBuenos} / \text{TotalProductos} \quad (2.7)$$

### 2.1.2. Indicadores de Inventario de Repuestos

La recopilación de indicadores de inventario de repuestos, a diferencia de los de mantenimiento, se realizó en base a distintos documentos, la base principal de la recopilación de indicadores fue sobre tres trabajos fundamentalmente, primero sobre [Martin \(2010\)](#), que hizo una recopilación y estudio de los KPIs de inventarios en general, de estos se seleccionaron los relevantes a inventario de repuestos, por otro lado, [DeWald \(2011\)](#) señaló un grupo de 24 indicadores especiales para inventario de partes de repuesto, y por último [Chemweno et al. \(2015\)](#), que presenta un esquema de evaluación de una estrategia de inventario de repuesto agregando dentro de su análisis elementos como la posibilidad de repetir tareas de mantenimiento debido a fallas en los repuestos, la reparación de repuestos o el manejo de inventario en varios niveles conocido en inglés como “Multi-Echelon Inventory Optimization”. La recopilación de todos los indicadores de inventario se presenta en la Tabla B.4 en Anexos. En total, se consideraron un total de 40 indicadores y métricas de inventario de repuestos resumidas en la Tabla 2.5.

A continuación se detallan los indicadores según su grupo de clasificación y se identi-

---

<sup>4</sup><http://www.oee.com/index.html>

carán a grandes rasgos sus requerimientos de información.

| <b>Grupo de Indicadores</b>                  | <b>Cuenta de Indicador</b> |
|--|----------------------------|
| Costos                                       | 8                          |
| Costos de logística                          | 3                          |
| Holding cost                                 | 2                          |
| Costo partes de repuesto                     | 1                          |
| Compras de Emergencia                        | 1                          |
| Stock-out cost                               | 1                          |
| Equipos o procesos                           | 30                         |
| Servicio de partes de repuesto               | 12                         |
| Rotación de inventario de partes de repuesto | 8                          |
| Eficiencia partes de respuesto               | 2                          |
| Características partes de repuesto           | 2                          |
| Lead time                                    | 2                          |
| Facturas de materiales para equipos          | 1                          |
| Demanda de partes de repuesto                | 1                          |
| Nivel de servicio                            | 1                          |
| Calidad proveedor                            | 1                          |
| Datos adicionales                            | 3                          |
| Costos de incentivos y subsidios             | 1                          |
| Costos de producción                         | 1                          |
| <b>Total general</b>                         | <b>40</b>                  |

**Tabla 2.5:** Resumen de recopilación de indicadores y métricas de inventario de repuestos

### 2.1.2.1. Indicadores de Costos

Los indicadores de costos contemplan principalmente conceptos de logística, de estos indicadores, el holding cost y stock-out cost son utilizados para tomar decisiones sobre la política de inventario. A continuación se detallan los indicadores relacionados con costos

| <b>Grupo de Indicadores</b>     | <b>Cuenta de Indicador</b> |
|---------------------------------|----------------------------|
| <b>Costos de logística</b>      | <b>3</b>                   |
| Costo de distribución           | 1                          |
| Costo de transporte             | 1                          |
| Costo total de logística        | 1                          |
| <b> Holding cost</b>            | <b>2</b>                   |
| Holding cost                    | 1                          |
| Costo de obsolescencia          | 1                          |
| <b>Costo partes de repuesto</b> | <b>1</b>                   |
| <b>Compras de emergencia</b>    | <b>1</b>                   |
| <b>Stock-out cost</b>           | <b>1</b>                   |

**Tabla 2.6:** Recopilación de indicadores de costos de inventario de repuestos

de inventario de repuestos recopilados.

**Costos de logística:** Los costos de logística consideran:

- Costo de ordenar
- Costo de adquisición
- Costos de envío
- Costos de administración
- Costo de manejo de inventario

**Holding cost:** El Holding Cost contempla todos los costos asociados a mantener inventario en bodega, es de vital importancia porque es necesario para definir las políticas de inventario. Dentro de componentes de este costo se contempla:

- Costo de capital
- Seguros
- Pérdidas por robo
- Deterioro y obsolescencia
- Arriendo y/o mantención de bodega

**Costo partes de repuesto:** Costo de adquisición de partes de repuestos.

**Compras de emergencia:** Los costos de emergencia son aquellos incurridos cuando se hacen compra de repuestos de emergencia, en caso de que no estuvieran disponibles en inventario cuando se necesitaron para labores de mantenimiento críticas.

**Stock-out cost:** El costo de Stock-out es el costo en que se incurre cuando hay un desabastecimiento, en términos de repuestos, cuando ocurre un stock-out, la consecuencia directa es un retraso logístico en la ejecución de la orden de trabajo que genera costos asociados por ejemplo con:

- La gestión de la orden de compra.
- Costos extras para envío de emergencia
- Costos de indisponibilidad por retraso en la reparación (por gestión de la orden de compra y por el tiempo de entrega)

Este indicador se puede utilizar además para definir la política de inventario, manejando el equilibrio entre holding cost y stock-out cost de tal forma de definir un nivel de servicio que minimice los costos de inventario.

#### 2.1.2.2. Indicadores de Equipos o procesos

Esta sección abarca la mayoría de los indicadores de inventario de repuestos, se identificaron 9 categorías que agrupan un total de 29 indicadores (Ver Tabla 2.7). Estos grupos de indicadores se detallan a continuación.

**Servicio de partes de repuesto:** Este grupo de indicadores miden la calidad y efectividad del servicio de inventario de repuestos desde varios aspectos, dentro de su control se consideran los siguientes aspectos:

- El estado de la orden, viendo el estado de entrega por SKU encargado por orden.
- Fecha comprometida y fecha real de entrega.

| <b>Grupo de Indicadores</b>  | <b>Cuenta de Indicador</b> |
|--|----------------------------|
| <b>Servicio de partes de repuesto</b>                                    | <b>12</b>                  |
| Order fill rate  | 1                          |
| SKU fill rate  | 1                          |
| Número de piezas de repuesto suministradas por el almacén según petición | 1                          |
| Porcentaje de entregas a tiempo  | 1                          |
| Efectividad de ruta de entrega   | 1                          |
| Retraso promedio de órdenes  | 1                          |
| Número de stock outs   | 1                          |
| Número de backorders   | 1                          |
| Errores de envío   | 1                          |
| Precisión de entrada de órdenes  | 1                          |
| Órdenes perfectas  | 1                          |
| Precisión de Inventario  | 1                          |
| <b>Rotación de inventario de partes de repuesto</b>                      | <b>8</b>                   |
| Valor medio de inventario de los artículos de mantenimiento              | 1                          |
| Rotación de inventarios  | 1                          |
| Valoración total de inventario   | 1                          |
| Inventario obsoleto  | 1                          |
| Flujo de inventario  | 1                          |
| Capacidad de Bodega Utilizada  | 1                          |
| Total de dólares usados  | 1                          |
| Slow Moving Parts  | 1                          |
| <b>Lead time</b>   | <b>2</b>                   |
| Supplier lead-time   | 1                          |
| Order lead-time  | 1                          |
| <b>Eficiencia partes de respuesto</b>                                    | <b>2</b>                   |
| Eficiencia de reacondicionamiento de componentes                         | 1                          |
| Proceso imperfecto de reparación   | 1                          |
| <b>Características partes de repuesto</b>                                | <b>2</b>                   |
| Clasificación de partes de repuestos                                     | 1                          |
| Criticidad   | 1                          |
| <b>Nivel de servicio</b>   | <b>1</b>                   |
| <b>Facturas de materiales para equipos</b>                               | <b>1</b>                   |
| <b>Calidad proveedor</b>   | <b>1</b>                   |
| <b>Demanda de partes de repuesto</b>                                     | <b>1</b>                   |

**Tabla 2.7:** Recopilación de indicadores de equipos o procesos de inventario de repuestos

- Número de stock-outs y backorders
- Constancia de errores en los envíos
- Evaluación de la precisión en el registro de órdenes y en el registro de inventario.

**Rotación de inventario de partes de repuesto:** Los indicadores de rotación de inventario indican el comportamiento del flujo de inventarios de repuesto en tanto a su movimiento, nivel de inventario, valor y obsolescencia, estos indicadores contemplan:

- Unidades en inventario.
- Valor de las unidades en inventario
- Clasificación de la velocidad de los inventarios.
- Estado de obsolescencia de los repuestos en inventario.

**Lead time:** El lead time señala el tiempo que se tarda en recibir una compra de inventario desde el momento de empezar con la orden de compra, esto incluye el tiempo administrativo asociado a generar la orden de compra, y el tiempo en que el proveedor tarda en entregarla. Este indicador es de vital importancia para determinar la política de inventario.

**Eficiencia de partes de repuesto:** La eficiencia de las partes de repuesto indica que tan bien responden a las necesidades de mantenimiento, este grupo de indicadores contempla la eficiencia primero con la eficiencia en el reacondicionamiento de los repuestos, es decir, que tan confiables son después de reacondicionarlos, y también se contempla la eficiencia en el proceso de mantenimiento, si es que los repuestos efectivamente sirvieron para reparar el equipo en mal estado o no.

**Características de partes de repuesto:** Este grupo de indicadores señalan criterios para categorizar los repuestos en distintos grupos según sus características y su criticidad, estos indicadores contemplan información sobre:

- Nivel de consumo de repuestos (Continuo o esporádico).

- Calidad y precisión del pronóstico de demanda de repuestos
- Costos de repuestos.
- Disponibilidad de los proveedores.
- Configuración lógica de equipos
- Disponibilidad de los equipos, subsistemas y sistemas.
- Indicadores técnicos de los equipos como MTBF y MTTR.

Las formas de medir la criticidad de los equipos y por consecuencia sus repuestos, es expuesta en la Sección [1.5.2.3](#).

**Nivel de servicio:** El nivel de servicio es la probabilidad de con llegar a stock-out, o el porcentaje del tiempo en que hay inventario disponible. El nivel de servicio es el resultado de un trade-off entre Holding cost y Stock-out cost, así, si se decide tener un mayor nivel de inventario, aumentaría el nivel de servicio y bajarían los costos por falta de stock, pero conllevados por mayores costes de almacenamiento. Este indicador debe además ser una decisión para el planteamiento de la política de inventario de repuestos.

**Facturas de materiales para equipos:** Este es un indicador propuesto por [DeWald \(2011\)](#) para medir el número de equipos enterados versus el total, con el fin de controlar la facturación especialmente de equipos críticos o de alto costo.

**Calidad proveedor:** La calidad de los proveedores se mide según el número de repuestos que ha sido necesario devolver de una orden de compra por no cumplir los requerimientos de calidad exigidos al proveedor. Se lleva constancia de este número de devoluciones.

**Demanda de partes de repuesto:** La demanda de partes de repuesto proviene de la planificación de la política de mantenimiento, dependiendo del tipo de política se definen distintos tipos de demanda a las partes de repuesto, más información sobre la determinación de la demanda de partes de repuesto se detalló en la Sección [1.5.3.2](#).

**2.1.2.3. Datos adicionales**

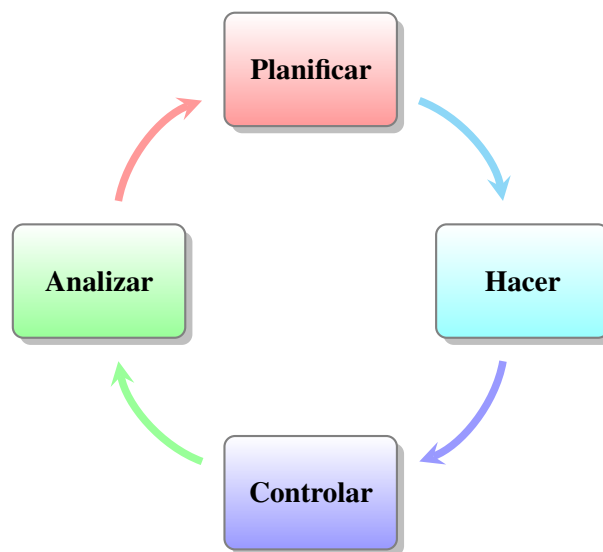
| <b>Grupo de Indicadores</b>             | <b>Cuenta de Indicador</b> |
|---|----------------------------|
| <b>Costos de incentivos y subsidios</b> | <b>1</b>                   |
| <b>Costos de producción</b>             | <b>1</b>                   |

**Tabla 2.8:** Recopilación de datos adicionales de inventario de repuestos

En datos adicionales se identificaron dos indicadores, primero que nada, los costos de producción, que son partes de los indicadores de producción en datos adicionales para mantenimiento, y el registro de los costos asociados a impuestos y subsidios varios.

## 2.2. Diagrama de Proceso de Mantenimiento

Esta sección busca diagramar el proceso de gestión conjunta de mantenimiento e inventario de repuestos bajo el concepto del ciclo PDCA como el utilizado en la Sección 1.5.2, esto enfocado desde la perspectiva de la medición de desempeño y la utilización de los indicadores. Se utilizó la nomenclatura de BPMN para explicar la interacción de los indicadores en cada una de las etapas del ciclo exceptuando la etapa de “Hacer” debido a que esta etapa es de carácter más operativo y no requiere de una diagramación detallada.



**Figura 2.1:** Ciclo PDCA (Elaboración propia)

El proceso de gestión es un proceso cíclico dividido en 4 etapas (Ver Figura 2.1), una etapa de planificación donde se definen los objetivos y políticas de mantenimiento e inventario, una etapa de ejecución, donde se ejecutan las políticas según lo planificado y se recopilan datos para realizar el seguimiento y control del proceso, después una etapa de control donde se calculan los KPIs de ambas áreas y finalmente una etapa de análisis donde se estudian los resultados de los KPIs y otros tipos de análisis y benchmarking para prepararse para la nueva etapa de planificación con un enfoque de mejora continua. A continuación se presentarán diagramas BPMN de los procesos propios de cada etapa del ciclo y se comentarán las actividades comunes de cada etapa siguiendo la pauta de [Lin y Ghodrati \(2011\)](#).

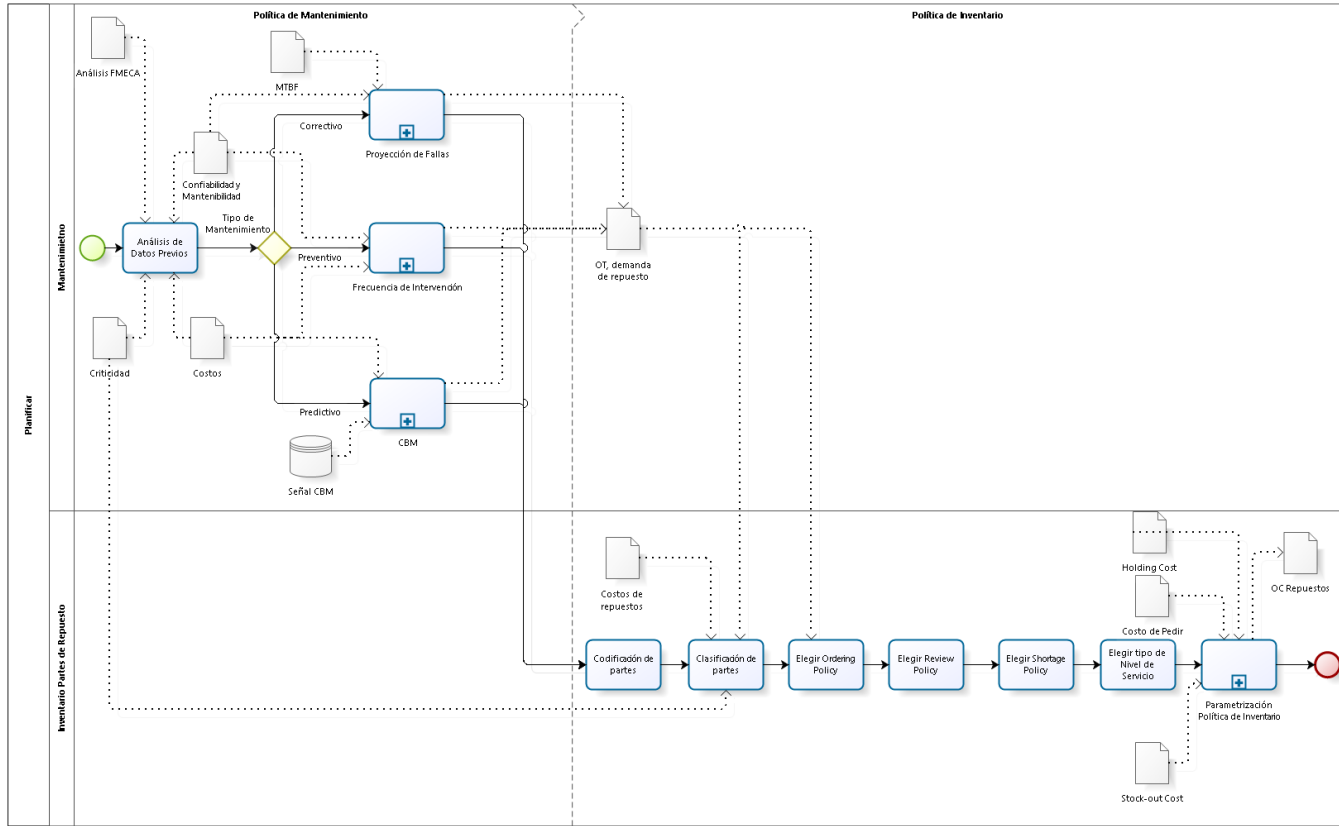
## **2.2.1. Etapa Planificar**

### **2.2.1.1. Descripción general de la etapa Planificar**

La etapa de planificación es la primera del ciclo, en esta etapa se definen las pautas que se seguirán a lo largo del proceso a nivel estratégico, táctico y operativo, desde el punto de vista de mantenimiento, primero se definen cuáles son las metas del departamento, las que deben estar alineadas con las metas de la compañía, luego se estudia y se configura la base de datos de los activos, viendo varios aspectos como criticidad, análisis de ciclo de vida, clasificación según costos, etc. y en esta etapa se define la política de mantenimiento a utilizar.

Desde la perspectiva de la gestión de inventario de repuestos, las actividades de esta etapa son básicamente las mismas, definir las metas de la gestión de inventarios, configurar la base de datos con la que se trabajará, incluyendo la clasificación de los repuestos según criticidad y otros aspectos, y la definición de la política de inventario.

2.2.1.2. Diagrama BPMN de la etapa Planificar



Powered by bizagi Modeler

Figura 2.2: Diagrama BPMN de etapa de Planificación en ciclo PDCA (Elaboración propia)

### 2.2.1.3. Descripción del diagrama

Esta etapa comienza con una actividad de análisis de datos previos, esta etapa considera todos los resultados de la etapa anterior de Análisis, capturando la información sobre criticidad, costos de mantenimiento y el análisis de ciclo de vida que contempla la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos. Esta información es analizada para determinar los criterios para definir las nuevas metas de mantenimiento y posteriormente, definir las políticas de mantenimiento a realizar para cada uno de los equipos. El enfoque utilizado en este caso es en base a un modelo RCM, en caso de no contar con data histórica suficiente, se puede incorporar un análisis del tipo FMECA para suplementar las necesidades de información en la definición de metas y políticas de mantenimiento e inventario de repuestos.

Luego del análisis de la información disponible, sigue la decisión de la política de mantenimiento. En este caso, se consideraron tres políticas de mantenimiento: correctiva, preventiva y predictiva, cada una con requerimientos de información distintos. Como resultado de la definición de la política se constará con una planificación de las órdenes de trabajo y por tanto de la demanda de las partes de repuestos.

Tras la definición de la política de mantenimiento, continúa la definición de la política de inventario, partiendo por la codificación de las partes de repuesto para llevar su control en un ERP o similar, seguido por la clasificación de los repuestos. La clasificación de los repuestos contempla una categorización según su criticidad, costos, patrón de demanda y otros, que servirán de criterio para definir qué tipo de política de inventario utilizar para cada tipo de repuestos.

Una vez definida la clasificación se continúa con la selección de la política de mantenimiento, que contempla la elección del ordering policy, review policy, shortage policy y service level policy. Una vez definidos esta política, se deberá parametrizar la política en sí, lo que significa definir el cuándo y cuánto ordenar que se reflejará en puntos de reabastecimiento, intervalos de tiempo de inspección u otros valores según el tipo de política escogida. Como resultado de esta planificación se tendrán programadas las órdenes de compra de partes de repuestos.

## **2.2.2. Etapa Hacer**

### **2.2.2.1. Descripción general de la etapa Hacer**

La etapa de Hacer es donde se ejecutan todas las órdenes de trabajo y compra planificadas y no planificadas, en esta etapa se sigue la planeación realizada en la etapa anterior y se recopilan datos para llevar el control de los procesos del mantenimiento e inventario de repuestos a través de las órdenes de compra.

## **2.2.3. Etapa Controlar**

### **2.2.3.1. Descripción general de la etapa Controlar**

Esta etapa consiste básicamente en la determinación de los KPIs de mantenimiento y de repuestos. Desde el punto de vista de mantenimiento, estos KPIs contemplan elementos de confiabilidad, disponibilidad, ejecución de órdenes de trabajo junto con su planificación, mejora, brecha entre lo planificado y lo ejecutado y sobre recursos de mantenimiento,

Por el lado de inventario de repuestos, se contemplan KPIs para da confiabilidad de los repuestos, evaluación de proveedores, proceso de negocio de inventario de repuestos entre otros.

### 2.2.3.2. Diagrama BPMN de la etapa Controlar

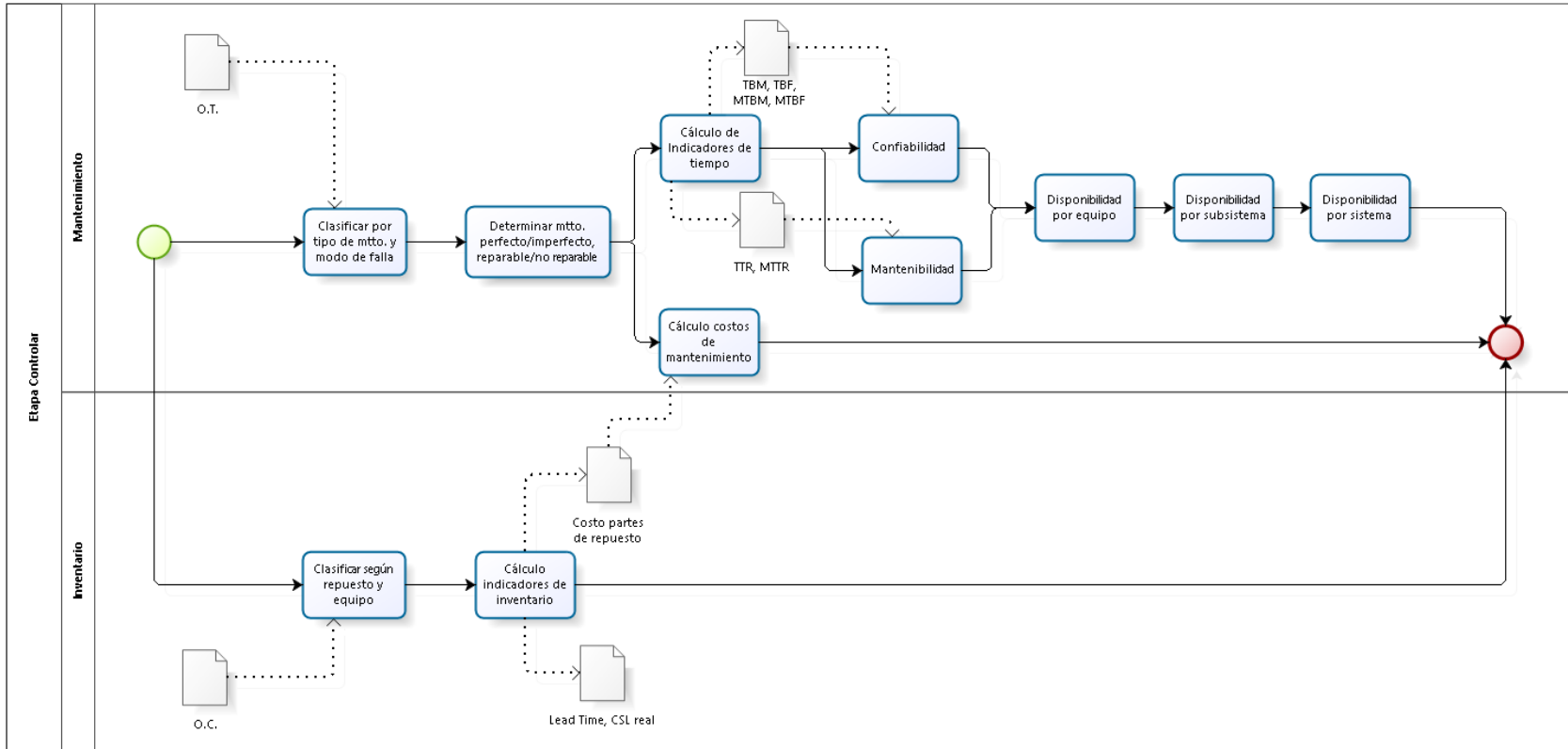


Figura 2.3: Diagrama BPMN de etapa de Control en ciclo PDCA (Elaboración propia)

### 2.2.3.3. Descripción del diagrama

El proceso comienza en paralelo para mantenimiento y para inventario de repuestos, desde el lado de mantenimiento, se recopilan los datos adquiridos en las órdenes de trabajo para procesarlos en información relevante, se comienza con clasificar los mantenimientos de cada equipo por modo de falla, así el análisis a continuación se hará por modo de falla para cada equipo en particular. Se continúa con la identificación de los tipos de mantenimiento, si estos fueron perfectos o imperfectos y si las partes son reparables o no, cada uno de estos elementos tendrán análisis distintos después, especialmente al momento de definir políticas de mantenimiento y de inventario de repuestos.

Tras la clasificación el proceso continúa con la definición de los dos grupos esenciales de KPIs para mantenimiento, estos son los indicadores de tiempo y los de costos. De los indicadores de tiempo se definen la confiabilidad y mantenibilidad, como ya mencionada, según equipo y según tipo de falla. Ya tras haber definidos la confiabilidad y mantenibilidad se procede con la determinación de la disponibilidad, partiendo por la de los equipos, luego la de los subsistemas según su configuración lógica, y finalmente la de los sistemas.

Desde la perspectiva de inventario de repuestos, se utilizan los datos recopilados a través de las órdenes de compra, de aquí, se limpia la base de datos y se clasifican los resultados según repuestos y equipos. Tras tener la información organizada, se comienzan a determinar los indicadores de repuestos, según la clasificación anterior. Cabe señalar que los costos de partes de repuestos afectan los KPIs de costos de mantenimiento por lo que es necesario definirlos antes de evaluar los KPIs de costos de mantenimiento.

## 2.2.4. Etapa Analizar

### 2.2.4.1. Descripción general de la etapa Analizar

La etapa final en el ciclo PDCA es la etapa de analizar, esta etapa se caracteriza con todo el análisis profundo a partir del feedback de los KPIs de la etapa de control, orientado a definir las bases para la toma de decisiones en la etapa de planeación.

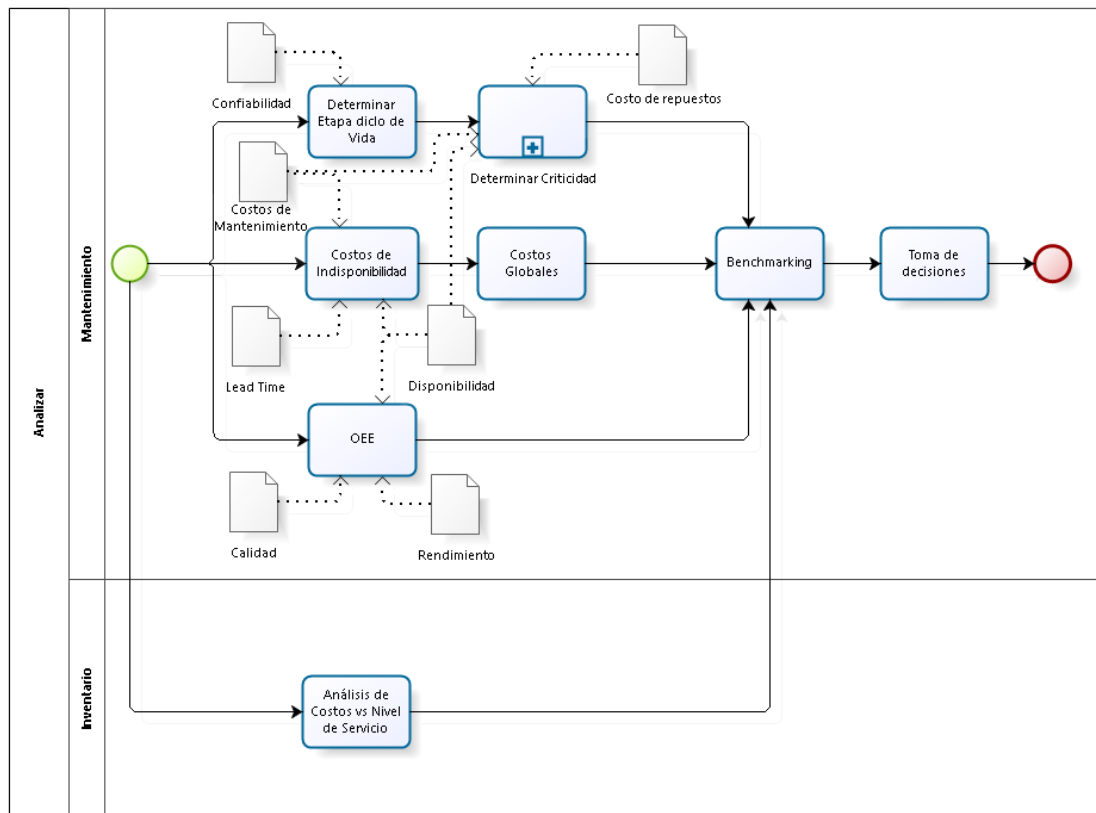
Esta etapa contempla análisis profundos del comportamiento de los activos y de los procesos, esto incluye el análisis de criticidad de los equipos, análisis de ciclo de vida,

determinación de indicadores globales como OEE o los costos de indisponibilidad.

Por el lado de inventario de repuestos, se contempla evaluar la política en términos del nivel de servicio y los costos asociados a la política escogida.

Finalmente se pasa por un proceso de benchmarking para evaluar la situación actual de la compañía en términos de mantenimiento e inventario de repuestos y finalmente preparar la toma de decisiones que definirán la pauta para la planificación del próximo ciclo.

**2.2.4.2. Diagrama BPMN de la etapa Analizar**



**Figura 2.4:** Diagrama BPMN de etapa de Análisis en ciclo PDCA (Elaboración propia)

### 2.2.4.3. Descripción del diagrama

El proceso desde la perspectiva de mantenimiento se divide en tres ejes paralelos, el primero en base al análisis de los equipos en términos ciclo de vida y criticidad. Se comienza con la definición de la etapa de vida de los equipos en base a los resultados de confiabilidad, y luego, considerando datos de disponibilidad, costos de mantenimiento y de repuestos, se define la criticidad de los equipos.

Por otro lado se ven los costos globales de mantenimiento, como forma de evaluar el impacto económico de la indisponibilidad de los sistemas. Se comienza con la determinación de los costos de indisponibilidad, que están vinculados con la disponibilidad de los sistemas y costos de ineficiencia asociados con producción e incrementados por los casos de falta de repuestos en inventario. Luego los costos globales se utilizan como herramienta para evaluar económicamente los costos de indisponibilidad como flujos de costos traídos a valor presente.

Por último en mantenimiento, se evalúa la eficiencia global de los equipos en base al OEE, que incorpora los indicadores de disponibilidad, calidad y rendimiento, estos resultados son comparados con la industria y evaluados para la toma de decisiones.

Para la gestión de inventario de repuestos, esta etapa se centra en evaluar los resultados de los costos de inventarios, si es que fueron eficientes o elevados. Además se evalúa el desempeño de los inventarios de repuestos a través del nivel de servicio, verificando si se está logrando el nivel de servicio planificado y si éste es realmente el nivel de servicio óptimo y no uno que perjudique los costos debido a un desbalance entre holding cost y stock-out cost.

## 2.3. Organización de la información

Esta sección busca proponer un modelo para estructurar la información de mantenimiento y partes de repuesto en base a los requerimientos de información encontrados durante la investigación. Para esto se propone un diagrama UML de clases que relaciona las distintas clases de objetos asociados a mantenimiento e inventario de repuestos, debido a que los requerimientos de información dependerán de la selección de KPIs según las necesidades de la empresa, no se detallan los atributos y métodos de las distintas clases.

Como base de la recopilación de data se definen las clases de órdenes de trabajo (O.T.) y órdenes de compra (O.C.), estas clases definirán la entrada principal de la información al sistema ya que contemplan datos y se relacionan estrechamente con las otras clases de mantenimiento e inventario de repuestos. Como se señaló en la sección 2.2, la O.T. y la O.C. se comienzan a definir en la etapa de planificación y son utilizadas y actualizadas en la etapa de ejecución. Como son la fuente principal de información para la gestión y evaluación de rendimiento de mantenimiento e inventario de repuestos es necesario ser especialmente rigurosos en definir con claridad estas clases y los métodos con que se recopilaran los datos relacionados a estas órdenes dentro del proceso de negocio de tal forma de asegurar que los datos sean recopilados con exactitud y sin falta. Estas clases se detallan con mayor detalle a continuación.

### 2.3.1. Orden de Trabajo

Una orden de trabajo de mantenimiento señala las características de una intervención realizada a un equipo según se haya definido en la política de mantenimiento o en caso de una falla, siendo una de las principales fuentes de información, la definición de esta clase requiere especial atención. Esta clase debe incluir los siguientes atributos.

- *Tipo de Mantenimiento*: Definir si el mantenimiento fue preventivo, correctivo, CBM o algún otro según se defina.
- *Fecha de Inicio y Término*: Definir las fechas de inicio y término de la orden, también se puede hacer la distinción de la fecha de downtime, uptime y de comienzo de la

ejecución de la orden de trabajo tras todos los preparativos como la llegada de los repuestos.

- *Equipo*: Identificación del equipo intervenido.
- *Personal Asignado*: Identificación del personal que participó en la reparación.
- *Tipo de falla*: Identificación del tipo de falla del equipo, que puede ser categorizada en eléctrica, mecánica y de la instrumentación.
- *Repuesto*: Identificación del repuesto utilizado y su costo.

Además se pueden considerar otras características como:

- *Perfección de la reparación*: Definir si la reparación fue perfecta o imperfecta.
- *Lesiones de personal*: Registro de lesiones asociadas a la falla del equipo o a la tarea de mantenimiento.
- *Daños al medioambiente*: Registro de los daños que generó la tarea de mantenimiento al medioambiente.
- *Número de intentos*: Número de iteraciones del trabajo de mantenimiento hasta lograr terminarlo con éxito.

### 2.3.2. Orden de Compra

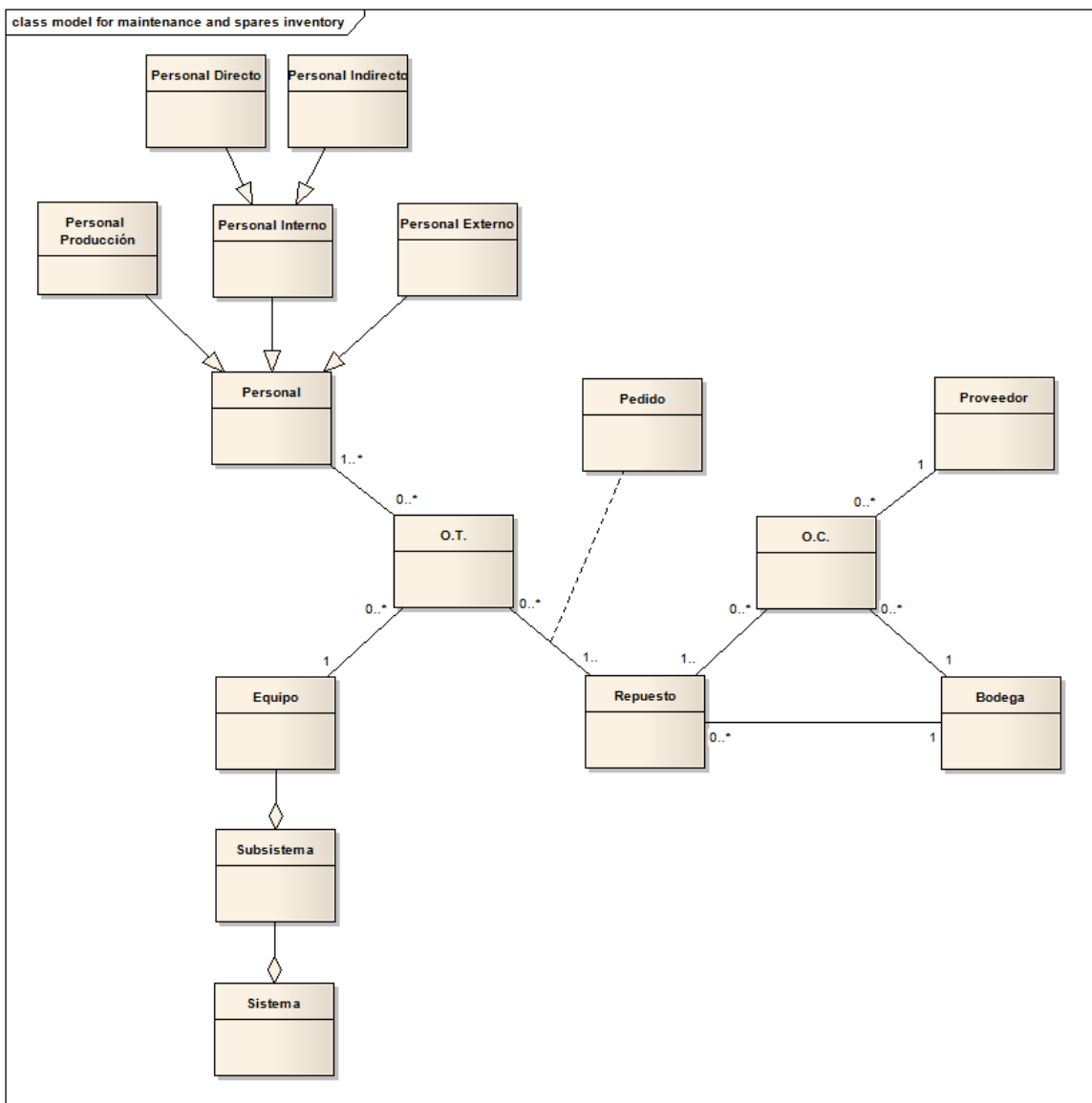
Una orden de compra de repuestos se genera al momento de hacer un pedido de partes de repuestos, estas órdenes se generan según los requerimientos de repuestos definidos por la política de inventario o ante requerimiento de reparaciones no programadas. Esta clase debe contemplar los siguientes atributos.

- *Repuesto*: Identificación de el/los repuestos pedidos.
- *Cantidad*: Cantidad de unidades del repuesto a pedir.
- *Equipo*: El equipo al que está asociado el repuesto.

- *Costo*: Costo del repuestos.
- *Fecha Pedido*: Fecha en que se realizó el pedido.
- *Fecha Entrega*: Fecha en que se recibe la orden.

Además se puede considerar otro tipo de información según los indicadores que se decidan utilizar.

### 2.3.3. Propuesta de diagrama de clase



**Figura 2.5:** Diagrama de clase para objetos de información de mantenimiento e inventario de repuestos

### 2.3.4. Descripción del diagrama

El diagrama de clase propuesto contempla 8 clases esenciales centradas en las O.T. y O.C, se identifican las clases de personal, Equipo, Repuestos, Bodega, Proveedor y Pedido. En particular, la clase de personal tiene herencia para los distintos tipos de personal vinculados con mantenimiento y la clase equipo tiene una relación de pertenencia con los

subsistemas y a su vez estos con los sistemas.

Este diagrama es sólo una sugerencia y debe ser adaptado a los procesos de negocio de la empresa, según los indicadores escogidos para mantenimiento e inventario de repuestos.

## 2.4. Análisis de pautas para la gestión de la información de mantenimiento e inventarios de repuestos

Esta sección tiene por objetivo analizar los resultados de la investigación y recomendar las pautas para la gestión de la información de mantenimiento e inventario de repuestos. Primero que nada, hay que recordar que el objetivo de esta investigación es definir los requerimientos de información para la medición de desempeño de mantenimiento (MPM) y de inventario de repuestos, de tal forma que el primer paso es definir cuáles son los objetivos del PM (*Performance Measurement*). Objetivos que deben estar alineados con las metas de la compañía.

Una vez definidas las metas de mantenimiento e inventario de repuestos, se realiza la selección de los KPIs que se necesitarán para llevar el control y gestión de ambas áreas de forma de cumplir las metas. Si bien este estudio presenta más de 100 indicadores de mantenimiento y 40 indicadores de inventario de repuestos, [Kumar et al. \(2013\)](#) señala que idealmente se deben seleccionar alrededor de 6 KPIs por cada nivel administrativo, ya que un gerente es capaz de manejar entre 4 a 8 indicadores con normalidad, más indicadores sólo causarían exceso de información.

Dentro de los indicadores presentados, se recomienda siempre considerar los siguientes:

- Mantenimiento:
  - OEE
  - Disponibilidad
  - Confiabilidad y Mantenibilidad
  - Costos de mantenimiento
  - Costos de personal de mantenimiento
  - Criticidad, ICO y FPD
  - Costos de ineficiencia
  - MTBF y MTTR

- Inventario de repuestos:
  - Costo de partes de repuestos
  - Rotación de inventario de partes de repuesto
  - Holding Cost
  - Stock-out Cost
  - Lead time
  - Nivel de servicio
  - Demanda de partes de repuesto

Con los KPIs ya seleccionados, es necesario definir cuáles son sus requerimientos de información, la Sección 2.1, presenta los indicadores y métricas estudiadas con una referencia a sus requerimientos de información.

Con los requerimientos de información definidos, se deben definir los métodos de recopilación de datos, a nivel de sistemas de información y al nivel de procesos de negocio, la cultura organizacional y la capacitación de empleados juega un papel importante en este tema ya que de nada sirve definir métodos y procesos que no se van a seguir o cumplir dentro de la organización (Cuadra, 2012). La calidad de la información y en definitiva, la calidad de los KPIs dependerán de definir correctamente estos métodos, es necesario además tener especial cuidado con la organización de la información y no mezclar datos de distintos equipos y distintos modos de falla.

La organización de la información dentro de los sistemas de información dependerá de los procesos de negocio de la compañía, los requerimientos de información definidos y el sistema de información utilizado, de todas formas, la Sección 2.3 propone una estructura básica en un diagrama UML de clases para organizar la información. Por último, la Sección 2.2 presenta el proceso completo de gestión de mantenimiento e inventario como diagrama BPMN, siguiendo este proceso se puede lograr una gestión conjunta de mantenimiento e inventario de repuestos basado en RCM destacando especialmente de qué forma se trabaja con los indicadores y como estos se relacionan con el proceso.

## 3 | Conclusiones y Recomendaciones

La medición de desempeño es parte vital en la gestión de empresas y el área de mantenimiento e inventario de repuestos no son excepciones, existe una amplia gama de académicos trabajando en el desarrollo de modelos de gestión y medición de desempeño para trabajar de forma conjunta las labores de mantenimiento con las de inventario de repuestos.

Como resultado se puede ver la existencia de una amplia gama de KPIs construidos específicamente para el área de mantenimiento, y al mismo tiempo se está trabajando en la adaptación de indicadores para inventario de repuestos. El camino va dirigido a una estandarización de KPIs liderada en el área de mantenimiento por la SMRP y la norma UNE-EN 15341.

El gran desafío está en que las empresas sean capaces de adoptar estas métricas dentro de su proceso de negocio de forma ordenada con tal de poder recuperar datos e información del proceso con la exactitud y calidad suficiente como para servir de bases para la toma de decisiones en la definición de objetivos y políticas de mantenimiento e inventario de repuestos.

Esta investigación contribuye a crear un marco a través del cual las empresas logren identificar los indicadores existentes para medir el desempeño de mantenimiento e inventario de repuestos, propuestos de forma conjunta de tal manera de gestionar simultáneamente ambas áreas, en definitiva, señala qué información necesitan considerar las empresas, cómo estructurarla y cómo incorporarla dentro de un proceso de negocio que contempla gestionar las políticas de mantenimiento e inventario de repuestos de forma conjunta y coordinada.

Es importante señalar que respecto a la medición de desempeño, no existe demasiada literatura al respecto, ni pautas paso a paso de cómo llevar control de estos procesos, esta

investigación contribuye a definir los requerimientos de información que están detrás de los KPIs de mantenimiento e inventario de repuestos y la forma en que esta información se relaciona con el proceso de gestión, pero hace falta una guía completa y clara destinada a las empresas que necesiten aplicar PM en estas áreas.

También hace falta definir KPIs adaptados a inventario de repuestos estandarizados a disponibilidad de la industria para facilitar un benchmarking del proceso de mantenimiento e inventario de repuestos como uno solo.

Por el momento, es recomendable que las empresas valoren la importancia de estas áreas dentro de la compañía, lleven con extremo cuidado y orden la información que recopilan de sus procesos de mantenimiento e inventario de repuestos ya que un mal manejo de los datos puede volverlos inservibles. También estar constantemente atento a cualquier actualización los indicadores mostrados por la SMRP y la norma EN-15341 además de revisar constantemente sus procesos con un enfoque de mejora continua para mantenerse a un nivel competitivo dentro de su industria.

## Bibliografía

- Al-Fawzan, Ma (2000). Methods for estimating the parameters of the Weibull distribution. Disponible en: <http://interstat.statjournals.net/YEAR/2000/articles/0010001.pdf>. a, 1.5.3.2
- Altay, N. y Lewis, L. (2011). *Service Parts Management: Demand Forecasting and Inventory Control*. Springer Science & Business Media, 1st edición. 1.1
- Autologica (2013). Problemas frecuentes de los concesionarios: Repuestos. Disponible en: <http://www.autologica.com/downloads/Autologica-WhitePaper-Repuestos2013.pdf>. (document), 1.5.1
- Bloom, Neil (2006). *Reliability Centered Maintenance: Implementation made simple*. McGraw-Hill, Inc. 1.5.2.1, 1.5.3.2, 2.1.1.2
- Cavalieri, S y Garetti, M (2008). A decision-making framework for managing maintenance spare parts. *Production Planning*, 19(4), 379–396. (document), 1.5.1, 1.5.2.3, 1.5.3, 1.5.3, 1.7, 1.8, 1.5.3.1, 1.5.3.2, 1.5.3.3, 1.5.3.4, 2.1.1.2
- Chemweno, Peter K.; Pintelon, Liliane; y Muchiri, Peter N. (2015). Evaluating the Impact of Spare Parts Pooling Strategy on the Maintenance of Unreliable Repairable Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 989–994. (document), 1.5.1, 2.1.2
- Cuadra, José (2012). *Modelación de una Metodología de Manejo de Bases de Datos Para la Determinación de Frecuencia de Intervención de Mantenimiento Sobre Equipos Industriales*. PhD thesis, Universidad Técnica Federico Santa María. 2.4
- DeWald, Daniel (2011). Key Performance Indicators for Stores and MRO. Disponible en: [http://reliabilityweb.com/articles/entry/key\\_performance\\_indicators\\_for\\_stores\\_and\\_mro](http://reliabilityweb.com/articles/entry/key_performance_indicators_for_stores_and_mro). 1.5.3.5, 2.1.2, 2.1.2.2
- Driessen, Maarten; Arts, Joachim; van Houtum, Geert-Jan; Rustenburg, Jan Willem; y Huisman, Bob (2014). *Maintenance Spare Parts Planning and Control*, volume 325. 1.5.1
- Grall, A.; Bérenguer, C.; y Dieulle, L. (2002). A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 76(2), 167–180. 1.5.2.2

- Heizer, J. y Render, B. (2004). *Principios de Administración de Operaciones*. Madrid: Pearson Prentice Hall, 5th edición. 1.1
- Hellingrath, Bernd y Cordes, Ann-kristin (2014). Conceptual approach for integrating condition monitoring information and spare parts forecasting methods. *Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal*, 2(1), 725–737. (document), 1.5.1, 1.2, 1.5.2.2
- Hellingrath, Bernd; Pereira, Carlos E; Espíndola, Danúbia; Frazzon, Enzo M; Cordes, Ann-kristin; Saalman, Philipp; y Zuccolotto, Marcos (2015). On the Integration of Intelligent Maintenance and Spare Parts Supply Chain Management. (pp. 1039–1044). (document), 1.5.1
- Jacobs, F. Robert (Indiana University) y Chase, Richard B. (University of Southern California) (2013). Supply chain process and analytics. In *Operations and Supply Chain Management: The Core* chapter 11, (pp. 354–398). McGraw-Hill Education, 3 edición. 1.5.3
- Kader, Ba; Sofiene, Dellagi; y Nidhal, Rezg (2015). Ecological and joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventories for an optimal production plan. *IFAC-PapersOnLine*, 48(1996), 2207–2212. (document), 1.5.1
- Kennedy, W.J.; Wayne Patterson, J.; y Fredendall, Lawrence D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, 76(2), 201–215. (document), 1.5.1, 1.5.3
- Kristjanpoller, F; Crespo, A; López-Campos, M; y Viveros, P (2017). Propuesta metodológica para la evaluación del impacto esperado de fallos en equipos complejos. Caso aplicado a una planta de trituración de mineral de cobre. *Dyna Management*. 1.5.2.3, 2.1.1.2
- Kumar, Rajesh y Kumar, Uday (2004). A conceptual framework for the development of a service delivery strategy for industrial systems and products. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 19(5), 310–319. 1.5.2.2
- Kumar, U; Galar, D; Parida, A; Stenström, C; y Berges, L (2013). *Maintenance Performance Metrics : A State of the Art Review*. Número Kelly 1989. (document), 1.5.2.3, 1.3, 1.5.2.3, 1.6, 1.5.2.3, 2.1.1, 2.4
- Lattero, A. (2004). Optimización del inventario de repuestos e insumos. Disponible en: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/Lattero.pdf>. (document), 1.1
- Lin, Jing y Ghodrati, Behzad (2011). Maintenance Spares Inventory Management-Performance Measurement using a HOMM. *Pure.Ltu.Se*. 1.5.1, 1.5.3.5, 1.5.3.5, 2.2
- Mantenimiento Mundial (2011). Problemas cotidianos en la gestión de mantenimiento. Disponible en: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/encuestas/problemas.asp>. 1.5.1

- Martin, Benjamin (2010). *Inventory Management, Metrics, and Simulation*. PhD thesis, North Carolina State University. ([document](#)), 1.5.3.5, 1.9, 2.1.2
- Milje, Ruben (2011). Engineering methodology for selecting Condition Based Maintenance. (pp. 1–57). 1.5.2, 1.5.2.1, 1.5.2.2
- Mitchell, John (2002). Metrics/Measures of Performance. *Medium - Metrics Measuring Performance and Effectiveness*. 1.5.2.3
- Nguyen, KA; Van, P Do; y Grall, A (2014). A Joint Predictive Maintenance and Spare Parts Provisioning Policy for Multi-component Systems Using RUL Prediction and Importance Measure. *Proceedings of the 2nd . . .*, (pp. 1–8). ([document](#)), 1.5.1
- Parida, Aditya (2006). DOCTORAL THESIS Development of a Multi-criteria Hierarchical Framework for Maintenance Performance Measurement Concepts , Issues and Challenges. ([document](#)), 1.1, 1.5.2.3, 1.5.2.3, 1.5
- Parida, Aditya y Kumar, Uday (2009). Maintenance Productivity and Performance Measurement. *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, (pp. 17–41). 1.5.2.3
- Park, Alan (1998). Manual del Ingeniero de Mantenimiento. (pp. 53–54). 1.5.2.1
- Scholz, Fritz (2002). Weibull Reliability Analysis. *Works, Boeing Phantom Technology, Computing Statistics, Applied*, (pp. 1–76). 1.5.2.1
- Sheut, C. y Krajewski, L. J. (1994). A decision model for corrective maintenance management. *International Journal of Production Research*, 32(6), 1365–1382. ([document](#)), 1.5.2.2, 1.1
- Shin, Jong-Ho y Jun, Hong-Bae (2015). On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(2), 119–127. 1.5.2.2, 1.5.2.2
- Slater, Phillip (2016). The #1 Problem with Spare Parts Inventory Management. Disponible en: <http://sparepartsknowhow.com/the-1-problem-with-spare-parts-inventory-management/>. 1.1
- Stegmaier, Raúl; Kristjanpoller, Fredy; Viveros, Pablo; y Grubessich, Tomás (2014). RCM: POLITICAS DE MANTENIMIENTO. *Ingeniería de Plantas Industriales*. b, 2.1.1.1

## A | Sobre indicadores ICO y FPD

De acuerdo con [Kristjanpoller et al. \(2017\)](#), es posible calcular el *ICO* (impacto esperado de criticidad operacional) que permite conocer la contribución del fallo de cada elemento a la pérdida de producción del sistema debido a su indisponibilidad, siendo la sumatoria de los *ICO* de todos los elementos el 100 %. Posteriormente, yendo más al detalle, también se calcula el valor *FPD* (factor de propagación del fallo esperado), que dependiendo de la configuración lógica-funcional del elemento, pondera la importancia de su detención en el sistema total.

Para plantear más claramente la diferencia entre el *ICO* y el *FPD* puede hacerse una analogía con el impacto de distintas acciones bursátiles sobre el rendimiento de una bolsa de valores. Cada acción puede representar un elemento del sistema productivo y el rendimiento final de la bolsa puede asemejarse al rendimiento en disponibilidad del sistema. Si una acción disminuye un determinado porcentaje, no quiere decir que la bolsa disminuirá en la misma medida. El valor que pondera la propagación de ese decremento hacia el rendimiento de la bolsa sería el factor *FPD*, el cual tomará en cuenta también el comportamiento de las demás acciones. Por otro lado, analizando el desempeño total de la bolsa de valores, puede determinarse que una caída está conformada en distintas proporciones por la caída de distintas acciones individuales. Ese valor que relaciona el desempeño total con cada elemento del sistema sería el *ICO*. En resumen, tanto el *FPD* como el *ICO* detallan el impacto de la detención de un elemento sobre el sistema, para posteriormente hacer el análisis en disponibilidad y costos que se estime conveniente.

Dado un sistema complejo compuesto por  $I$  niveles, desde  $i = 0$  hasta  $i = r$ , donde el  $i = 0$  corresponde al nivel del sistema en general,  $i = 1$  al nivel de los elementos “padres” en que inicialmente se divide el sistema (subsistemas),  $i = 2$  al nivel de los elementos “hijos”

o sub-elementos del nivel anterior y así hasta el nivel  $r$ . Sea  $J$  el conjunto de elementos mantenibles del sistema; habrá desde  $j = 1$  hasta  $j = n$  elementos en cada nivel  $i$  del sistema. El factor  $ICO$  de cada elemento en el sistema se determina a través de la descomposición del índice global y de cada uno de los subsistemas.

Donde:

$ICO_{i,j}$ : Es  $ICO$  para el elemento  $j$  (de 1 a  $n$ ) que se encuentra en el nivel de descomposición  $i$  (de 1 a  $r$ ).

$A_{i,j}$ : Es la disponibilidad esperada para el elemento  $j$  (de 1 a  $n$ ) que se encuentra en el nivel de descomposición  $i$  (de 1 a  $r$ ).

En términos simples, el  $ICO$  muestra el resultado final de la contribución de cada elemento sobre el sistema, exponiendo el posible impacto de un fallo en la pérdida de capacidad de producción. Al considerar el nivel de detalle más bajo, esto es el sistema en su totalidad o nivel  $i = 0$ , la suma de todos los  $ICO$  es 100 % del sistema (ecuación A.1).

$$\sum_{j=1}^n ICO_{i,j} = 1 \quad (A.1)$$

Por último, una vez conocido el  $ICO_{i,j}$  de cada elemento, su nivel de impacto se puede descomponer en dos aspectos principales: la frecuencia (por la falta de disponibilidad del elemento) y la consecuencia (a través del impacto del elemento según su configuración lógico funcional). Este último índice se llamará Factor de Propagación esperado de Detención  $FPD_{i,j}$  el cual representa el efecto que causa una parada del elemento  $i; j$  en el sistema (ecuación A.2). El efecto de detener un elemento  $j$  puede tener diferentes resultados, dependiendo del estado de los demás elementos que se encuentran en el mismo nivel  $i$ .

$$FPD_{i,j} = \frac{ICO_{i,j} * (1 - A_{sistema})}{(1 - A_{i,j})} \quad (A.2)$$

Considerando una estructura sistema-subsistema-equipo, el algoritmo de cálculos para esta etapa sería el siguiente:

1. Calcular la suma de la indisponibilidad total de todos los subsistemas de cada nivel  $i$ :

$$\sum_{j=1}^n (1 - A_{sub}) \quad \forall i : 1, \dots, r - 1$$

2. El ICO del sistema será  $ICO_{sis} = 100\%$  ( $i = 0$ )
3. El ICO del subsistema  $ICO_{sub}$  será la proporción de impacto del subsistema con respecto al total de indisponibilidades, multiplicado por el  $ICO_{sis}$  lo que quedaría:
 
$$\frac{(1-A_{sub})}{\sum_{j=1}^n (1-A_{sub})} \forall i : 1, \dots, r - 1$$
4. Calcular la suma de la indisponibilidad de los equipos pertenecientes a un subsistema:
 
$$\sum_{j=1}^n (1 - A_{equ}) \forall i : 1, \dots, r.$$
 En caso de fraccionamiento, dicha indisponibilidad deberá multiplicarse por la capacidad de cada elemento.
5. El ICO del equipo  $ICO_{equ}$  será la proporción de impacto del equipo con respecto al total de indisponibilidades para el subsistema en análisis, multiplicado por el  $ICO_{sub}$  lo que quedaría:
 
$$\frac{(1-A_{equ})}{\sum_{j=1}^n (1-A_{equ})} * ICO_{sub} \forall i : 1, \dots, r.$$
 En caso de fraccionamiento, es necesario multiplicar la indisponibilidad del equipo por la capacidad,
6. El FPD del equipo  $FPD_{equ}$  se calcula con la ecuación [A.2](#).

# B | Indicadores y métricas estudiadas

## B.1. Indicadores de Mantenimiento

### B.1.1. Métricas de la norma EN-15341

| Métrica (Factor)                                   | Definición  | Indicador/ Conjunto de Indicadores | Tipo de indicador |
|--|---|------------------------------------|-------------------|
| Costo total del mantenimiento                      | <p>Incluye los costos relativos a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remuneraciones, salarios y horas suplementarias del personal de gestión, supervisión, de apoyo y mantenimiento directo.</li> <li>• Costos salariales adicionales de las personas antes citadas (impuestos, seguros, contribuciones legislativas).</li> <li>• Repuestos y materiales consumibles cargados al mantenimiento (incluido los costos de flete).</li> <li>• Herramientas y equipos (no amortizados o alquilados).</li> <li>• Contratistas, medios alquilados.</li> <li>• Servicios de consultoría.</li> <li>• Costos administrativos de mantenimiento.</li> <li>• Formación y entrenamiento del personal.</li> <li>• Costos de actividades de mantenimiento realizadas por personal de producción.</li> <li>• Costes de transporte, hoteles, etc.</li> <li>• Documentación.</li> <li>• CMMS (computerized maintenance management system) y sistemas de planificación.</li> <li>• Energía y servicios generales.</li> <li>• Depreciación de las inversiones realizadas en equipos de mantenimiento, talleres y almacenes de piezas de repuestos.</li> </ul> <p>Se excluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Costos relativos a cambios de productos o al tiempo de transición (por ejemplo, cambio de útiles).</li> <li>• Depreciación de piezas de repuesto estratégicas.</li> <li>• Costos de periodos de tiempo de indisponibilidad.</li> </ul> | Costos de mantenimiento            | Costos            |
| Valor de sustitución de los activos (ARV)          | <p>El valor de sustitución de los activos (ARV) se define como la cantidad de capital estimada que se requeriría para construir el activo. El ARV es una estimación de los costos actuales para realizar una sustitución de la misma naturaleza que la existente. NOTA 1. En la industria, el ARV es normalmente el valor de sustitución de la instalación. NOTA 2. El ARV puede ser equivalente al valor asegurado.</p>  | Indicadores financieros            | Datos Adicionales |
| Valor añadido más costos externos de mantenimiento | <p>Valor de producción menos el valor de las materias primas, los servicios generales y los servicios adquiridos más los costos externos del mantenimiento</p>  | Indicadores de producción          | Datos Adicionales |

|   |  |                                    |                    |
|---|--|------------------------------------|--------------------|
| Cantidad producida  | Cantidad obtenida en producción o cantidad de servicios realizados por un activo/bien (toneladas, litros, etc.)  | Indicadores de producción          | Datos Adicionales  |
| Costo de transformación de la producción                  | Costo total requerido por un activo o un bien, para transformar un material de entrada en un producto o servicio, excluyéndose las materias primas y los materiales auxiliares de embalaje<br>Los costes de indisponibilidad relativos a mantenimiento corresponden a los tiempos de indisponibilidad debidos al mantenimiento, multiplicados por el valor medio de una unidad de tiempo de pérdida de producción o de prestación de servicios del activo o del bien. El valor de la unidad de tiempo de pérdida de producción puede ser el costo suplementario de producción, en caso de producción en una etapa o un tiempo posterior, y/o el valor o la pérdida debida a la no producción durante el estado de indisponibilidad del activo o del bien por razones de mantenimiento. | Indicadores de producción          | Datos Adicionales  |
| Costes de indisponibilidad ligados al mantenimiento       | El tiempo que un bien ha estado en condiciones de realizar una función requerida bajo condiciones dadas en un instante dado o durante un intervalo de tiempo dado, asumiendo que se disponía de los recursos externos requeridos. NOTA 1. Esta disponibilidad depende de aspectos combinados de la fiabilidad, la mantenibilidad y de la soportabilidad del mantenimiento. NOTA 2. Los recursos externos requeridos, distintos de los recursos de mantenimiento, no afectan a la disponibilidad de tiempo  | Costos de indisponibilidad         | Costos             |
| Disponibilidad ligada al mantenimiento                    | El costo del personal interno (incluyendo los costos salariales y suplementarios) empleados en mantenimiento se componen de: a) los costos del personal directo, es decir del personal que trabaja a pie de obra o en los talleres realizando actividades de mantenimiento. b) los costos del personal indirecto (gestores, personal de dirección y oficinistas, supervisores, personal de ingeniería de mantenimiento, personal de planificación y de programación, personal de los almacenes de herramientas y almaceneros). c) los costos de las actividades de mantenimiento realizadas por personal de producción   | Disponibilidad                     | Equipos o procesos |
| Costo total de personal interno empleado en mantenimiento | Costo del personal externo dedicado a actividades de mantenimiento   | Costo de personal de mantenimiento | Costos             |
| Costo total de personal externo empleado en mantenimiento | Suma de las facturas del contratista por sus actividades de mantenimiento realizadas en el activo o en el bien dado.   | Costo de personal de mantenimiento | Costos             |
| Costo total de la contratación                            | Energía eléctrica + gas + fuel-oil + cualquier otro tipo de energía. NOTA la energía se miden todas en kcal o en Mjoule  | Indicadores de producción          | Datos Adicionales  |
| Energía total utilizada                                   | Costo total del mantenimiento realizado después de producirse un fallo, destinado a poner un bien en un estado que le permita realizar una función requerida   | Costos de mantenimiento            | Costos             |
| Costo mantenimiento correctivo                            | Costo de mantenimiento realizado a intervalos predefinidos o de acuerdo con criterios establecidos, destinado a reducir la probabilidad de fallo o la degradación del funcionamiento de un bien  | Costos de mantenimiento            | Costos             |
| Costo de mantenimiento preventivo                         | El valor, medido en términos de costos, de las actividades de mantenimiento basado en la condición del bien  | Costos de mantenimiento            | Costos             |
| Costo del mantenimiento basado en condición               | Costo del mantenimiento preventivo realizado de acuerdo con intervalos de tiempo establecidos o con un número de unidades de utilización, pero sin ninguna investigación previa de la condición del bien   | Costos de mantenimiento            | Costos             |
| Costo del mantenimiento sistemático                       | Costo del mantenimiento realizado para mejorar la disponibilidad de un bien, sin que cambie la función requerida   | Costos de mantenimiento            | Costos             |
| Costo del mantenimiento de mejora                         | Costo del mantenimiento realizado durante las paradas (programadas para mantenimiento) de una instalación o una fábrica (por ejemplo, la parada anual)   | Costos de mantenimiento            | Costos             |
| Costo de paradas programadas para mantenimiento           | Costo de formación del personal de mantenimiento directo e indirecto   | Costo de personal de mantenimiento | Costos             |
| Costo de formación del personal de mantenimiento          | Efectivo de personal directo más el efectivo de personal indirecto   | Indicadores de personal            | HSE & RRRH         |
| Efectivo del personal de mantenimiento                    | Suma de los costos de contratación de las actividades de mantenimiento mecánico  | Costo de personal de mantenimiento | Costos             |
| Costos totales de contratación del mantenimiento mecánico | Suma de los costos de contratación de las actividades de mantenimiento mecánico, eléctrico y de la instrumentación   | Costo de personal de mantenimiento | Costos             |
| Costos totales de contratación del mantenimiento          |  |                                    |                    |

|   |   |                                    |                    |
|---|---|------------------------------------|--------------------|
| Costos totales de contratación del mantenimiento eléctrico                          | Suma de los costos de contratación de las actividades de mantenimiento eléctrico  | Costo de personal de mantenimiento | Costos             |
| Costos totales de contratación del mantenimiento de la instrumentación              | Suma de los costos de contratación de las actividades de mantenimiento de la instrumentación.   | Costo de personal de mantenimiento | Costos             |
| Tiempo total de funcionamiento  | Intervalo de tiempo durante el cual un bien está realizando su función requerida  | Indicadores de tiempo              | Equipos o procesos |
| Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento  | Intervalo de tiempo durante el cual un bien está en estado de indisponibilidad por razones de mantenimiento   | Indicadores de tiempo              | Equipos o procesos |
| Tiempo de disponibilidad conseguido durante el tiempo requerido                     | Tiempo de disponibilidad: intervalo de tiempo durante el cual un bien se encuentra en estado de disponibilidad. Estado de disponibilidad: estado de un bien caracterizado por el hecho de que puede realizar una función requerida, asumiendo que se dispone de los recursos externos, si fuesen necesarios | Indicadores de tiempo              | Equipos o procesos |
| Tiempo requerido  | Intervalo de tiempo durante el cual el usuario solicita que el bien esté en condición de realizar una función requerida   | Indicadores de producción          | Datos Adicionales  |
| Volumen anual de residuos o de efectos nocivos relacionados con el mantenimiento    | Volumen anual de residuos o de efectos nocivos relacionados con el mantenimiento. Estos indicadores se deberían medir para cada producto químico (por ejemplo, CO <sub>2</sub> . . . ) o efecto nocivo.   | Indicadores HSE                    | HSE & RRHH         |
| Número de lesiones del personal debidas al mantenimiento                            | Número de fallos debidos a mantenimiento o por falla de mantenimiento que han causado lesiones al personal  | Indicadores HSE                    | HSE & RRHH         |
| Tiempo de indisponibilidad por fallos   | Tiempo total de indisponibilidad perdido a causa de fallos  | Indicadores de tiempo              | Equipos o procesos |
| Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento planificado y programado               | El tiempo total de trabajos de mantenimiento planificado y programado que requieren tiempo de indisponibilidad  | Indicadores de tiempo              | Equipos o procesos |
| Tiempo de mantenimiento preventivo que origina tiempo de indisponibilidad           | Intervalo de tiempo durante el cual un bien está en estado de indisponibilidad a causa de mantenimiento preventivo  | Indicadores de tiempo              | Equipos o procesos |
| Tiempo total de indisponibilidad por mantenimiento                                  | Intervalo de tiempo durante el cual un bien está en estado de indisponibilidad a causa de mantenimiento   | Indicadores de tiempo              | Equipos o procesos |
| Tiempo de mantenimiento sistemático que origina tiempo de indisponibilidad          | Intervalo de tiempo durante el cual un bien está en estado de indisponibilidad a causa de mantenimiento sistemático   | Indicadores de tiempo              | Equipos o procesos |
| Tiempo de mantenimiento basado en condición que origina tiempo de indisponibilidad  | Intervalo de tiempo durante el cual un bien está en estado de indisponibilidad a causa de mantenimiento basado en condición   | Indicadores de tiempo              | Equipos o procesos |
| Número de fallos que causan lesiones al personal                                    | Número de fallos que causan lesiones al personal y que darán lugar a la pérdida de uno o varios días de trabajo   | Indicadores HSE                    | HSE & RRHH         |
| Número total de fallos  | Número total de fallos. Fallo: cese en la capacidad de un bien para realizar una función requerida NOTA 1. Después del fallo, el bien presenta una avería que puede ser completa o parcial. NOTA 2. El "fallo" es un suceso, a diferencia de "avería" que es un estado.                                     | Número de detenciones              | Equipos o procesos |
| Número de fallos que pueden causar lesiones al personal                             | Número de fallos que podrían causar lesiones  | Indicadores HSE                    | HSE & RRHH         |
| Número de fallos que causan daño al medio ambiente                                  | Número de fallos que causan daño al medio ambiente  | Indicadores HSE                    | HSE & RRHH         |
| Número de órdenes de trabajo de mantenimiento que causan tiempo de indisponibilidad | Número de todas las órdenes de trabajo de mantenimiento preventivo y correctivo, así como todas las órdenes de trabajo para mejoras que causen tiempo de indisponibilidad   | Órdenes de trabajo                 | Equipos o procesos |
| Número de órdenes de trabajo de mantenimiento                                       | Número de todas las órdenes de trabajo de mantenimiento preventivo y correctivo, así como todas las órdenes de trabajo para mejoras   | Órdenes de trabajo                 | Equipos o procesos |
| Número de sistemas cubiertos por un análisis de criticidad                          | Número de sistemas analizados y cubiertos por una metodología, con el fin de evaluar y reducir los riesgos  | Indicadores de sistemas            | Equipos o procesos |
| Número total de sistemas  | Número total de sistemas. NOTA. Para la definición de "sistema", consultar la metodología específica utilizada  | Indicadores de sistemas            | Equipos o procesos |

|  |  |                         |                    |
|--|--|-------------------------|--------------------|
| Horas-hombre utilizadas para planificar en un proceso de planificación de mantenimiento sistemático    | Horas-hombre utilizadas para planificar mantenimiento.<br>La planificación incluye consideraciones de seguridad, mano de obra, materiales, herramientas y equipos, así como una estimación del tiempo de indisponibilidad y de las horas-hombre requeridas para completar el trabajo, etc. Todas estas informaciones están disponibles para el equipo de mantenimiento de primera línea que realiza el trabajo, antes de que éste comience   | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos |
| Horas-hombre totales de personal interno de mantenimiento  | Número de horas trabajadas por el personal interno de mantenimiento  | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos |
| Tiempo de mantenimiento planificado y programado que causa tiempo de indisponibilidad en la producción | Tiempo total de calendario empleado en trabajos de mantenimiento planificado y programado que causan tiempo de indisponibilidad en la producción.  | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos |
| Tiempo total de recuperación   | Suma de los tiempos de recuperación. Tiempo de recuperación: intervalo de tiempo durante el cual un bien está en estado de indisponibilidad debido a un fallo. Incluye retrasos administrativos y logísticos.  | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos |
| Efectivo de personal interno de mantenimiento  | Personal interno de mantenimiento  | Indicadores de personal | HSE & RRHH         |
| Efectivo total de empleados internos   | Efectivo total del personal interno en el activo   | Indicadores de personal | HSE & RRHH         |
| Efectivo de personal indirecto de mantenimiento  | Efectivo de personal indirecto de mantenimiento  | Indicadores de personal | HSE & RRHH         |
| Efectivo de personal directo de mantenimiento  | Efectivo de personal directo de mantenimiento  | Indicadores de personal | HSE & RRHH         |
| Horas-hombre de mantenimiento por operario de producción   | Horas-hombre de mantenimiento realizadas por un usuario o un operario<br>NOTA Es el trabajo de mantenimiento realizado por personas que no pertenecen al departamento de mantenimiento   | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos |
| Horas-hombre totales de personal directo de mantenimiento  | Número de horas trabajadas por el personal directo de mantenimiento  | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos |
| Horas-hombre de mantenimiento planificado y programado   | Horas-hombre de personal directo de mantenimiento que se emplean en actividades planificadas y programadas (internas y externas).<br>NOTA 1. En la planificación de actividades, se definen: - Las consideraciones de seguridad - Las herramientas o procedimientos especiales - Las normas de tolerancia - Las piezas de sustitución o los materiales requeridos Junto con una estimación del tiempo de indisponibilidad y las horas-hombre requeridas para completar el trabajo, antes de que éste comience.<br>NOTA 2. En la programación de actividades se establece un calendario de intervenciones de mantenimiento o el número de unidades de utilización, con la indicación de cuando se debería realizar el mantenimiento.<br>NOTA 3. Las horas-hombre planificadas y programadas podrían ser horas-hombres dedicadas a mantenimiento correctivo, a mantenimiento basado en condición, al mantenimiento realizado y al mantenimiento de mejora. | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos |
| Horas-hombre totales de mantenimiento disponibles  | Número de horas-hombre de mantenimiento (interno y externo) disponibles para actividades de mantenimiento (excluyendo vacaciones, formación del personal, etc.)  | Indicadores de personal | HSE & RRHH         |
| Número de lesiones del personal de mantenimiento   | Número de lesiones sufridas por el personal interno de mantenimiento, que supongan un trabajo adicional de uno o varios días   | Indicadores HSE         | HSE & RRHH         |
| Horas-hombre perdidas por lesiones del personal de mantenimiento                                       | Horas-hombre de mantenimiento interno perdidas por lesiones del personal interno de mantenimiento  | Indicadores HSE         | HSE & RRHH         |
| Horas-hombre totales trabajadas por el personal de mantenimiento                                       | Número de horas-hombre de personal interno de mantenimiento trabajadas realmente   | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos |
| Horas-hombre empleadas en mejora continua  | Las horas-hombre empleadas en procesos de mejora, destinadas a mejorar el nivel real de disponibilidad, fiabilidad, mantenibilidad, calidad, seguridad, medio ambiente y costes.<br>NOTA. Como ejemplo se citan las horas empleadas en el análisis de criticidad sistemática, en la identificación de mejoras, en la participación en proyectos y en la preparación de los mismos, como instructor para la formación interna y externa o, finalmente para auditorías o planes de seguridad, calidad o medioambiental   | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos |

|  |  |                           |                    |
|--|--|---------------------------|--------------------|
| Horas-hombre totales de personal de mantenimiento  | Número de horas trabajadas por el personal de mantenimiento  | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre totales de los operarios de producción  | Horas realizadas por un usuario o un operario de producción, en cualquier otra actividad   | Indicadores de producción | Datos Adicionales  |
| Personal directo de mantenimiento que trabaja por turnos                                       | Personal directo de mantenimiento que trabaja por turnos, en la instalación y en servicios (en explotación)  | Indicadores de personal   | HSE & RRHH         |
| Tiempo empleado en mantenimiento correctivo de urgencia  | Mantenimiento que se realiza sin demora después de detectarse una avería, para evitar consecuencias inaceptables   | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre de personal interno directo de mantenimiento mecánico                             | Horas-hombre realizadas por personal interno de mantenimiento mecánico   | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre totales de personal interno directo de mantenimiento                              | Número de horas realizadas por personal interno directo de mantenimiento   | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre de personal interno directo de mantenimiento eléctrico                            | Horas-hombre realizadas por personal interno de mantenimiento eléctrico  | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre de personal interno directo de mantenimiento de instrumentación                   | Horas-hombre realizadas por personal interno de mantenimiento de instrumentación   | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Efectivo de personal interno de mantenimiento con varias actividades                           | Efectivo de personal interno directo de mantenimiento que trabaja en varias actividades (tiene capacidad para realizar más de un oficio y ha sido instruido formalmente en más de un oficio)   | Indicadores de personal   | HSE & RRHH         |
| Horas-hombre de mantenimiento correctivo   | Horas trabajadas en actividades de mantenimiento correctivo (interno y externo)  | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre totales de mantenimiento  | Número de horas-hombre trabajadas por personal interno y externo de mantenimiento  | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre de mantenimiento correctivo de urgencia   | Horas-hombre empleadas en actividades de mantenimiento correctivo de urgencia  | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre de mantenimiento preventivo   | Horas trabajadas en actividades de mantenimiento preventivo (interno y externo)  | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre de mantenimiento basado en condición  | Horas trabajadas en actividades de mantenimiento basado en condición (interno y externo)   | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre de mantenimiento sistemático  | Horas trabajadas en actividades de mantenimiento sistemático (interno y externo)   | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Horas-hombre suplementarias de mantenimiento interno   | Número de horas-hombre suplementarias realizadas por personal interno de mantenimiento   | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| Número de órdenes de trabajo realizadas según programación                                     | Número de órdenes de trabajo que se han completado técnicamente en un tiempo inferior a un tiempo dado después de la estimación de su conclusión   | Órdenes de trabajo        | Equipos o procesos |
| Número total de órdenes de trabajo programadas   | Número de órdenes de trabajo programadas   | Órdenes de trabajo        | Equipos o procesos |
| Número de horas-hombre para formación del personal interno de mantenimiento                    | Número de horas empleadas en formación de todo el personal (directo e indirecto) del departamento de mantenimiento   | Indicadores de personal   | HSE & RRHH         |
| Efectivo de personal interno directo de mantenimiento que usa programas informáticos           | Efectivo de personal directo de mantenimiento que utiliza programas informáticos de mantenimiento (CMMS) para cualquier actividad de mantenimiento o de gestión de los activos (flujo de órdenes de trabajo, facturas de materiales, planificación, almacén de piezas de repuesto, etc.) | Indicadores de personal   | HSE & RRHH         |
| Efectivo de personal interno directo de mantenimiento  | Personal interno directo de mantenimiento  | Indicadores de personal   | HSE & RRHH         |
| Horas-hombre totales trabajadas por personal directo en actividades planificadas y programadas | Número de horas-hombre trabajadas realmente por personal directo en actividades planificadas y programadas   | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |
| horas-hombre totales planificadas y programadas para personal directo                          | Número de horas-hombre planificadas y programadas para personal directo  | Indicadores de tiempo     | Equipos o procesos |

**Tabla B.1:** Métricas (Factores) de los KPIs de la norma EN-15341

## B.1.2. Indicadores y métricas adicionales a la norma EN-15341

| Indicador/ (Factor)            | Definición  | Indicador/ Conjunto de Indicadores | Tipo de indicador  | Dpto          | Referencia   |
|--------------------------------|---|------------------------------------|--------------------|---------------|--|
| Indicador/(Factor)             | Definición  | Indicador/Conjunto de Indicadores  | Tipo de indicador  | Dpto          | Referencia   |
| Costos de ineficiencia         | Costo de oportunidad asociado a la no operación del proceso productivo u equivalente  | Costos de ineficiencia             | Costos             | Operaciones   | Stegmaier et al. 2014  |
| Costos Globales                | Inversión + Costos de indisponibilidad y de operación   | Costos globales                    | Costos             | Mantenimiento | Stegmaier et al. 2014  |
| Número de reclamos por calidad | Número de reclamos por calidad  | Indicadores de calidad             | Datos Adicionales  | Marketing     | Parida (2006) Beamon (1999) Chan (2003) Parida (2006) Cooke (2003) Cunningham and Fiume (2003) Parida (2006) |
| Retornos por calidad           | Retornos de productos debido a mala calidad   | Indicadores de calidad             | Datos Adicionales  | Marketing     | Parida (2006)  |
| Satisfacción del cliente       |   | Indicadores de calidad             | Datos Adicionales  | Marketing     | Parida (2006)  |
| Production rate                | Cantidad de productos producidos por unidad de tiempo   | Indicadores de producción          | Datos Adicionales  | Operaciones   | Parida (2006)  |
| Cambio % de activos            | Cambio porcentual en el total de activos  | Indicadores financieros            | Datos Adicionales  | Finanzas      | Kumar et al. (2013)  |
| Cambio % de ventas             | Cambio porcentual en las ventas de un año a otro  | Indicadores financieros            | Datos Adicionales  | Finanzas      | Kumar et al. (2013)  |
| ROA                            | Retorno sobre el total de activos   | Indicadores financieros            | Datos Adicionales  | Finanzas      | Kumar et al. (2013)  |
| ROI                            | Retorno sobre la inversión  | Indicadores financieros            | Datos Adicionales  | Finanzas      | Kumar et al. (2013)  |
| VAN                            | Valor Actual Neto   | Indicadores financieros            | Datos Adicionales  | Finanzas      | Kumar et al. (2013)  |
| Nuevos Clientes Adquiridos     | Variación del número de clientes en el último periodo de tiempo   | Nuevos Clientes                    | Datos Adicionales  | Marketing     | Parida (2006)  |
| Calidad                        | Toma en consideración los productos que no cumplen los estándares de calidad, se calcula como: (Productos buenos/Total de Productos)  | OEE                                | Datos Adicionales  | Operaciones   | Parida (2006)  |
| Rendimiento                    | Ratio que señala la eficiencia en el proceso productivo, se calcula como: (Tiempo de ciclo ideal x Cantidad producida)/Tiempo de operación  | OEE                                | Datos Adicionales  | Operaciones   | Parida (2006)  |
| Confiabilidad                  | Función de distribución de probabilidad de que un equipo o sistema funciones durante un periodo de tiempo sin fallar  | Confiabilidad                      | Equipos o procesos | Mantenimiento | Parida et al. (2009)   |
| FPD                            | Factor de propagación de fallo esperado, se calcula como $ICO_{ij} * (1 - A_s) / (1 - A_{ij})$ (ver Anexo A)  | Criticidad                         | Equipos o procesos | Mantenimiento | Kristjanpoller et al. (2016)   |
| ICO                            | Impacto esperado de criticidad operacional, se calcula como la indisponibilidad de equipo, subsistema o sistema dividido por la suma de la indisponibilidad de todos los equipos o subsistemas según el nivel (ver Anexo A) | Criticidad                         | Equipos o procesos | Mantenimiento | Kristjanpoller et al. (2016)   |
| Disponibilidad                 | Ratio que indica la porción del tiempo en que un equipo o sistema está disponible, se calcula como $MTBF / (MTBF + MTTR)$   | Disponibilidad                     | Equipos o procesos | Mantenimiento | Parida et al. (2009)   |

|  |   |                         |                    |                               |                       |
|--|---|-------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Downtime                               | Tiempo en el cuál un equipo no es capaz de operar   | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos | Mantenimiento                 | Parida (2006)         |
| MTBF/MTBM                              | Tiempo medio entre fallos/Tiempo medio entre mantenimientos   | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos | Mantenimiento                 | Parida et al. (2009)  |
| MTTR                                   | Tiempo medio de reparación  | Indicadores de tiempo   | Equipos o procesos | Mantenimiento                 | Parida et al. (2009)  |
| Mantenibilidad                         | Función de distribución de probabilidad de que un equipo o sistema termine de ser reparado dentro de un intervalo de tiempo | Mantenibilidad          | Equipos o procesos | Mantenimiento                 |                       |
| Número de detenciones                  | Número de detenciones   | Número de detenciones   | Equipos o procesos | Mantenimiento                 | Parida (2006)         |
| OEE                                    | Eficiencia global de los equipos, se calcula como Disponibilidad x Desempeño x Calidad                                      | OEE                     | Equipos o procesos | Mantenimiento;<br>Operaciones | Parida (2006)         |
| Tareas de mantenimiento no planeadas   | Número de órdenes de trabajo no planeadas   | Órdenes de trabajo      | Equipos o procesos | Mantenimiento                 | Parida (2006)         |
| Tareas de mantenimiento planeadas      | Número de órdenes de trabajo planeadas  | Órdenes de trabajo      | Equipos o procesos | Mantenimiento                 | Parida (2006)         |
| Tasa de falla                          | Tasa de Falla   | Tasa de falla           | Equipos o procesos | Mantenimiento                 | Stegmaier et al. 2014 |
| Cambio % de empleados                  | Cambio porcentual en el total de empleados contratados  | Indicadores de personal | HSE & RRHH         | Finanzas                      | Kumar et al. (2013)   |
| Entrenamiento para mejorar habilidades | Capacitación  | Indicadores de personal | HSE & RRHH         | Recursos Humanos              | Parida (2006)         |
| Generación de nuevas ideas             | Número de ideas nuevas generadas  | Indicadores de personal | HSE & RRHH         | Recursos Humanos              | Parida (2006)         |
| Reclamos de empleados                  | Reclamos de empleados   | Indicadores de personal | HSE & RRHH         | Recursos Humanos              | Parida (2006)         |
| Retención de empleados                 | Retención de empleados  | Indicadores de personal | HSE & RRHH         | Recursos Humanos              | Parida (2006)         |
| Compensaciones pagadas                 | Número de compensaciones pagadas  | Indicadores HSE         | HSE & RRHH         | Recursos Humanos              | Parida (2006)         |
| Número de accidentes                   | Número de accidentes  | Indicadores HSE         | HSE & RRHH         | Recursos Humanos              | Parida (2006)         |
| Número de casos legales                | Número de casos legales   | Indicadores HSE         | HSE & RRHH         | Recursos Humanos              | Parida (2006)         |
| Reclamos HSE                           | Reclamos relacionados con HSE   | Indicadores HSE         | HSE & RRHH         | Recursos Humanos              | Parida (2006)         |

**Tabla B.2:** Recopilación de indicadores de mantenimiento adicionales

### B.1.3. Recopilación de indicadores de equipos o procesos de mantenimiento

| Grupo de Indicadores   | Cuenta de Indicador/(Factor) |
|--|------------------------------|
| <b>Indicadores de tiempo</b>   | <b>36</b>                    |
| Downtime   | 1                            |
| Horas-hombre de mantenimiento basado en condición                            | 1                            |
| Horas-hombre de mantenimiento correctivo                                     | 1                            |
| Horas-hombre de mantenimiento correctivo de urgencia                         | 1                            |
| Horas-hombre de mantenimiento planificado y programado                       | 1                            |
| Horas-hombre de mantenimiento por operario de producción                     | 1                            |
| Horas-hombre de mantenimiento preventivo                                     | 1                            |
| Horas-hombre de mantenimiento sistemático                                    | 1                            |
| Horas-hombre de personal interno directo de mantenimiento de instrumentación | 1                            |
| Horas-hombre de personal interno directo de mantenimiento eléctrico          | 1                            |
| Horas-hombre de personal interno directo de mantenimiento mecánico           | 1                            |
| Horas-hombre empleadas en mejora continua                                    | 1                            |
| Horas-hombre suplementarias de mantenimiento interno                         | 1                            |
| Horas-hombre totales de mantenimiento  | 1                            |
| Horas-hombre totales de personal de mantenimiento                            | 1                            |
| Horas-hombre totales de personal directo de mantenimiento                    | 1                            |
| Horas-hombre totales de personal interno de mantenimiento                    | 1                            |
| Horas-hombre totales de personal interno directo de mantenimiento            | 1                            |
| Horas-hombre totales planificadas y programadas para personal directo        | 1                            |

|  |          |
|--|----------|
| Horas-hombre totales trabajadas por el personal de mantenimiento                                       | 1        |
| Horas-hombre totales trabajadas por personal directo en actividades planificadas y programadas         | 1        |
| Horas-hombre utilizadas para planificar en un proceso de planificación de mantenimiento sistemático    | 1        |
| MTBF/MTBM  | 1        |
| MTTR   | 1        |
| Tiempo de disponibilidad conseguido durante el tiempo requerido  | 1        |
| Tiempo de indisponibilidad por fallos  | 1        |
| Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento   | 1        |
| Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento planificado y programado                                  | 1        |
| Tiempo de mantenimiento basado en condición que origina tiempo de indisponibilidad                     | 1        |
| Tiempo de mantenimiento planificado y programado que causa tiempo de indisponibilidad en la producción | 1        |
| Tiempo de mantenimiento preventivo que origina tiempo de indisponibilidad                              | 1        |
| Tiempo de mantenimiento sistemático que origina tiempo de indisponibilidad                             | 1        |
| Tiempo empleado en mantenimiento correctivo de urgencia  | 1        |
| Tiempo total de funcionamiento   | 1        |
| Tiempo total de indisponibilidad por mantenimiento   | 1        |
| Tiempo total de recuperación   | 1        |
| <b>Órdenes de trabajo</b>  | <b>6</b> |
| Número de órdenes de trabajo de mantenimiento  | 1        |
| Número de órdenes de trabajo de mantenimiento que causan tiempo de indisponibilidad                    | 1        |
| Número de órdenes de trabajo realizadas según programación   | 1        |
| Número total de órdenes de trabajo programadas   | 1        |

|  |          |
|--|----------|
| Tareas de mantenimiento planeadas                          | 1        |
| Tareas de mantenimiento no planeadas                       | 1        |
| <b>Número de detenciones</b>                               | <b>2</b> |
| Número total de fallos                                     | 1        |
| Número de detenciones                                      | 1        |
| <b>Disponibilidad</b>                                      | <b>1</b> |
| <b>Indicadores de sistemas</b>                             | <b>2</b> |
| Número de sistemas cubiertos por un análisis de criticidad | 1        |
| Número total de sistemas                                   | 1        |
| <b>Criticidad</b>  | <b>2</b> |
| FPD  | 1        |
| ICO  | 1        |
| <b>OEE</b>   | <b>1</b> |
| <b>Tasa de falla</b>                                       | <b>1</b> |
| <b>Confiabilidad</b>                                       | <b>1</b> |
| <b>Mantenibilidad</b>                                      | <b>1</b> |

**Tabla B.3:** Recopilación de indicadores de equipos o procesos

## B.2. Indicadores de Inventario de Repuestos

### B.2.1. Recopilación de indicadores de inventario de repuestos

| Indicador/ (Factor)                  | Definición   | Indicador/ Conjunto de Indicadores | Tipo de indicador  | Dpto       | Referencia  |
|--------------------------------------|--|------------------------------------|--------------------|------------|---|
| Compras de Emergencia                | Monto gastado en compra de emergencia de repuestos   | Compras de Emergencia              | Costos             | Inventario | DeWald (2011)   |
| Costo partes de repuesto             | Costo de adquirir parte de repuesto  | Costo partes de repuesto           | Costos             | Inventario | DeWald (2011)   |
| Costo de distribución                | Costo total de distribución que incluye costos de transporte y manejo  | Costos de logística                | Costos             | Inventario | Beamon (1999) Chan (2003)<br>Gunasekaran et al. (2004)  |
| Costo de transporte                  | Costo asociado a transporte  | Costos de logística                | Costos             | Inventario | Chan and Qi (2003) Gunasekaran et al. (2001)  |
| Costo total de logística             | Costo total asociado con logística, consiste en costo de gestión de órdenes, costo de adquisición, costos de envíos, financiamiento de la cadena de suministro, costos de planeación y otros | Costos de logística                | Costos             | Inventario | Cooke (2003) Gunasekaran et al. (2004) Stewart (1995)   |
| Costo de obsolescencia               | Costos asociados con inventario obsoleto   | Holding cost                       | Costos             | Inventario | Beamon (1999) Cooke (2003)<br>George (2002) Lee and Billington (1992)                             |
| Holding cost                         | Costo de mantener inventario, incluye costo de capital, seguros y costos por robo y deterioro  | Holding cost                       | Costos             | Inventario | Beamon (1999) George (2002)<br>Gunasekaran et al. (2001) Lee and Billington (1992) Stewart (1995) |
| Stock-out cost                       | Costo en el que se incurre cuando hay un desabastecimiento   | Stock-out cost                     | Costos             | Inventario | DeWald (2011)   |
| Costos de incentivos y subsidios     | Costos asociados con impuestos y subsidios   | Costos de incentivos y subsidios   | Datos adicionales  | Finanzas   | Chan (2003)   |
| Costo de producción por hora         | Costos, incluyendo fijos y variables, divididos por total de horas trabajadas  | Costos de producción               | Datos adicionales  | Producción | Cooke (2003) Gunasekaran et al. (2001)  |
| Calidad proveedor                    | Porcentaje de componentes descartados en reparaciones<br>Clasificación por: *Nivel de consumo (continuo o esporádico)  | Calidad proveedor                  | Equipos o procesos | Inventario | Chemweno (2015) DeWald (2011)   |
| Clasificación de partes de repuestos | *Comportamiento predecible *Costo de repuestos *Disponibilidad de proveedores  | Características partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario | Cavalieri (2008)  |
| Criticidad                           | Identificación del nivel de criticidad de un equipo o componente por métodos cuantitativos o cualitativos  | Características partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario | Cavalieri (2008) Schultz (2004)<br>Dhillon (2003) Gajpal (1994)<br>Cirillo (1990)                 |

|   |  |  |                    |               |  |
|---|--|--|--------------------|---------------|--|
| Número total de piezas de repuesto requeridas por mantenimiento | Requerimientos de partes de repuestos para las actividades de mantenimiento según planificación                                      | Demanda de partes de repuesto                | Equipos o procesos | Mantenimiento | UNE-EN 15341   |
| Eficiencia de reacondicionamiento de componentes                | Entre AGAN y ABAO dependiendo del tipo de reacondicionamiento afecta el TTF  | Eficiencia partes de repuesto                | Equipos o procesos | Inventario    | Chemweno (2015)  |
| Proceso imperfecto de reparación                                | Loops hasta terminar proceso de reparación   | Eficiencia partes de repuesto                | Equipos o procesos | Inventario    | Chemweno (2015)  |
| Facturas de materiales para equipos                             | Partes de equipos enterados / Total de partes de equipos   | Facturas de materiales para equipos          | Equipos o procesos | Finanzas      | DeWald (2011)  |
| Order lead-time   | Tiempo entre una orden y su correspondiente envío  | Lead time                                    | Equipos o procesos | Inventario    | Beamon (1999) Chan (2003) Chan et al. (2003) Ghalayini and Noble (1996) Gunasekaran et al. (2004) Stewart (1995)                 |
| Supplier lead-time  | Tiempo requerido entre ordenar un repuesto y recibir el repuesto de un proveedor   | Lead time                                    | Equipos o procesos | Inventario    | Gunasekaran et al. (2001) Gunasekaran et al. (2004)  |
| Nivel de servicio   | También llamado cycle service level (CSL), probabilidad de no quedarse sin stock en el periodo precedente al próximo ciclo           | Nivel de servicio                            | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011) K. Rosling (1999) G.J. Van Houtum, W. H. M Zijm (2000) F.Y. Chen, D. Krass (2001) DeWald (2011) Chan and Qi (2003) |
| Capacidad de Bodega Utilizada                                   | Capacidad utilizada como porcentaje de la capacidad total  | Rotación de inventario de partes de repuesto | Equipos o procesos | Producción    | Cooke (2003) Gunasekaran et al. (2001) Gunasekaran et al. (2004)   |
| Flujo de inventario   | Ratio entre el nivel de inventario y el tiempo de ciclo medio  | Rotación de inventario de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | Chan and Qi (2003)   |
| Inventario obsoleto   | Cantidad de inventario obsoleto como porcentaje del total de inventario  | Rotación de inventario de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | Cooke (2003) Neely et al. (1995)   |
| Rotación de inventarios   | El número de veces que los inventarios rota por año. Calculado como costo anual de ventas dividido por nivel de inventario promedio  | Rotación de inventario de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011) Cooke (2003) Cunningham and Fiume (2003) Emiliani (2003) Mattila et al. (2002) Taras (2002)                        |
| Slow Moving Parts   | Repuestos identificados como Slow Moving sobre el total de repuestos en inventario   | Rotación de inventario de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011)  |
| Total de dólares usados   | Gráfico de inventario utilizado en términos monetarios   | Rotación de inventario de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011)  |
| Valor medio de inventario de los artículos de mantenimiento     | Valor medio de inventario de los artículos de mantenimiento (piezas de repuestos, consumibles, materiales) en el periodo respectivo. | Rotación de inventario de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | UNE-EN 15341   |
| Valoración total de inventario                                  | Gráfico de valoración de inventario actual   | Rotación de inventario de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011) Chan et al. (2003) Cooke (2003) Cunningham and Fiume (2003) Neely et al. (1995) Stewart (1995)                     |
| Efectividad de ruta de entrega                                  | Porcentaje de ordenes satisfechas para órdenes de trabajo programadas  | Servicio de partes de repuesto               | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011) Stewart (1995)   |

|  |  |                                |                    |               |   |
|--|--|--------------------------------|--------------------|---------------|---|
| Errores de envío   | Número de envíos realizados con error  | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011) Beamon (1999) Chan (2003)   |
| Número de backorders   | Número de items en backorder debido a stock-outs   | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011) Beamon (1999) Chan (2003) Cooke (2003) Taras (2002)   |
| Número de piezas de repuesto suministradas por el almacén según petición | No necesita ser definido   | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Mantenimiento | UNE-EN 15341  |
| Número de stock outs   | Número de repuestos pedidos por mantenimiento que estaban fuera de stock                             | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011) Beamon (1999) Chan (2003) Chan and Qi (2003) Taras (2002)   |
| Órdenes perfectas  | Porcentaje de órdenes realizadas sin errores   | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | Cooke (2003) Lapide (2000) Taras (2002)   |
| Order fill rate  | Porcentaje de órdenes enviadas completas   | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | Chan (2003) Chan and Qi (2003) Cooke (2003) Lee and Billington (1992) Taras (2002)                              |
| Porcentaje de entregas a tiempo  | Porcentaje de órdenes satisfechas en o antes de la fecha requerida                                   | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011) Beamon (1999) Chan (2003) Cooke (2003) Cunningham and Fiume (2003) Emiliani (2003) Stewart (1995) |
| Precisión de entrada de órdenes  | Porcentaje de órdenes registradas sin error  | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | Taras (2002)  |
| Precisión de Inventario  | Conteo Actual / Balance Computarizado Actual   | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | DeWald (2011)   |
| Retraso promedio de órdenes  | Suma de los retrasos en horas/días/semanas de órdenes dividido por el número total de órdenes        | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | Beamon (1999) Chan et al. (2003)  |
| SKU fill rate  | Número de SKUs actualmente enviados a tiempo para una orden dividido por el número de SKU encargados | Servicio de partes de repuesto | Equipos o procesos | Inventario    | Beamon (1999) Chan et al. (2003) Mattila et al. (2002) Taras (2002)   |

**Tabla B.4:** Recopilación de indicadores de inventario de repuestos