

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

VALPARAÍSO – CHILE



“Estudio de metodologías aplicadas en el análisis de criticidad para la gestión de activos”

William Lázaro Aguilar Quiroz

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

-PROFESOR GUÍA: FREDY KRISTJANPOLLER

-PROFESOR CO-REFERENTE: MÓNICA LÓPEZ

Noviembre - 2015

I. Agradecimientos

En este momento tan importante de mi vida, quisiera agradecer a mis padres Guadalupe Quiroz Valladares y Hugo Aguilar Hernández, por apoyarme siempre, darme su amor, brindarme grandes oportunidades y que por su esfuerzo y dedicación en lo que hacen son un ejemplo a seguir para mí.

A mis amigos de Constitución y a los que conocí en la Universidad, por todos los momentos compartidos en distintas circunstancias, que me hacen considerarlos sin duda como mi familia y espero tenerlos siempre conmigo.

A mi polola, por ser mi gran compañera durante mi etapa universitaria, por su amor, y por todas las lindas experiencias que hemos vivido juntos.

A mi profesor guía Fredy Kristjanpoller, por ser cercano y siempre tener buena voluntad para ayudarme a realizar este trabajo.

II. Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio acerca del análisis de criticidad de activos, enfocándose principalmente en las metodologías que permiten llevarlo a cabo, relacionadas con impactos en producción en sectores industriales. Todo esto mediante la investigación de la literatura de distintos autores.

En este estudio se define el contexto en el cual se encuentra el análisis de criticidad dentro de la gestión de activos, junto con indicar algunos de los conceptos fundamentales del mantenimiento.

El objetivo del estudio es presentar un modelo de aplicación que detalle los pasos a seguir para llevar a cabo un análisis de criticidad dentro de una empresa, primordialmente en aquellas que son nuevas, que constituya una guía de acción y pueda influir positivamente en su rendimiento y rentabilidad.

Además, se presenta un análisis comparativo entre las nueve metodologías estudiadas, con el objetivo de facilitar la decisión sobre que metodología utilizar para efectuar la jerarquización de los activos de acuerdo al contexto operacional de la empresa, junto con dar una idea sobre aquellas metodologías que no sean conocidas por los analistas.

Por último, luego de estudiar cada una de las metodologías cabe mencionar que éstas no constituyen una herramienta uniforme para determinar la criticidad de instalaciones o equipos, es decir, éstas tienen una aplicación más efectiva en contextos operacionales similares a las cuales fueron creadas, es por esto que es importante analizar detenidamente cual o cuales se adecuan de mejor forma a los requerimientos de la empresa y realizar los ajustes que sean necesario según la metodología lo permita, a fin de obtener una jerarquización lo más exacta posible que sirva de una base sólida a los programas de mantenimientos derivados de este análisis y que serán implementados por la empresa.

III. Abstract

This current piece of work is a study of the asset criticality analysis, focussing in the main on the methodologies which allow for the asset criticality to take place as well as considering the impacts on production in the Industrial sector. Research has also been undertaken to review publications on the subject from various writers.

This study will define the context in which the asset criticality takes place, in terms of asset management, together with highlighting some of the fundamental maintenance concepts.

The purpose of this study is to present an application model which details the steps to be followed to carry out a asset criticality analysis, within a company, especially new ones, as this would serve as a useful action plan to positively impact on their production and profit.

Additionally a comparative analysis between the nine methodologies, which were studied, will be carried out so that the decision as to which methodology should be used to carry out the prioritisation of the asset, according to the operational context of the business. Consideration will also be given to other methodologies which may be unknown to the analysts.

Finally after studying each of these methodologies it is worth pointing out they are not a standard tool which can be used to determine the criticality of equipment or teams, in that they have best results in an operational context which is similar to that of the one they were created in. For that reason it is important to carefully analyse which best meet the needs of the business and then tailor those methodologies where possible, to establish the most exact order of prioritisation which will then serve as a solid base to support the maintenance programmes, resulting from the analysis, which will be implemented by the business.

IV. Índice de Contenidos

I. AGRADECIMIENTOS	2
II. RESUMEN	3
III. ABSTRACT	4
IV. ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	5
1 INTRODUCCIÓN	10
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo General	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3 MARCO TEÓRICO.....	13
3.1 ¿Qué es el Mantenimiento Industrial?	13
3.1.1 Las funciones del mantenimiento.....	13
3.1.2 Beneficios del mantenimiento.....	14
3.1.3 Evolución del mantenimiento.....	15
3.1.4 Tipos de mantenimiento.....	18
3.1.4.1 Mantenimiento correctivo	19
3.1.4.2 Mantenimiento preventivo	19
3.1.4.3 Mantenimiento predictivo	20
3.1.4.4 Mantenimiento productivo total (Total Productive Maintenance TPM).....	21
3.1.5 Modelos de Mantenimiento posibles.....	22
3.1.5.1 Modelo Correctivo.....	23
3.1.5.2 Modelo Condicional.....	23
3.1.5.3 Modelo Sistemático.....	23
3.1.5.4 Modelo de Alta disponibilidad	24
3.1.5.5 Modelo de Gestión de mantenimiento.	25
3.2 Enfoque del Mantenimiento Industrial: Confiabilidad Operacional.	29
3.2.1 El concepto de Confiabilidad	30
3.2.2 La definición de Confiabilidad Operacional	30

3.2.3	Beneficios de la Confiabilidad Operacional	31
3.2.4	Aplicación de la Confiabilidad Operacional	32
3.2.5	Herramientas de la Confiabilidad Operacional.....	33
4	ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	35
4.1	Objetivo del Análisis de Criticidad.....	35
4.2	Aplicaciones del Análisis de Criticidad	36
4.2.1	En el ámbito de mantenimiento	37
4.2.2	En el ámbito de inspección:	37
4.2.3	En el ámbito de materiales:	37
4.2.4	En el ámbito de disponibilidad de planta:	38
4.2.5	A nivel del personal:.....	38
4.3	El concepto de Riesgo.....	39
4.3.1	Técnicas de Análisis de Riesgo:	41
4.3.1.1	Técnicas cualitativas	41
4.3.1.2	Técnicas Semi- Cuantitativas	41
4.3.1.3	Técnicas Cuantitativas:	42
4.4	Información requerida.	42
4.5	Metodologías para el análisis de criticidad.....	43
4.5.1	Método del flujograma de análisis de criticidad	44
4.5.2	Modelo de criticidad CTR.....	48
4.5.3	Metodología D.S. de Análisis de Criticidad	53
4.5.4	Metodología HAZOP	57
4.5.5	Método de criticidad de Antony Ciliberti	62
4.5.5.1	PASO 1: Determinación del índice de criticidad en seguridad higiene y ambiente (ICSHA)	62
4.5.5.2	PASO 2. Índice de criticidad del proceso (ICP)	66
4.5.5.3	PASO 3. Índice de criticidad de la consecuencia	67
4.5.5.4	PASO 4. Índice Global de Riesgo.....	68
4.5.5.5	PASO 5: Clasificación de los equipos	70
4.5.6	Metodología Jack-Knife.....	71
4.5.7	Metodología MAFEC.....	74
4.5.8	Análisis RAM: Una metodología que permite determinar la criticidad de los activos.	80
4.5.8.1	Definición del Análisis RAM	80

4.5.8.2	Definición de los componentes del Análisis RAM	81
4.5.8.3	Modelo para realizar un análisis RAM.....	83
4.5.8.4	Resultados de un análisis RAM.....	87
4.5.9	Metodología de análisis basada en el cumplimiento de criterios del mantenimiento centrado en confiabilidad.....	88
5	PROPUESTAS RELACIONADAS AL ANÁLISIS DE CRITICIDAD	94
5.1	Primera Propuesta: Modelo para efectuar un análisis de criticidad	94
5.2	Segunda Propuesta: Análisis Comparativo de las Metodologías de Criticidad enfocadas al Impacto en Producción.....	104
5.3	Análisis de las propuestas realizadas	114
6	CONCLUSIONES.....	117
7	REFERENCIAS.....	120

Índice de Tablas.

Tabla 3-1: Generaciones del Mantenimiento.....	17
Tabla 4-1: Matriz de Criticidad Definida por metodología D.S.....	55
Tabla 4-2: Parámetros para establecer criticidad según metodología D.S.	57
Tabla 4-3: Ejemplo de palabras guías y sus posibles desviaciones.....	60
Tabla 4-4: Formato presentación análisis HAZOP.	61
Tabla 4-5: Clasificación Otros Riesgos.....	64
Tabla 4-6: Factor de reducción de riesgos.....	65
Tabla 4-7: Factor de mitigación de riesgos FMSHA.....	65
Tabla 4-8: Factor de criticidad del proceso.	66
Tabla 4-9: Factor de respaldo de proceso (FRP).....	67
Tabla 4-10: Matriz de valores del índice de criticidad de la consecuencia.....	67
Tabla 4-11: Matriz del índice global de criticidad basado en riesgo.....	69
Tabla 4-12: Condición del equipo según su índice de criticidad basado en riesgo.....	70
Tabla 4-13: Plantilla de la descomposición de máquina.....	75
Tabla 4-14: Individualización de los modos de falla y cuantificación de la criticidad y sus efectos.....	76
Tabla 4-15: Análisis de la causa de falla e individualización del componente crítico.....	76
Tabla 4-16: Explicación Componentes de la Sección A.....	77
Tabla 4-17: Explicación de los componentes de la Sección B.....	78
Tabla 4-18: Valores de criticidad para procesos de distinta índole.....	79
Tabla 4-19: Plantilla MAFEC del plan de mantenimiento productivo.....	80
Tabla 4-20: Formato para la recolección de datos del sistema.....	91
Tabla 4-21: Factor de velocidad de manifestación de la falla.....	91
Tabla 4-22: Factor de seguridad del personal y del ambiente.....	92
Tabla 4-23: Factor de costos de paro de producción.....	92
Tabla 4-24: Factor de costos de reparación.....	93
Tabla 4-25: Índice de criticidad en función de la ponderación global.....	93
Tabla 5-1: Resumen Metodologías a utilizar para efectuar Análisis de Criticidad.....	101
Tabla 5-2: Análisis Metodología Flujograma de Parra & Crespo.....	105
Tabla 5-3: Análisis Metodología CTR (Criticidad Total por Riesgo).....	106
Tabla 5-4: Análisis Metodología D.S (Diógenes Suarez).....	107
Tabla 5-5: Análisis Metodología HAZOP.....	108
Tabla 5-6: Análisis Metodología Criticidad de Antony Ciliberti.....	109
Tabla 5-7: Análisis Metodología Jack Knife.....	110
Tabla 5-8: Análisis Metodología MAFEC.....	111
Tabla 5-9: Análisis Metodología RAM.....	112
Tabla 5-10: Análisis Metodología Criticidad basada en M.C.C.....	113

Índice de Ilustraciones.

Ilustración 3-1: Tipos de Mantenimiento	18
Ilustración 3-2: Modelos de mantenimiento que pueden ser aplicados.....	22
Ilustración 3-3: Modelo del proceso de gestión del mantenimiento.....	26
Ilustración 3-4: Factores para lograr la Competitividad Organizacional.	29
Ilustración 3-5: Componentes de la Confiabilidad Operacional.	31
Ilustración 3-6: Herramientas de la Confiabilidad Operacional.....	33
Ilustración 4-1: Aplicaciones del Análisis de Criticidad.....	36
Ilustración 4-2: Componentes del Riesgo.....	40
Ilustración 4-3: Ejemplo método del flujograma para Análisis de Criticidad.....	44
Ilustración 4-4: Pasos para efectuar metodología CTR	51
Ilustración 4-5: Representación Matriz de criticidad del método CTR.....	52
Ilustración 4-6: Parámetros a evaluar por la metodología D.S.....	54
Ilustración 4-7: Pasos para realizar un análisis de criticidad bajo la Metodología D.S	56
Ilustración 4-8: Etapas para realizar un Análisis de Criticidad con Metodología HAZOP..	58
Ilustración 4-9: Pasos para efectuar análisis de criticidad con Metodología de Antony Ciliberti.....	62
Ilustración 4-10: Norma NFPA 704.	63
Ilustración 4-11: Nomenclatura índice global de criticidad.	68
Ilustración 4-12: Ejemplo de Diagrama Jack-Knife.....	73
Ilustración 4-13: Modelo para efectuar un Análisis RAM	84
Ilustración 4-14: Pasos para llevar a cabo método de criticidad basado en M.C.C.....	90
Ilustración 5-1: Pasos para efectuar un análisis de criticidad.....	95
Ilustración 5-2: Parte 1- Modelo para efectuar Análisis de Criticidad.....	96
Ilustración 5-3: Parte 2 - Modelo para efectuar un Análisis de criticidad.....	97
Ilustración 5-4: Ejemplo de Agrupación de activos.	98

1 Introducción

La gestión del mantenimiento se ha convertido en uno de los grandes desafíos de las empresas, debido al aumento de la competitividad ocasionada por la globalización de los mercados, que ha llevado a las compañías a cumplir con estándares de calidad y al mismo tiempo mantener los altos niveles de productividad.

Los ejecutivos han entendido la importancia de la gestión dentro de sus empresas, es por esto que diariamente dedican sus esfuerzos en planes y estrategias que permitan optimizar y mejorar importantes procesos a nivel de costos, el cual constituye uno de los factores decisivos de la existencia de una empresa.

El mantenimiento permite que las empresas sean competitivas, la idea de éste es aumentar la disponibilidad, reducir distintos tipos de costos, aumentar la productividad, teniendo en cuenta la seguridad, el medioambiente y los requerimientos de la empresa, todo esto para mejorar la rentabilidad.

Es por esto que el mantenimiento está en una constante búsqueda de tareas y herramientas que permitan minimizar la ocurrencia de fallas y disminuir el impacto de las consecuencias de éstas. Para lo cual sea necesario el análisis de criticidad que es una metodología que permite establecer jerarquía entre las instalaciones, sistemas o equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones, direccionando los esfuerzos y recursos de las áreas donde se necesita mejorar la confiabilidad operacional, bajo la premisa de que las empresas no cuentan con recursos ilimitados.

El propósito de este trabajo es estudiar las metodologías que son utilizadas en la jerarquización de activos enfocadas al impacto en producción, con el fin de generar un modelo que pueda ser aplicado por empresas nuevas o empresas que no estén teniendo un rendimiento óptimo, las cuales bajo sus condiciones operacionales puedan mejorar su gestión de mantenimiento, al mismo tiempo llevarlas a ser más competitivas y rentables.

El diseño de la investigación comienza primero con el estudio del mantenimiento, en donde se incluye la definición de éste, las funciones, los beneficios, la evolución, los tipos y modelos de mantenimiento. Luego se continúa con la confiabilidad operacional con su definición, beneficios, áreas de aplicaciones y herramientas. Seguido de esto se desarrolla el concepto del análisis de criticidad donde se estudia su definición, objetivos, aplicaciones, relación con el concepto de riesgo, información requerida y la descripción de las metodologías para efectuarlo.

Por último se presentan dos propuestas, una donde se incluye un modelo para realizar un análisis de criticidad y la segunda de un análisis comparativo entre las metodologías descritas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar una propuesta para la implementación de análisis de criticidad en procesos productivos de sectores industriales intensivos en el uso de activos.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar los principales componentes del mantenimiento industrial.
- Definir el análisis de criticidad dentro de la gestión de activos.
- Investigar sobre las distintas metodologías aplicadas en el análisis de criticidad, enfocadas principalmente a los impactos en producción.
- Presentar propuestas relacionadas al uso de las metodologías estudiadas.

3 Marco teórico

3.1 ¿Qué es el Mantenimiento Industrial?

El mantenimiento se define como el conjunto de técnicas destinadas a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible, buscando la más alta disponibilidad y con el máximo rendimiento (Sanzol, 2010).

El mantenimiento industrial engloba las técnicas y sistemas que permiten prever las averías, efectuar revisiones, engrases y reparaciones eficaces, dando a la vez normas de buen funcionamiento a los operadores de las máquinas, a sus usuarios, y contribuyendo a los beneficios de la empresa. Es un órgano de estudio que busca lo más conveniente para las máquinas, tratando de alargar su vida útil de forma rentable para el usuario.

3.1.1 Las funciones del mantenimiento

Dentro de las funciones del mantenimiento existen distintos factores que van a resultar relevantes para su éxito, en los cuales se puede mencionar el tipo de industria, el tamaño, las políticas de la empresa, características de producción, entre otras. Por lo tanto dependiendo del tipo de departamento de mantenimiento, Gómez (1998) establece algunos de los objetivos del mantenimiento:

- Mantener los equipos e instalaciones en condiciones operativas, eficaces y seguras.
- Efectuar un control del estado de los equipos así como de su disponibilidad.
- Realizar los estudios necesarios para reducir el número de averías imprevistas.
- En función de los datos históricos disponibles, efectuar una previsión de los repuestos de almacén necesarios.

- Intervenir en los proyectos de modificación del diseño de equipos e instalaciones.
- Llevar a cabo aquellas tareas que implican la modificación o reparación de los equipos o instalaciones.
- Asesor a los mandos de producción.
- Velar por el correcto suministro y distribución de energía.
- Realizar el seguimiento de los costes de mantenimiento.
- Preservación de locales, incluyendo la protección contra incendios.
- Gestión de almacenes, residuos y desechos.
- Proveer el adecuado equipamiento al personal de la instalación.

3.1.2 Beneficios del mantenimiento

Realizar mantenimiento va a generar beneficios, que van a estar condicionados al nivel con el que se realiza éste, el tipo y tamaño de empresa, y la importancia que se le otorga dentro de la organización, por lo tanto algunos de los beneficios encontrados se mencionan a continuación:

- Confiabilidad, los equipos operan en mejores condiciones de seguridad, ya que se conoce su estado, y sus condiciones de funcionamiento.
- Fiabilidad en el cumplimiento y mejoramiento de las metas de producción, garantizada por una mayor disponibilidad de los equipos.
- Disminución del tiempo de parada de equipos/máquinas.
- Reducción significativa de los costos de las reparaciones, gracias a la disminución de trabajos de emergencia e incidentes repentinos.

- Estandarización de la calidad de los productos gracias a la conservación de los parámetros de los equipos.
- Utilización racional y programada de los recursos disponibles.
- Disminución de accidentes, reduciendo el nivel de riesgo para el personal.
- Prolongación de la vida útil de equipos y máquinas.
- Optimización de los tiempos de producción y aumento de la productividad de planta.

3.1.3 Evolución del mantenimiento

A lo largo de la historia el mantenimiento ha ido progresando en distintas etapas. Desde el punto de vista práctico del mantenimiento, se diferencian enfoques de mejoras prácticas aplicadas cada una en épocas determinadas. A nivel de mantenimiento industrial se habla de cinco generaciones de mantenimiento, donde cada una representa una evolución de la anterior, aunque las últimas coexisten en el tiempo. Las generaciones se presentan a continuación bajo la definición de García (2010):

A partir de la Primera Guerra Mundial, y con la introducción de la producción en serie (iniciada por Ford¹) cuando las máquinas se fueron haciendo más complejas y la dedicación a tareas de reparación aumentaba, empezaron a crearse los primeros talleres de mantenimiento, cuyo personal tenía una dedicación exclusiva a la reparación de averías y tenía una actividad diferenciada de los operarios de producción. Las tareas también en esta época eran básicamente correctivas, dedicando todo su esfuerzo a solucionar las fallas que se producían en los equipos.

¹ Henry Ford. Empresario norteamericano (Dearborn, Michigan, 1863-1947).

Durante la Segunda Guerra Mundial aparece lo que se conoce como la Segunda Generación de mantenimiento. La exigencia de una mayor continuidad en la producción obliga a desarrollar formas de aumentar la disponibilidad de las máquinas, y se forma entonces el concepto de mantenimiento preventivo sistemático. Los departamentos de mantenimiento buscan no sólo solucionar las fallas que se producen en los equipos, sino, sobre todo, prevenirlas, actuar para que no se produzcan, mediante actuaciones preventivas de carácter periódico que se planifican con antelación.

Un poco más tarde, en los años 80 y tras atravesar una grave crisis energética en el 73, empieza a concebirse el concepto de fiabilidad, y con él, la Tercera Generación de mantenimiento. La aviación y la industria automovilística lideran esta nueva corriente. Se desarrollan nuevos métodos de trabajo que hacen avanzar las técnicas de mantenimiento en varias vertientes.

La denominada cuarta generación del mantenimiento nace en los años 90, de la mano del World Class Management. El objetivo es la competitividad, y busca el desarrollo de métodos de trabajos eficaces y eficientes.

La quinta generación del mantenimiento está centrada en la terotecnología. Esta palabra, derivada del griego, significa el estudio y gestión de la vida de un activo o recurso desde el mismo comienzo hasta su propio final. Integra prácticas gerenciales, financieras, de ingeniería, de logística y de producción a los activos físicos buscando costes de ciclo de vida (CCV) económicos. Es aplicable en todo tipo de industria y proceso. El objetivo principal de su aplicación es mejorar y mantener la efectividad técnica y económica de un proceso o equipo a lo largo de todo su ciclo de vida. Combina experiencia y conocimiento

para lograr una visión holística² del impacto del mantenimiento sobre la calidad de los elementos que constituyen un proceso de producción, y para producir continuamente mejoras tanto técnicas como económicas.

Tabla 3-1: Generaciones del Mantenimiento.

Generación	Época en que aparece	Principales fundamentos
Primera generación	Desde el inicio de la Revolución Industrial	Mantenimiento correctivo puro
Segunda generación	A partir de la Segunda Guerra Mundial	Mantenimiento preventivo sistemático
Tercera generación	Década de los 80	Mantenimiento predictivo o por condición Análisis de fallos RCM TPM
Cuarta generación	Década de los 90	World Class Management y la eficacia en la gestión
Quinta generación	Siglo XXI	Terotecnología. Visión técnico económica de los activos y del coste del ciclo de vida

Fuente: La contratación del mantenimiento industrial, (García, 2009)

² Visión Holística: Consiste en tener una visión global, en considerar un sistema, organización o individuo como un todo, para comprender como funcionan sus partes entre sí.

3.1.4 Tipos de mantenimiento

Según Abella (2008), existen variados sistemas para manejar el servicio de mantenimiento de las instalaciones en operación. Algunos de ellos no solamente centran su atención en la tarea de corregir los fallos, sino que también tratan de actuar antes de la aparición de los mismos haciéndolo tanto sobre los bienes, tal como fueron concebidos, como sobre los que se encuentran en etapa de diseño, introduciendo en estos últimos, las modalidades de simplicidad en el diseño, diseño robusto, análisis de su mantenibilidad, diseño sin mantenimiento, entre otras.

Algunos tipos de mantenimiento que se pueden mencionar se muestran a continuación:



Ilustración 3-1: Tipos de Mantenimiento

Fuente: Elaboración Propia

3.1.4.1 Mantenimiento correctivo

Para Abella (2008) es el conjunto de actividades de reparación y sustitución de elementos deteriorados por repuestos que se realiza cuando aparece el fallo.

Este sistema resulta aplicable en sistemas complejos, normalmente componentes electrónicos o en los que es imposible predecir los fallos y en los procesos que admiten ser interrumpidos en cualquier momento y durante cualquier tiempo, sin afectar la seguridad. También para equipos que ya cuentan con cierta antigüedad.

Dentro de los inconvenientes que tiene este tipo de mantenimiento se puede mencionar que el fallo puede acontecer en cualquier momento. Además, los fallos no detectados a tiempo, ocurridos en partes cuyo cambio hubiera resultado de escaso coste, pueden causar daños importantes en otros elementos o piezas relacionados que se encontraban en buen estado de uso y conservación.

Por último otro inconveniente es que se debe disponer de un capital importante invertido en piezas de repuesto.

3.1.4.2 Mantenimiento preventivo

Abella (2008) lo define como el conjunto de actividades programadas con anticipación, tales como inspecciones regulares, pruebas, reparaciones, etc., enfocadas a reducir la frecuencia y el impacto de los fallos de un sistema. Las desventajas que presenta este sistema son:

Cambios innecesarios: al alcanzarse la vida útil de un elemento se procede a su cambio, encontrándose muchas veces que el elemento que se cambia permitiría ser

utilizado durante un tiempo más prolongado. En otros casos, se puede dar un reemplazo o cambio prematuro.

Mantenimiento no efectuado: · si por alguna razón, no se realiza un servicio de mantenimiento previsto, se alteran los períodos de intervención y se produce una degeneración del servicio. Por lo tanto, la planificación para la aplicación de este sistema consiste en:

- Definir qué partes o elementos serán objeto de este mantenimiento
- Establecer la vida útil de los mismos
- Determinar los trabajos a realizar en cada caso
- Agrupar los trabajos según época en que deberán efectuarse las intervenciones.

3.1.4.3 Mantenimiento predictivo

Para Abella (2008) es el conjunto de actividades de seguimiento y diagnóstico continuo (monitorización) de un sistema, que permiten una intervención correctora inmediata como consecuencia de la detección de algún síntoma de fallo.

El mantenimiento predictivo se basa en el hecho de que la mayoría de los fallos se producen lentamente y previamente, en algunos casos, arrojan indicios evidentes de un futuro fallo, bien a simple vista, o bien mediante la monitorización, es decir, mediante la elección, medición y de algunos parámetros relevantes que representen el buen funcionamiento del equipo analizado. Por ejemplo, estos parámetros pueden ser: la temperatura, la presión, la velocidad lineal, la velocidad angular, la resistencia eléctrica, los

ruidos y vibraciones, la rigidez dieléctrica, la viscosidad, el contenido de humedad, de impurezas y de cenizas en aceites aislantes, el espesor de chapas, el nivel de un fluido, etc.

En otras palabras, con este método, se trata de seguir la evolución de los futuros fallos. Este sistema tiene la ventaja de que el seguimiento permite contar con un registro de la historia de la característica en análisis, sumamente útil ante fallos repetitivos; puede programarse la reparación en algunos casos, junto con la parada programada del equipo y existen menos intervenciones de la mano de obra en mantenimiento.

3.1.4.4 Mantenimiento productivo total (Total Productive Maintenance TPM)

Según Abella (2008) este sistema está basado en la concepción japonesa del "Mantenimiento al primer nivel", en la que el propio usuario realiza pequeñas tareas de mantenimiento como: reglaje, inspección, sustitución de pequeñas cosas, etc., facilitando al encargado de mantenimiento la información necesaria para que luego las otras tareas se puedan hacer mejor y con mayor conocimiento de causa.

Este sistema coloca a todos los integrantes de la organización en la tarea de ejecutar un programa de mantenimiento preventivo, con el objetivo de maximizar la efectividad de los bienes. Centra el programa en el factor humano de toda la compañía, para lo cual se asignan tareas de mantenimiento que deben ser realizadas en pequeños grupos, mediante una dirección motivadora.

Su nombre proviene de la siguiente clasificación:

- **Mantenimiento:** Para mantener siempre las instalaciones en buen estado
- **Productivo:** Está enfocado a aumentar la productividad
- **Total:** Implica a la totalidad del personal, (no solo al servicio de mantenimiento)

3.1.5 Modelos de Mantenimiento posibles.

Existen distintos modelos de mantenimiento que pueden ser aplicados, en los cuales se incluyen varios de los tipos de mantenimiento. Cabe mencionar que todos ellos contienen dos actividades que son: inspecciones visuales y lubricación. Dentro de los modelos que se van a mencionar más adelante se encuentra el modelo de gestión de mantenimiento, pudiéndose encontrar distintas variaciones de éste en la literatura según el enfoque del autor, pero que principalmente propone los cimientos para llevar un control del mantenimiento, estableciendo las bases que van a permitir obtener una correcta evaluación, eficacia y eficiencia. A continuación se muestran los modelos de mantenimiento y su respectiva descripción:

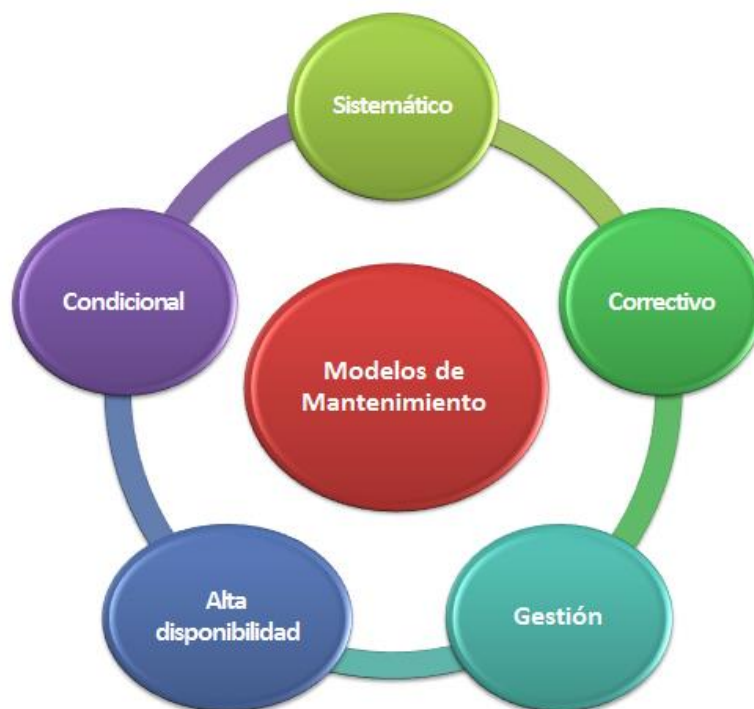


Ilustración 3-2: Modelos de mantenimiento que pueden ser aplicados.

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.5.1 Modelo Correctivo

García (2010) establece que este modelo es el más básico, e incluye, además de las inspecciones visuales y las lubricaciones, la reparación de averías que surjan. Es aplicable a equipos con el más bajo nivel de criticidad, cuyas averías no suponen ningún problema, ni económico ni técnico. En este tipo de equipos no es rentable dedicar mayores recursos ni esfuerzos.

3.1.5.2 Modelo Condicional

Según García (2010) este modelo incluye las actividades del modelo correctivo, y además, la realización de una serie de pruebas o ensayos que condicionarán una actuación posterior. Si tras las pruebas se descubre una anomalía, se programara una intervención; si por el contrario, todo es correcto, no se actuara sobre el equipo.

Este modelo de mantenimiento es válido en aquellos equipos de poco uso, o equipos que a pesar de ser importantes en el sistema productivo su probabilidad de fallo es baja.

3.1.5.3 Modelo Sistemático

García (2010) indica que este modelo incluye un conjunto de tareas que se realizaran sin importar cuál es la condición del equipo; además de realizar algunas mediciones y pruebas para decidir si se efectuaran otras tareas de mayor envergadura; y por último, se resolverá las averías que surjan. Es un modelo de gran aplicación en equipos de disponibilidad media, de cierta importancia en el sistema productivo y cuyas averías causan algunos trastornos. Es importante señalar que un equipo sujeto a un modelo de mantenimiento sistemático no tiene por qué tener todas sus tareas con una periodicidad fija.

Simplemente, un equipo con este modelo de mantenimiento puede tener tareas sistemáticas, que se realicen sin importar el tiempo que lleva funcionando o el estado de los elementos sobre los que se trabaja.

3.1.5.4 Modelo de Alta disponibilidad

Según García (2010) este es el modelo más exigente y exhaustivo de todos. Se aplica en aquellos equipos que bajo ningún concepto pueden sufrir una avería o un mal funcionamiento. Son equipos a los que se exige, además, unos niveles de disponibilidad altísimos, por encima del 90%. La razón de un nivel tan alto de disponibilidad es, en general, el alto coste en producción que tiene una avería. Con una exigencia tan alta no hay tiempo para el mantenimiento que requiera de parada de equipo (correctivo, preventivo sistemático). Para mantener estos equipos es necesario emplear técnicas de mantenimiento predictivo, que permiten conocer el estado del equipo con él en marcha, y a paradas programadas, que supondrían una revisión general completa, con una frecuencia generalmente anual o superior. En esta revisión se sustituyen, en general, todas aquellas piezas sometidas a desgaste o con probabilidad de fallo a lo largo del año (piezas con una vida inferior a dos años). Estas revisiones se preparan con gran antelación, y no tiene por qué ser exactamente iguales años tras año.

3.1.5.5 Modelo de Gestión de mantenimiento.

La moderna gestión del mantenimiento incluye todas aquellas actividades destinadas a determinar objetivos y prioridades de mantenimiento, las estrategias y las responsabilidades. Todo ello facilita la planificación, programación y control de la ejecución del mantenimiento, buscando siempre una mejora continua y teniendo en cuenta aspectos económicos relevantes para la organización. Una adecuada gestión del mantenimiento, teniendo en cuenta el ciclo de vida de cada activo físico, debe cumplir con los objetivos de reducir los costos globales de la actividad productiva, asegurar el buen funcionamiento de los equipos y sus funciones, disminuir al máximo los riesgos para las personas y los efectos negativos sobre el medio ambiente, generando, además, procesos y actividades que soporten los objetivos mencionados.

Existen varias propuestas de modelos para la gestión de mantenimiento, dentro de las cuales se puede mencionar el modelo genérico de gestión de mantenimiento (Parra & Crespo, 2012) que ofrece dos ideas fundamentales para su modelo de mantenimiento las cuáles son:

1. El proceso de gestión del mantenimiento tiene un curso de acción, es decir, varios pasos a seguir.
2. El marco general de referencia para la gestión del mantenimiento, es decir, la estructura básica de soporte, está constituida por una serie de herramientas que conforman un sistema para la gestión avanzada del mantenimiento.

Con esto el modelo propuesto queda de la siguiente manera:

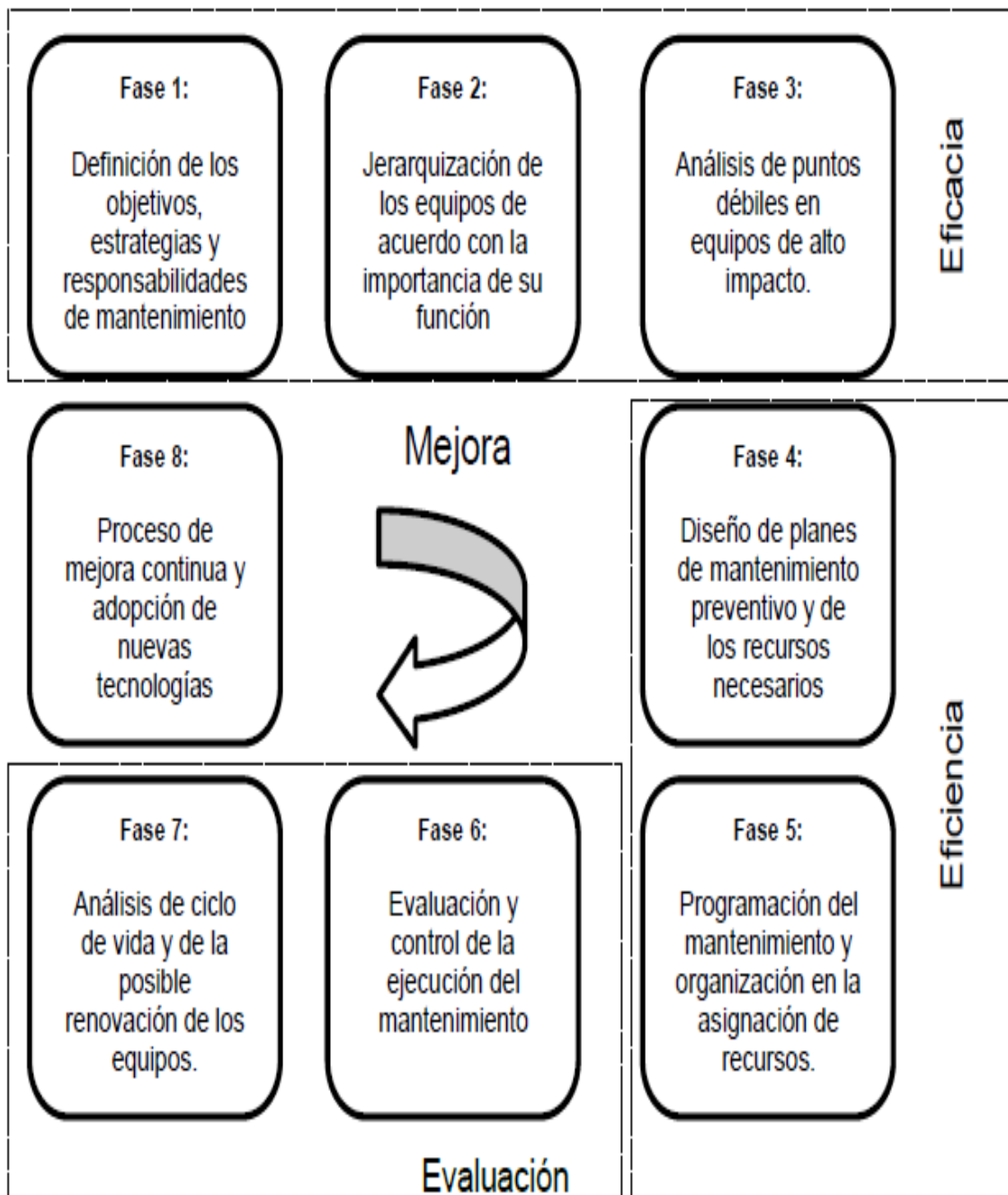


Ilustración 3-3: Modelo del proceso de gestión del mantenimiento.

Fuente: Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos, (Parra & Crespo, 2012)

A continuación, se presentan comentarios de manera breve de cada una de las fases propuestas por el modelo:

Fase 1: *Definición de los objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento.* En esta fase se pretende que se definan los objetivos a corto, medio y largo plazo del departamento de mantenimiento, así como los indicadores que medirán la consecución de los mismos. Un aspecto importante de esta fase es que permite no sólo conocer los objetivos del departamento dentro del mismo, sino que también presentar los objetivos a los gestores de la empresa, facilitando las negociaciones de presupuestos, paradas programadas, etc.

Fase 2: *Jerarquización de los equipos de acuerdo con la importancia de su función.* Esta fase se relaciona con conocer los equipos críticos dentro de la organización y que estén relacionados con los criterios y objetivos definidos en la Fase I. El resultado de esta fase será una clasificación de equipos o áreas según su nivel de criticidad, que permita establecer la mejor estrategia para alcanzar los objetivos anteriormente definidos.

Fase 3: *Análisis de los puntos débiles en equipos de alto impacto.* Posterior a realizar la clasificación de los equipos la primera tarea será enfocarse en los equipos cuyos fallos tienen un alto impacto sobre el proceso. Para realizar esto, se analizarán los fallos más importantes de estos equipos y se deberá establecer una estrategia para controlarlos.

Fase 4: *Diseño de planes de mantenimiento preventivo y de los recursos necesarios.* Luego de analizar los fallos más urgentes, se procederá a establecer el plan de mantenimiento atendiendo a la criticidad de los equipos, así como se definirán los recursos que este plan necesita.

Fase 5: *Programación del mantenimiento y optimización de la asignación de los recursos.* Posterior a los planes de mantenimiento redactados, el siguiente paso es programarlos en el tiempo y minimizar los costes de mantenimiento.

Fase 6: *Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento.* En esta fase se evalúa la ejecución del programa de mantenimiento y se establecen las posibles mejoras a implementar en el caso de ser necesario.

Fase 7: *Análisis de ciclo de vida y de la posible renovación de los equipos.* Luego de establecida la estrategia y la política de mantenimiento, hay que analizar el impacto de ésta en sus equipos, así como la posible renovación de los mismos, atendiendo a criterios económicos y de impacto en la confiabilidad.

Fase 8: *Implementación del proceso de mejora continua y adopción de nuevas tecnologías.* Esta fase es realizada cuando se tiene un proceso exitoso de los pasos anteriores, básicamente indica que la empresa está en constante búsqueda de la calidad, por lo tanto busca soluciones innovadoras que permitan mejorar sus planes y programas de mantenimiento.

3.2 Enfoque del Mantenimiento Industrial: Confiabilidad Operacional.

La gestión del mantenimiento incluye una serie de estrategias alineadas con la misión del negocio, cuyo objetivo principal es lograr la competitividad organizacional³.

Donde existen los siguientes factores que son claves para alcanzar ésta:



Ilustración 3-4: Factores para lograr la Competitividad Organizacional.

Fuente: Elaboración Propia

Cada uno de estos factores incidirá de cierta forma en el éxito de la organización dependiendo principalmente del contexto en el cual se esté operando. Por lo tanto es de vital importancia estar controlando y mejorando cada uno de éstos constantemente.

³ La competitividad organizacional es la capacidad que tiene una empresa para desarrollar y mantener sistemáticamente unas ventajas comparativas que le permitan mantener una posición destacada en el entorno en que actúa. (Ríos & Sanchez, 1997).

3.2.1 El concepto de Confiabilidad

García (2012) define la Confiabilidad de un sistema o un equipo, como la probabilidad que dicha entidad pueda operar durante un determinado periodo de tiempo sin pérdida de su función. El fin último del análisis de confiabilidad de los activos físicos es cambiar las actividades reactivas y correctivas, no programadas y altamente costosas, por acciones preventivas planeadas que dependan de análisis objetivos, situación actual e historial y permitan un adecuado control de procesos.

3.2.2 La definición de Confiabilidad Operacional

La Confiabilidad Operacional se define como una serie de procesos de mejora continua, avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial. La confiabilidad operacional lleva implícita la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un específico contexto operacional (Huerta, 2000).

Resulta relevante destacar que en un sistema de confiabilidad operacional es necesario realizar el análisis de sus cuatro parámetros operativos: confiabilidad humana, confiabilidad de los procesos, mantenibilidad y confianza de los equipos; sobre los cuales se debe actuar si se quiere un mejoramiento continuo y de largo plazo. Estos cuatro elementos se muestran a continuación:

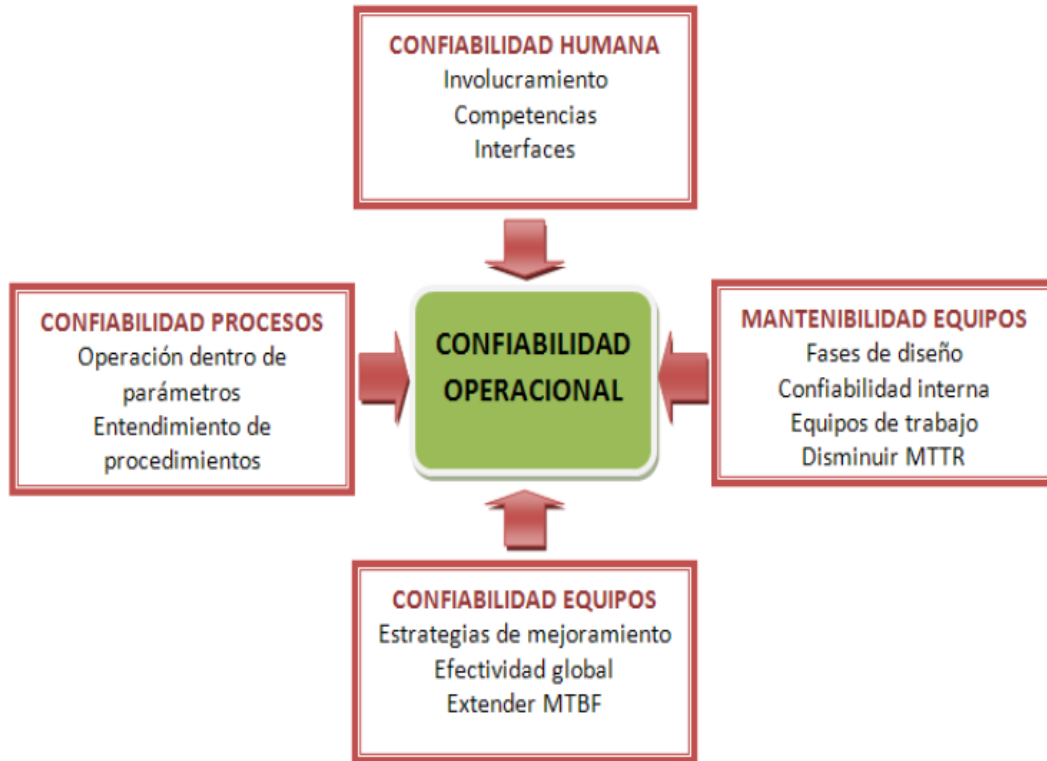


Ilustración 3-5: Componentes de la Confiabilidad Operacional.

Fuente: Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad Operacional en Plantas Industriales (Arata, 2009)

3.2.3 Beneficios de la Confiabilidad Operacional

Entre los beneficios que se pueden obtener con la implementación de un Sistema integrado de Confiabilidad Operacional a nivel corporativo se pueden mencionar (Espinoza & Salinas, 2011):

- Aumento de las utilidades por continuidad en la producción.
- Reducción del tiempo y optimización de la frecuencia, de las paradas programadas y no programadas.
- Integración de la gestión de operaciones de mantenimiento y producción.

- Detección precoz de fallas y optimización de las frecuencias de ejecución de acciones de mantenimiento.
- Aumento de la disponibilidad de los activos e instalaciones, mediante mejora continua.
- Solución definitiva de múltiples problemas, al identificar y encauzar las fallas en su causa raíz.
- Incremento en la calidad de los procesos y servicios, sobre la base de análisis de los procedimientos y acuerdos mutuos.
- Mejora de la Gestión del Conocimiento de los procesos y estrategias propias de la organización.
- Posicionamiento a nivel global, con el uso de las mejores prácticas de mantenimiento de las empresas de categoría mundial.

3.2.4 Aplicación de la Confiabilidad Operacional

Según Espinoza & Salinas (2011), las estrategias de Confiabilidad Operacional se usan ampliamente en casos relacionados con:

- Elaboración de los planes y programas de mantenimiento e inspección de equipos en instalaciones industriales.
- Solución de problemas recurrentes en los activos fijos que afectan los costos y la efectividad de las operaciones.
- Determinación de las tareas que permitan minimizar riesgos en los procesos, equipos e instalaciones, y medio ambiente.
- Establecer procedimientos operacionales y prácticas de trabajo seguro.
- Determinar el alcance y frecuencia óptima de paradas de plantas.

3.2.5 Herramientas de la Confiabilidad Operacional

La confiabilidad como metodología de análisis debe soportarse en una serie de herramientas que permitan evaluar el comportamiento del activo de una forma sistemática a fin de poder determinar el nivel de operatividad, la cuantía del riesgo y las demás acciones de mitigación que se requieren, para asegurar su integridad y continuidad operacional.

Son múltiples las herramientas de que se sirve la confiabilidad con el fin de formular planes estratégicos para lograr la excelencia en las actividades de mantenimiento. Según García (2012) las que se muestran a continuación son de las más usadas en la literatura:

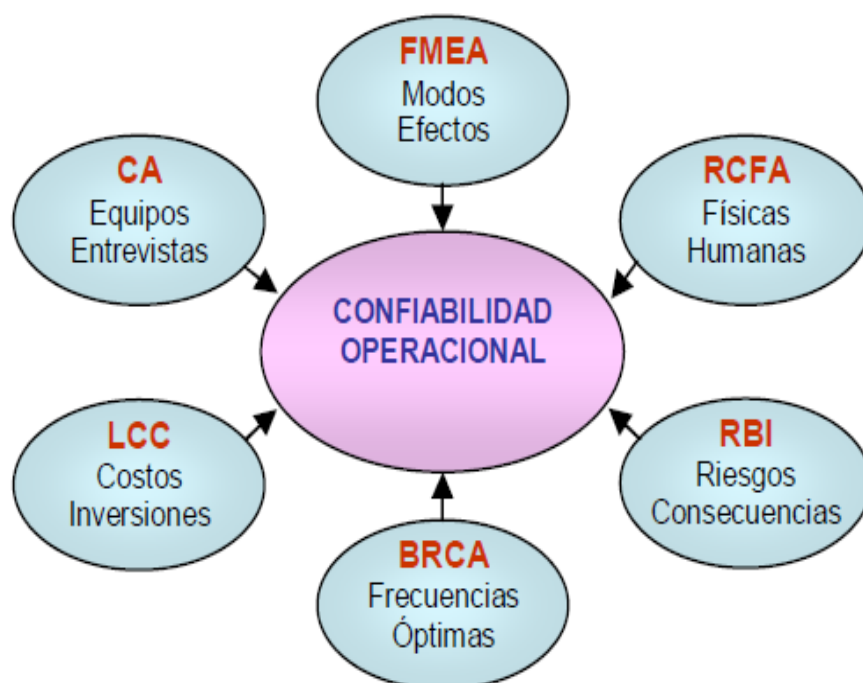


Ilustración 3-6: Herramientas de la Confiabilidad Operacional.

Fuente: Gestión del mantenimiento Industrial, (García, 2012).

Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA):

Es una metodología que permite determinar los modos de falla de los componentes de un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan.

Análisis Causa Raíz (RCFA)

Es una técnica sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición, para poder mitigarlas o eliminarlas.

Inspección Basada en Riesgos (RBI):

Es una técnica que permite definir la probabilidad de falla de un equipo o sistema, y la consecuencia que las fallas pueden generar sobre la gente, el ambiente y los procesos.

Análisis Costo Riesgo Beneficio (BRCA):

Es una metodología que permite establecer una combinación óptima entre los costos de hacer una actividad y los logros o beneficios que la actividad genera, considerando el riesgo que involucra la realización o no de tal acción.

Costo del Ciclo de Vida (LCC):

El análisis LCC es una metodología que permite elegir entre opciones de inversión o acciones de incremento de la confiabilidad con base en su efecto en el costo total del ciclo de vida de un activo nuevo o en servicio.

4 Análisis de Criticidad.

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual (González & Amendola, 2009).

4.1 Objetivo del Análisis de Criticidad.

El análisis de criticidad tiene por objetivo establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de un proceso de producción complejo, permitiendo subdividir elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. Desde esta óptica existe una gran diversidad de posibles criterios que permiten evaluar la criticidad de un activo de producción. Los motivos de priorización pueden variar según las oportunidades y las necesidades de la organización. A continuación se presentan algunos criterios comunes a utilizar dentro de los procesos de jerarquización:

- Flexibilidad operacional (disponibilidad de función alterna o de respaldo)
- Efecto en la continuidad operacional / capacidad de producción
- Efecto en la calidad del producto
- Efecto en la seguridad, ambiente e higiene
- Costos de paradas y del mantenimiento
- Frecuencia de fallas / confiabilidad

- Condiciones de operación (temperatura, presión, fluido, caudal, velocidad)
- Flexibilidad / accesibilidad para inspección & mantenimiento
- Requerimientos / disponibilidad de recursos para inspección y mantenimiento
- Disponibilidad de repuestos

4.2 Aplicaciones del Análisis de Criticidad

El Análisis de Criticidad aplica en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieran ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso o negocio donde formen parte. Huerta (2000) indica sus áreas comunes de aplicación, las cuales se orientan a establecer programas de implantación y prioridades en los siguientes campos:

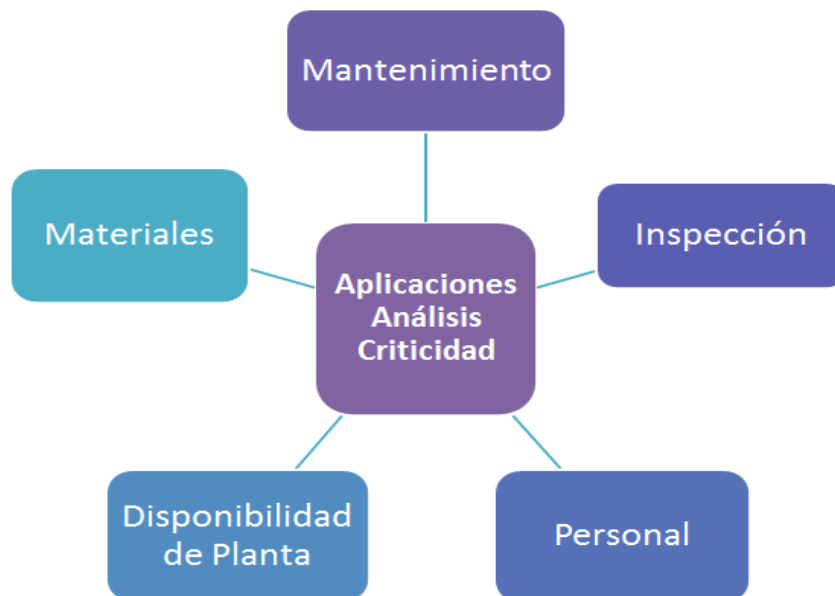


Ilustración 4-1: Aplicaciones del Análisis de Criticidad.

Fuente: Elaboración Propia.

4.2.1 En el ámbito de mantenimiento

Luego de tener plenamente establecido cuales sistemas son más críticos, se podrá establecer de una manera más eficiente la priorización de los programas y planes de mantenimiento de tipo: predictivo, preventivo, correctivo, e inclusive posibles rediseños al nivel de procedimientos y modificaciones menores; hasta permitiendo establecer la prioridad para la programación y ejecución de órdenes de trabajo.

4.2.2 En el ámbito de inspección:

El estudio de criticidad facilita y centraliza la implantación de un programa de inspección, dado que la lista jerarquizada indica donde es más efectivo realizar inspecciones y ayuda en los criterios de selección de los intervalos y tipo de inspección requerida para sistemas de protección y control (presión, temperatura, nivel, velocidad, espesores, flujo, etc.), así como para equipos dinámicos, estáticos y estructurales.

4.2.3 En el ámbito de materiales:

La criticidad de los sistemas ayuda a tomar decisiones más acertadas sobre el nivel de equipos y piezas de repuesto que deben existir en la bodega central, así como los requerimientos de partes, materiales y herramientas que deben estar disponibles en los almacenes de planta, es decir, se puede obtener de mejor forma un stock de materiales y repuestos de cada sistema y/o equipo logrando un costo óptimo de inventario.

4.2.4 En el ámbito de disponibilidad de planta:

Los datos de criticidad permiten una orientación certera en la ejecución de proyectos, dado que es el mejor punto de partida para realizar estudios de inversión de capital y renovaciones en los procesos, sistemas o equipos de una instalación, basados en el área de mayor impacto total, que será aquella con el mayor nivel de criticidad.

4.2.5 A nivel del personal:

Un buen estudio de criticidad permite potenciar el adiestramiento y desarrollo de habilidades en el personal, dado que se puede diseñar un plan de formación técnica, artesanal y de crecimiento personal, basado en las necesidades reales de la instalación, tomando en cuenta primero las áreas más críticas, que es donde se concentra las mejores oportunidades iniciales de mejora y de agregar el máximo valor.

La realización de un análisis de criticidad va a tener su máxima aplicabilidad cuando se han identificado al menos una de las siguientes necesidades:

- Fijar prioridades en sistemas complejos
- Administrar recursos escasos
- Crear valor para la empresa
- Determinar impacto en el negocio
- Aplicar metodologías de confiabilidad operacional

Varias de las metodologías que son descritas más adelante están constituidas por métodos de priorización que generan resultados de criticidad sustentados en la teoría del riesgo. Es por esto que se hace importante definir el concepto de riesgo dado que este es considerado proporcional a la criticidad.

4.3 El concepto de Riesgo.

El riesgo es un término de naturaleza probabilística, que se define como egresos o pérdidas probables consecuencia de la probable ocurrencia de un evento no deseado o falla (Yañez, Gómez, & Valbuena, 2004). Esta definición indica que existe la posibilidad que un evento ocurra, con las consecuencias que puede conllevar esto.

Matemáticamente el riesgo asociado a una decisión o evento viene dado por la siguiente expresión (4.1):

$$\mathbf{R(t) = P(t) \times C(t)} \quad (4.1)$$

Dónde:

R(t): Riesgo

P(t): Probabilidad

C(t): Consecuencias

Para Yañez et al, (2004) el análisis de la ecuación del riesgo (4.1), permite entender el poder de este indicador para el diagnóstico y la toma de decisiones, debido a que el mismo combina probabilidades o frecuencias de fallas con consecuencias, permitiendo la comparación de unidades como los equipos rotativos, que normalmente presentan alta

frecuencia de fallas con bajas consecuencias, con equipos estáticos, que normalmente presentan patrones de baja frecuencia de fallas y alta consecuencia.

En ese proceso de toma de decisiones se emplea el riesgo como una herramienta para la optimización de los planes de cuidado de activos, dirigiendo mayores recursos y esfuerzos para aquellos equipos que presenten un riesgo elevado y una reducción de esfuerzo y recursos para los equipos de bajo riesgo, lo cual permite en forma general un gasto justificado en los recursos dirigidos a las partidas de mantenimiento (Gutiérrez, Agüero, & Calixto, 2007)

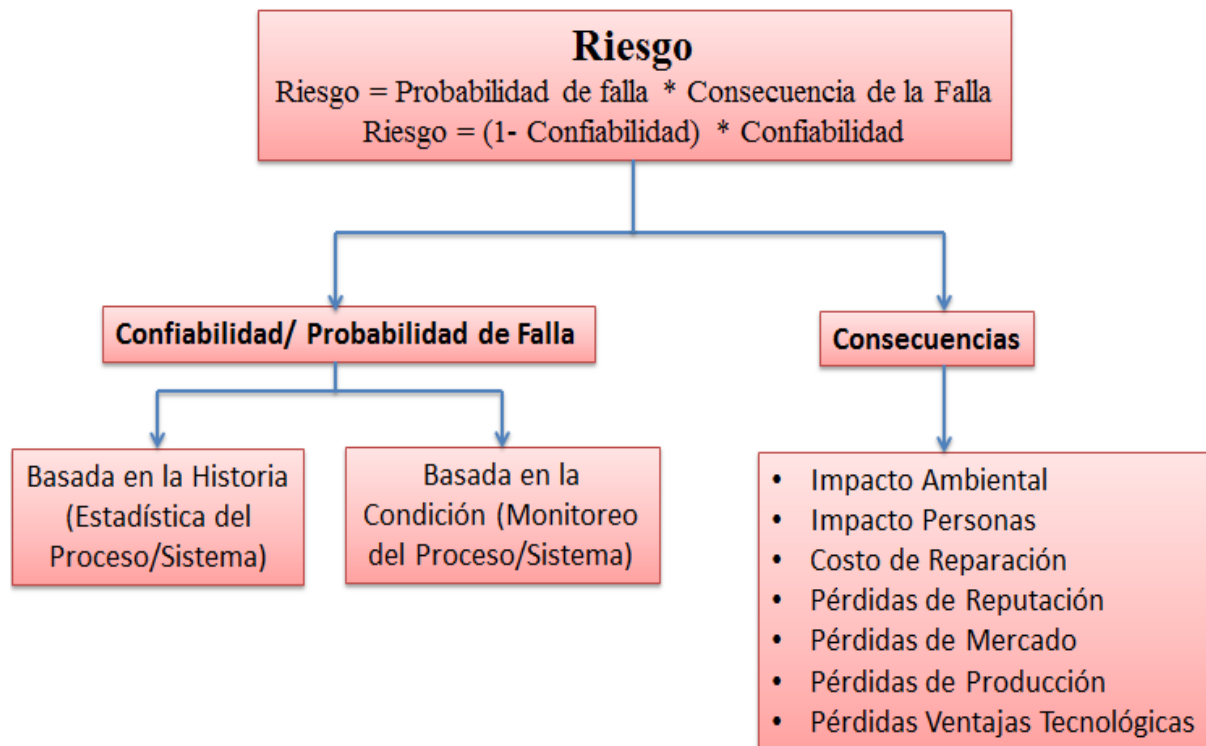


Ilustración 4-2: Componentes del Riesgo

Fuente: Análisis de criticidad integral de activos, (Gutiérrez et al, 2007).

4.3.1 Técnicas de Análisis de Riesgo:

Existen diferentes técnicas para establecer el nivel de riesgo, todas enmarcadas en tres modalidades técnicas “Cualitativas”, “Semi- Cuantitativas” y técnicas “Cuantitativas”.

Las cuáles serán descritas a continuación:

4.3.1.1 Técnicas cualitativas

Según Yáñez et al (2004) las técnicas cualitativas responden a razonamiento de naturaleza cualitativa, donde la estimación de la probabilidad de ocurrencia de los eventos y de sus respectivas consecuencias se realiza utilizando una escala relativa donde no se establecen rangos numéricos explícitos. La estimación del riesgo pasa por estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento (frecuencia de ocurrencia) y sus consecuencias.

4.3.1.2 Técnicas Semi- Cuantitativas

Según Yáñez et al (2004) en las técnicas semi-cuantitativas, se establecen rangos relativos para representar las probabilidades de ocurrencia y las consecuencias correspondientes, llegándose a establecer una matriz de criticidad o de jerarquización del riesgo, que si bien no corresponde a valores absolutos, si representan rangos numéricos de riesgo. Posteriormente, una vez cuantificadas (al menos comparativamente) las probabilidades de ocurrencia y las respectivas consecuencias, se procede a estimar en forma relativa el riesgo.

4.3.1.3 Técnicas Cuantitativas:

Para Yáñez et al (2004) las técnicas cuantitativas permiten determinar valores absolutos de riesgo, que pueden tratarse como egresos probables y por ende incluirse en evaluaciones financieras a ser tomados en consideración en cualquier proceso de toma de decisiones.

4.4 Información requerida.

Como precisa González (2007) la condición ideal sería disponer de datos estadísticos de los sistemas a evaluar que sean precisos, lo cual permite cálculos “exactos y absolutos”. Sin embargo desde el punto de vista práctico, dado que pocas veces se dispone de una data histórica de excelente calidad, el Análisis de Criticidad permite trabajar en rangos, es decir, establecer cuál es la condición más favorable, así como la condición menos favorable de cada uno de los criterios a evaluar. La información requerida para el análisis siempre estará referida con la frecuencia de fallas y sus consecuencias. Para obtener la información requerida, el paso inicial es formar un equipo natural de trabajo integrado por un facilitador (experto en Análisis de Criticidad, y quien será el encargado de conducir la actividad), y personal de las organizaciones involucradas en el estudio como lo son operaciones, mantenimiento y especialidades, quienes serán los puntos focales para identificar, seleccionar y conducir al personal conocedor de la realidad operativa de los sistemas objeto del análisis.

Este personal debe conocer el sistema y formar parte de las áreas de: operaciones, mecánica, electricidad, instrumentación, estructura, programadores, especialistas en proceso, diseñadores, etc.; adicionalmente deben formar parte de todos los estratos de la

organización, es decir, personal gerencial, supervisor, capataces y obreros, dado que cada uno de ellos tiene un nivel particular de conocimiento así como diferente visión del negocio. Mientras mayor sea el número de personas involucradas en el análisis, se tendrán mayores puntos de vista evitando resultados parcializados, además el personal que participa nivela conocimientos y acepta con mayor facilidad los resultados, dado que su opinión fue tomada en cuenta.

4.5 Metodologías para el análisis de criticidad

Existe una gran variedad de metodologías que pueden servir para llevar a cabo un análisis de criticidad, diferenciándose principalmente en el tipo de análisis que se efectúa, teniendo como posibles análisis cualitativos, cuantitativos o mixtos, además de los diferentes enfoques que tiene cada una. Es importante precisar que generalmente las metodologías tienen una aplicación más efectiva bajo el contexto que fueron creadas, es decir, éstas no constituyen una guía única e inequívoca para realizar una jerarquización de activos. Es por esto que como se menciona más adelante muchas de ellas están sujetas a modificaciones según la situación de análisis lo amerite, por lo que resulta primordial antes de utilizar alguna de las metodologías saber si esta puede cumplir bajo su estructura con el nivel de análisis buscado.

Por ultimo mencionar que la finalidad de cada metodología es poder determinar que activos son los más críticos ya sea por las consecuencias que estos conllevan enfocadas principalmente en los impactos de producción y/o la frecuencia de falla que tienen éstos.

A continuación se presentarán nueve metodologías que pueden servir potencialmente para llevar a cabo un análisis de criticidad.

4.5.1 Método del flujograma de análisis de criticidad

En este método se presenta una técnica que hace referencia a un análisis cualitativo sobre la jerarquía de equipos de producción (Parra & Crespo, 2012). El resultado de efectuar este método será una clasificación en tres categorías las cuales son A, B y C. Agregando que la categoría A equivaldría a los equipos más críticos, B mediana criticidad y C baja criticidad.

En la ilustración 4.3 se muestra un ejemplo de cómo queda un análisis elaborado a través de un flujograma.

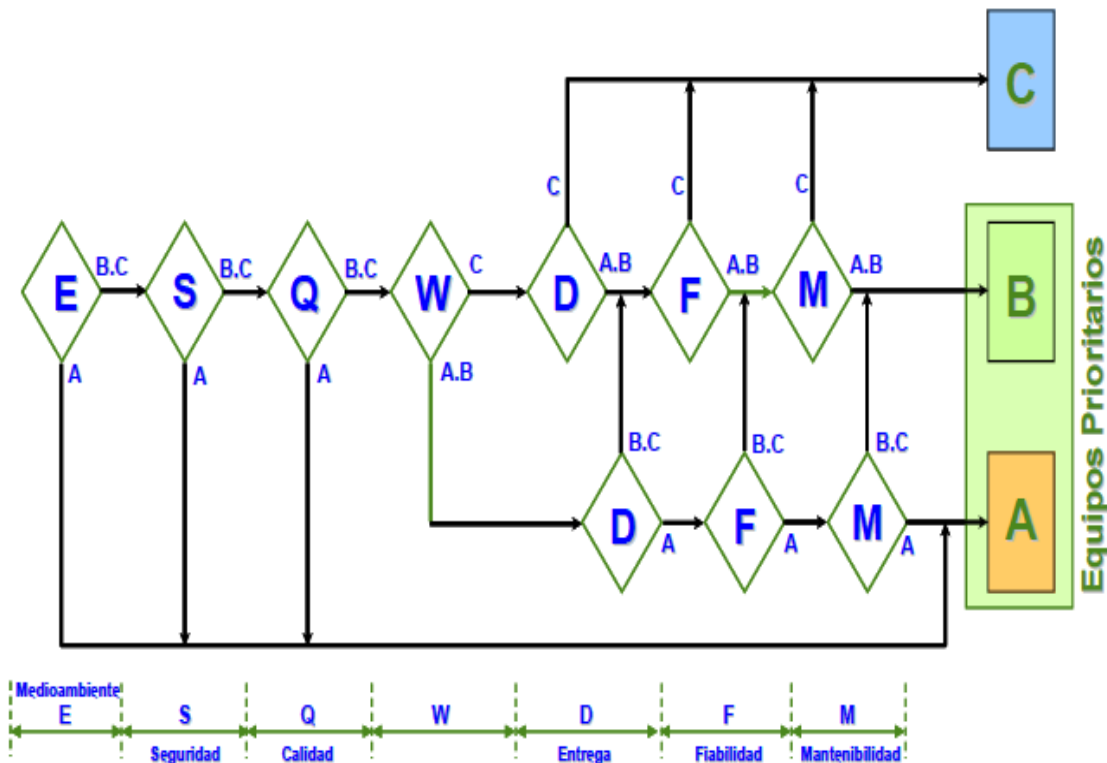


Ilustración 4-3: Ejemplo método del flujograma para Análisis de Criticidad.

Fuente: Método de análisis de criticidad y jerarquización de activos, (Parra & Crespo, 2012)

Para llegar a la clasificación final se procede a realizar de forma secuencial una serie de preguntas al equipo encargado de realizar el trabajo. La secuencia marca la importancia que da el equipo de trabajo a cada atributo que se analiza a la hora de establecer la prioridad del mismo. De cierto modo, el orden utilizado en la secuencia indica la importancia de la gestión sobre cada uno de los atributos que son analizados.

De cada pregunta existen tres respuestas posibles A, B o C que permiten caracterizar al equipo. Siguiendo la lógica de la ilustración 4.3, Parra & Crespo (2012) entregan una explicación según cada etapa:

- La primera pregunta hace referencia al medio ambiente (E), un equipo se podría considerar como de categoría A, si un fallo del mismo puede provocar que la empresa tenga que recurrir a dar aviso a las autoridades públicas por problemas que pudiesen afectar a la salud de las personas y del medio ambiente (por ejemplo: Una fuga de amoníaco). El equipo sería de categoría B si un fallo del mismo provocase una contaminación o afección que pudiera gestionarse en el interior de la empresa (por ejemplo, una fuga de soda cáustica que se controla con la red de aguas de la empresa). Finalmente un equipo se podría considerar de categoría C si un fallo del mismo no produjese ningún tipo de contaminación medioambiental.
- Con respecto a la seguridad (S) los activos de categoría "A" serán aquellos cuyos fallos pueden producir accidentes que provocan absentismo laboral temporal o permanente en el lugar de trabajo. Los fallos en activos de la categoría "B" podría

causar daños menores a la gente en el trabajo, no producen la ausencia de trabajo. Por último, los activos de la categoría "C" son activos cuyos fallos no pueden crear consecuencias relacionadas con la seguridad de las personas.

- En relación a la calidad (Q) se puede decir que los fallos pueden producir un importante impacto externo, o una imagen muy negativa de la compañía en el mercado, al detectarse éstos después de llegar el producto al cliente final. La categoría A serían los activos que pudieran sufrir este tipo de fallo. La categoría B y C serían los activos que, cuando no se mantienen adecuadamente, podrían sufrir fallos que producen sólo una consecuencia interna o que no ocasionan ningún impacto respectivamente.
- El tiempo de trabajo de un activo (W) también puede condicionar su criticidad. Por ejemplo, si de un total de tres turnos los activos trabajan a tres turnos, éstos serán de categoría "A". Si los activos trabajan a dos turnos estarán bajo categoría "B". Finalmente, cuando los activos de producción tienen en programación un solo turno de trabajo al día, se incluirán en la categoría "C". En algunas ocasiones el trabajo extra que se requiere para el mantenimiento correctivo de activos, como medida, también se puede considerar dentro de este criterio. Los activos que requieren una gran cantidad de horas extras para ser reparados entrarían en categoría "A", y así sucesivamente.

- La entrega (D) es un criterio relacionado con el impacto operacional de un fallo del activo. Los activos de categoría "A" son los que producen un paro en toda la fábrica cuando fallan. Los activos de categoría "B" pueden dejar sólo una línea de producción parada al fallar. Por último, los activos que no producen una interrupción significativa de la producción serían de la categoría "C".
- La fiabilidad (F) también es introducida como criterio en el flujograma y se relaciona con la frecuencia de fallo que pueda existir en un activo que no se mantiene correctamente. Por ejemplo en un caso hipotético, se puede considerar como categoría "A" los activos con frecuencia de fallo menor de 5 horas. Los activos con frecuencias de las fallo mayor de 5 h y menor de 10 h se considerarían en la categoría "B". Finalmente, para activos con frecuencias de fallo superiores a 10 horas, se utilizaría la categoría "C".
- La mantenibilidad (M), o aptitud del activo para ser mantenido, es el último criterio que debe ser tenido en cuenta. Este criterio se relaciona con el tiempo medio necesario para reparar un fallo. Los activos que requieren un mayor tiempo medio de reparación que cierto valor "x" se catalogan como "A". Aquellos activos con un tiempo medio de reparación que sea menor "x", pero mayor que "y" se catalogan como "B". Por último aquellos cuyo tiempo medio de reparación es inferior a "y" estarían dentro de categoría "C".

4.5.2 Modelo de criticidad CTR

El modelo de Criticidad Total por Riesgo (CTR), propuesto por Parra & Crespo (2012) es un proceso de análisis semi-cuantitativo, que está soportado en el concepto del riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de un fallo por la severidad del mismo. Este método ha sido ampliamente desarrollado por consultoras como The Woodhouse partnership⁴, además de adaptado a un número importante de industrias.

A continuación se presentan de forma detallada, las expresiones utilizadas para jerarquizar los sistemas a partir del modelo CTR:

$$\text{CTR} = \text{FF} \times \text{C} \quad (4.2)$$

Dónde:

CTR: Criticidad total por Riesgo

FF: Frecuencia de fallos (rango de fallos en un tiempo determinado (fallos/año))

C: Consecuencias de los eventos de fallos

El valor de las consecuencias (C), se obtiene a partir de la siguiente expresión (4.3):

$$\text{C} = (\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA} \quad (4.3)$$

⁴ The Woodhouse partnership es una consultora que se enfoca en la mejora continua de la gestión de activos de sus clientes. Fuente: <http://www.twpl.com/whoweare/>

Siendo:

IO = Factor de impacto en la producción

FO = Factor de flexibilidad operacional

CM = Factor de costes de mantenimiento

SHA = Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente

La expresión final del modelo de priorización de CTR será la siguiente (4.4):

$$\text{CTR} = \text{FF} \times ((\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA}) \quad (4.4)$$

Los factores ponderados de cada uno de los criterios a ser evaluados por la expresión del riesgo (4.4) se presentan a continuación:

Factor de Frecuencia de Fallos (FF) (escala 1 - 4)

1: Excelente: menos de 0,5 eventos al año.

2: Bueno: entre 0,5 y un 1 evento al año.

3: Promedio: 1 y 2 eventos al año.

4: Frecuente: mayor a 2 eventos al año.

Factores de Consecuencias

- Impacto Operacional (IO) (escala 1 - 10)

1: Pérdidas de producción menor al 10%.

3: Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%.

5: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%.

7: Pérdidas de producción entre el 50% y el 74%.

10: Pérdidas de producción superiores al 75%.

- Impacto por Flexibilidad Operacional (FO) (escala 1 - 4)

1: Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.

2: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.

4: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.

- Impacto en Costes de Mantenimiento (CM) (escala 1 - 2)

1: Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares.

2: Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares.

- Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA) (escala 1 - 8)

1: No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales.

3: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas.

6: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración.

8: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/ó incidente ambiental mayor (catastrófico) que exceden los límites permitidos.

En la siguiente Ilustración (4.4) se indica la estructura a seguir para llevar a cabo un análisis de criticidad según el modelo CTR:



Ilustración 4-4: Pasos para efectuar metodología CTR

Fuente: Elaboración Propia

La selección de los factores ponderados se realiza en reuniones de trabajo con la participación de las distintas personas involucradas en el contexto operacional del activo en estudio (operaciones, mantenimiento, procesos, seguridad y ambiente). Posteriormente, se seleccionan los sistemas a priorizar y se debate la asignación de valores para los factores que serán incluidos en la expresión de Criticidad Total por Riesgo. Para obtener el nivel de criticidad de cada equipo/sistema, se toman los valores totales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias de los fallos y se ubican en la matriz de criticidad 4x4. El valor de frecuencia de fallos se ubica en el eje vertical y el valor de consecuencias se ubica en el eje horizontal (se toma el resultado final de la expresión: $(IO \times FO) + CM + SHA$). La matriz de criticidad mostrada a continuación permite jerarquizar los sistemas en tres áreas:

- Área de sistemas No Críticos (NC)
- Área de sistemas de Media Criticidad (MC)
- Área de sistemas Críticos (C)

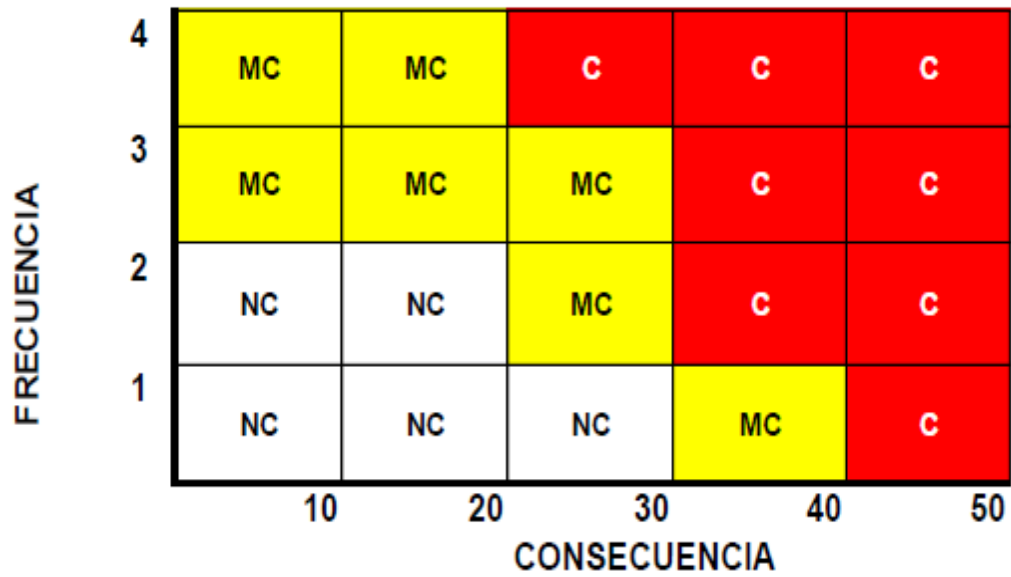


Ilustración 4-5: Representación Matriz de criticidad del método CTR

Fuente: Método de análisis de criticidad y jerarquización de activos, (Parra & Crespo, 2012)

La Ecuación (4.4) puede variarse en función de las consideraciones que haga la empresa para cada instalación en particular o circunstancia temporal específica, de manera que se puede obtener diversas variaciones de la función de riesgo de la matriz de criticidad.

4.5.3 Metodología D.S. de Análisis de Criticidad

Según Pérez (2009) es una metodología semi-cuantitativa que permite establecer la jerarquía o prioridades de sistemas o equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones, orientando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar, basado en la realidad actual de la empresa.

El objetivo de esta metodología va dirigido a ofrecer una herramienta que ayude en la determinación de la jerarquía de sistemas y equipos de una planta, que permita manejarla de manera controlada y en orden de prioridades. Esta metodología toma en cuenta varios parámetros para su elaboración dentro los cuales se pueden mencionar el área de mantenimiento propiamente tal, y el área operacional, ambas con sus respectivas clasificaciones.

Cabe destacar que para cada parámetro están dadas una serie de factores predeterminados por el método D.S. que pueden señalar el estado actual de la empresa tanto en el área de mantenimiento como en el operacional, cada factor esta ponderado de manera tal que arroja un valor que va del 1 al 3 de acuerdo al nivel de gravedad que este parámetro en específico presente, 1 para el menos grave y 3 para el más grave. Hecho el análisis a cada parámetro se suman las ponderaciones resultantes obteniendo un total por cada área y se introducen en la ecuación que se utiliza para calcular la criticidad del equipo. La matriz es flexible por cuanto se pueden incluir o quitar parámetros, dependiendo del contexto en el cual se encuentre al momento de realizar el análisis.

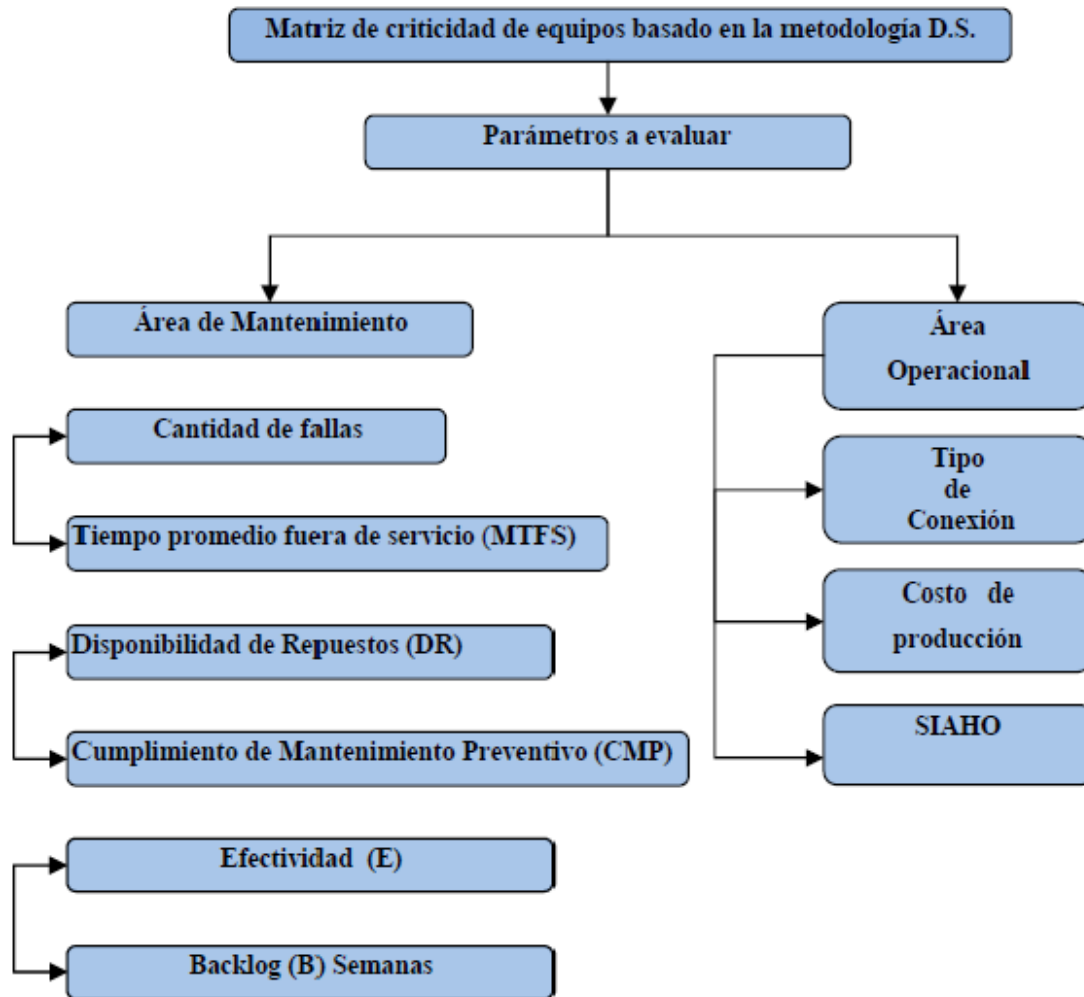



Ilustración 4-6: Parámetros a evaluar por la metodología D.S.

Fuente: Memoria Propuesta de acciones de mantenimiento basadas en M.C.C a los ventiladores de enfriamiento, (Pérez, 2009)

A continuación en la tabla 4.1 se muestran la matriz de criticidad, las ponderaciones de cada uno de los parámetros así como también la ecuación de criticidad (4.5)

Tabla 4-1: Matriz de Criticidad Definida por metodología D.S.

	Equipo:	Sistema:	Realizado:	
	Código:	Evento de control:		
ÁREA DE MANTENIMIENTO				
Factor a Evaluar	Criterios	Ponderación	Criterio Elegido	Puntos
1) Cantidad de Fallas en el periodo evaluado	1a) Fallas = 1	1		
	1b) $1 < \text{Fallas} \leq 12$	2		
	1c) Fallas > 12	3		
2) Tiempo Promedio fuera de servicio en el periodo evaluado (MTFS) en horas	2a) $\text{MTFS} \leq 4$	1		
	2b) $4 < \text{MTFS} < 8$	2		
	2c) $\text{MTFS} \geq 8$	3		
3) Disponibilidad de repuestos en el periodo evaluado (DR)	3a) $\text{DR} \geq 80\%$	1		
	3b) $50 \leq \text{DR} < 80\%$	2		
	3c) $\text{DR} < 50\%$	3		
4) Cumplimiento del mantenimiento preventivo (CMP)	4a) $75\% \leq \text{CMP} \leq 100\%$	1		
	4b) $50\% \leq \text{CMP} < 75\%$	2		
	4c) $0\% \leq \text{CMP} < 50\%$	3		
5) Efectividad (E)	5a) $E \geq 80\%$	1		
	5b) $50 \leq E < 80\%$	2		
	5c) $E < 50\%$	3		
6) Backlog (B) Semanas	6a) $0 \leq B \leq 2$	1		
	6b) $2 \leq \text{CMP} \leq 5$	2		
	6c) $B > 5$	3		
Total puntos obtenidos en el área de mantenimiento (ΣA.M.)				
ÁREA OPERACIONAL				
Factor a Evaluar	Criterios	Ponderación	Criterio Elegido	Puntos
7) Tipo de conexión	7a) Sistema Paralelo	1		
	7b) Sistema Combinación	2		
	7c) Sistema Serie	3		
8) Seguridad industrial, ambiente e higiene ocupacional (SIAHO)	8a) Sin Consecuencias	1		
	8b) Efecto Temporal	2		
	8c) Efecto Permanente	3		
9) Costos de Producción	9a) Igual a la meta	1		
	9b) Menor a la meta	2		
	9c) Mayor a la meta	3		
Total puntos obtenidos en el área operacional (ΣA.O.)				
% Criticidad del equipo = $[K1 * (\Sigma A.M.) + K2 * (\Sigma A.O.)] \times 100$				

Fuente: Memoria Propuesta de acciones de mantenimiento basadas en M.C.C a los ventiladores de enfriamiento, (Pérez, 2009)

$$\text{Críticidad del equipo} = [K1 * (\Sigma A.M.) + K2 * (\Sigma A.O.)] * 100 \quad (4.5)$$

Dónde se tiene que:

$\Sigma A.M.$: Sumatoria de los puntos del área de mantenimiento.

$\Sigma A.O.$: Sumatoria de los puntos del área de operaciones.

K1: 0,0278; Constante del área de mantenimiento.

K2: 0,0555; Constante del área operacional.

En la siguiente ilustración (4.7) se muestra un esquema a seguir para obtener una clasificación de criticidad en base a la metodología D.S.:

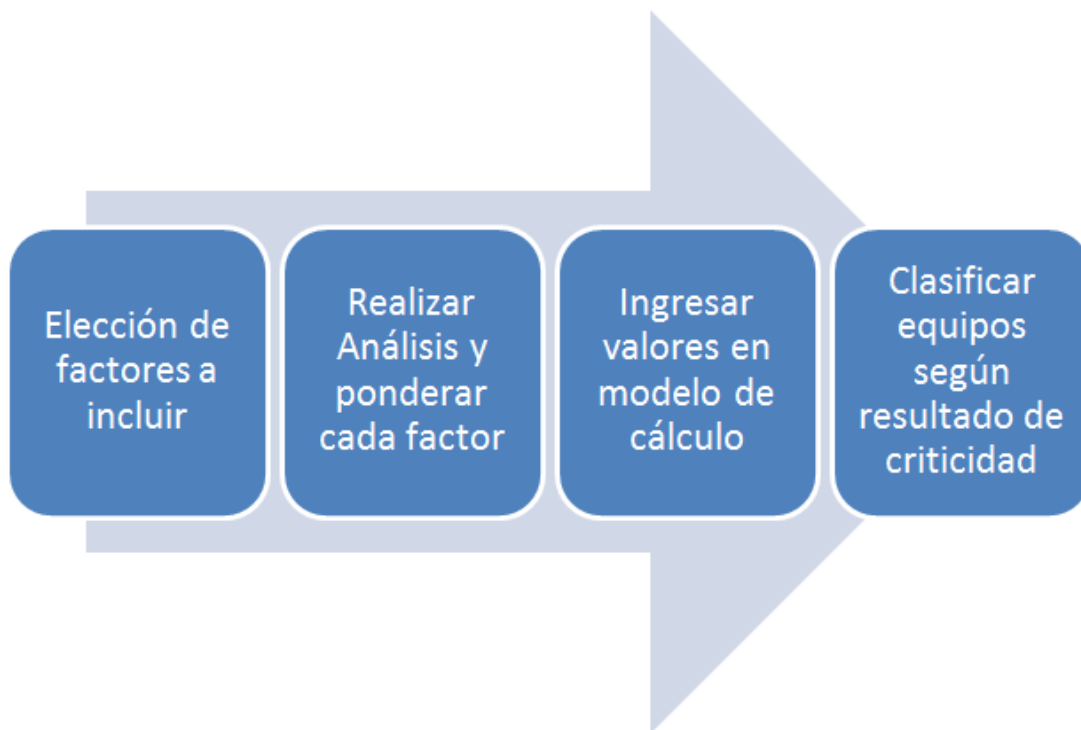


Ilustración 4-7: Pasos para realizar un análisis de criticidad bajo la Metodología D.S

Fuente: Elaboración Propia

Cabe mencionar que la constante K1 puede variar si la cantidad de parámetros del área de mantenimiento aumenta o disminuye, de igual modo sucede con la constante K2 pero relacionado con los parámetros del área de operaciones. Esto debido a que dichas constantes garantizan que el resultado obtenido mediante la ecuación (4.5) no exceda el 100%. Dependiendo de dicho resultado se establece que equipo es crítico, semi crítico o no crítico, como se muestra en la tabla 4.2, pero teniendo en cuenta que los valores de dicha tabla pueden también ser modificados a conveniencia de la organización, a fin de adaptarlos a sus particularidades y requerimientos.

Tabla 4-2: Parámetros para establecer criticidad según metodología D.S.

PARÁMETROS PARA ESTABLECER CRITICIDAD
No Crítico ($33\% \leq \% \text{ Criticidad} < 50\%$)
Semi-Crítico ($50 \leq \% \text{ Criticidad} < 70\%$)
Crítico ($\% \text{ Criticidad} \geq 70\%$)

Fuente: Memoria Propuesta de acciones de mantenimiento basadas en M.C.C a los ventiladores de enfriamiento, (Pérez, 2009)

4.5.4 Metodología HAZOP

El análisis de peligros y operabilidad (Hazard and Operability analysis, HAZOP) conocido también como análisis funcional de operabilidad (AFO), fue diseñado inicialmente en Inglaterra en la década de los setenta por la compañía Imperial Chemical Industries (ICI)⁵ para aplicarlo al diseño de plantas de fabricación de pesticidas.

⁵ Imperial Chemical Industries fue una empresa química inglesa fundada en 1926 y vendida a Azko Nobel en 2007.

Como indica Mulet et al, (2011) el HAZOP es una técnica de identificación de riesgos inductiva basada en la premisa de que los riesgos, los accidentes o los problemas de operatividad, se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación en un sistema dado y en una etapa determinada. Por tanto, ya se aplique en la etapa de diseño, como en la etapa de operación, la sistemática consiste en evaluar, en todas las líneas y en todos los sistemas las consecuencias de posibles desviaciones en todas las unidades de proceso, tanto si es continuo como discontinuo. La técnica consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de desviaciones de las variables de proceso, planteadas a través de unas "palabras guía"⁶.

La realización de un análisis HAZOP consta de siete etapas las cuales son mostradas en la ilustración 4.8 y posteriormente explicadas cada una de ellas:

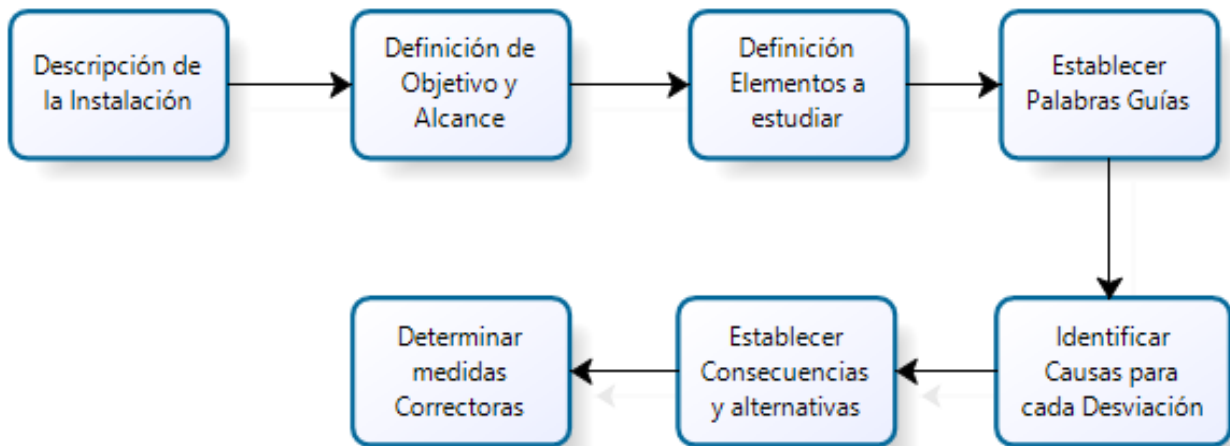


Ilustración 4-8: Etapas para realizar un Análisis de Criticidad con Metodología HAZOP

Fuente: Elaboración Propia

⁶ La palabras guías corresponden a palabras que unidas a un tipo de desviación permiten orientar acerca de la causa de la falla.

1) Descripción de la instalación: Se describen los elementos de la instalación y su funcionamiento.

2) Definición del objetivo y alcance: Consiste en delimitar las áreas del sistema a las cuales se aplica la técnica.

3) Definición de los elementos críticos o nodos de estudio:

En cada área seleccionada se identificarán una serie de nodos o puntos claramente localizados en el proceso. Ejemplos de nodos pueden ser: la tubería de alimentación de una materia prima, la altura de impulsión de una bomba, la superficie de un depósito, entre otros. La técnica HAZOP se aplica a cada uno de estos puntos. Cada nodo vendrá caracterizado por unos valores determinados de las variables de proceso: presión, temperatura, caudal, nivel, composición, viscosidad, etc. Los criterios para seleccionar los nodos tomarán, básicamente, en consideración, los puntos del proceso en los cuales se produzca una variación significativa de alguna de las variables del proceso.

4) Definición de las desviaciones para cada una de las variables de proceso, a partir de las palabras guía:

El HAZOP consiste en una aplicación exhaustiva de todas las combinaciones posibles entre palabra guía y variable de proceso, descartándose durante la sesión aquellas combinaciones que no tengan sentido para un nodo determinado. La siguiente tabla muestra un ejemplo de palabras guía, aunque no son únicas.

Tabla 4-3: Ejemplo de palabras guías y sus posibles desviaciones.

Palabra guía	Significado	Ejemplo de desviación	Ejemplo de causas originadoras
NO	Ausencia de la variable a la cual se aplica	No hay flujo en una línea	Bloqueo; fallo de bombeo; válvula cerrada o atascada; fuga; válvula abierta; fallo de control
MÁS	Aumento cuantitativo de una variable	Más flujo (más caudal)	Presión de descarga reducida; succión presurizada; controlador saturado; fuga; lectura errónea de instrumentos
		Más temperatura	Fuegos exteriores; bloqueo; puntos calientes; explosión en reactor; reacción descontrolada
MENOS	Disminución cuantitativa de una variable	Menos caudal	Fallo de bombeo; fuga; bloqueo parcial; sedimentos en línea; falta de carga; bloqueo de válvulas
		Menos temperatura	Pérdidas de calor; vaporización; venteo bloqueado; fallo de sellado
INVERSO	Analiza la inversión en el sentido de la variable. Se obtiene el efecto contrario al que se pretende	Flujo inverso	Fallo de bomba; sifón hacia atrás; inversión de bombeo; válvula antirretorno que falla o está insertada en la tubería de forma incorrecta
ADEMÁS DE	Aumento cualitativo. Se obtiene algo más que las intenciones del diseño	Impurezas o una fase extraordinaria	Entrada de contaminantes del exterior como aire, agua o aceites; productos de corrosión; fallo de aislamiento; presencia de materiales por fugas interiores; fallos de la puesta en marcha
PARTE DE	Disminución cualitativa. Parte de lo que debería ocurrir sucede según lo previsto	Disminución de la composición en una mezcla	Concentración demasiado baja en la mezcla; reacciones adicionales; cambio en la alimentación
DIFERENTE DE	Actividades distintas respecto a la operación normal	Cualquier actividad	Puesta en marcha y parada; pruebas e inspecciones; muestreo; mantenimiento; activación del catalizador; eliminación de tapones; corrosión; fallo de energía; emisiones indeseadas, etc.

Fuente: Problemas resueltos de análisis de riesgos en instalaciones industriales, (Mulet et al, 2011).

- 5) Identificar posibles causas de cada desviación: Para cada desviación, se enumeran las posibles causas.

- 6) Establecer las consecuencias posibles de la desviación y analizar cuál de las alternativas siguientes es aplicable al caso:
- Las consecuencias no entrañan riesgo: descartar esta desviación
 - Las consecuencias entrañan riesgos menores o medianos: consideración de esta desviación en el siguiente paso.
 - Las consecuencias entrañan riesgos mayores: consideración en el siguiente paso y envío para su análisis mediante un método más detallado y/o cuantitativo.
- 7) Determinar medidas correctoras que eviten o palíen las causas de las desviaciones:
- Por último, se indicarán posibles medidas correctoras para cada una de las desviaciones. El resultado de un análisis HAZOP se presenta en un formato de tabla según se muestra a continuación:

Tabla 4-4: Formato presentación análisis HAZOP.

Sistema:			Fecha:		
Localización del nodo:			Realizado por:		
Variable	Palabra Guía	Desviación	Causas Posibles	Consecuencias Posibles	Medidas Correctoras

Fuente: Problemas resueltos de análisis de riesgos en instalaciones industriales, (Mulet et al, 2011).

4.5.5 Método de criticidad de Antony Ciliberti

El método de Jerarquización de Criticidad Basada en Riesgo tiene como objetivo el enfoque de técnicas de mantenimiento preventivo, predictivo, análisis de falla, mantenimiento correctivo, y análisis de confiabilidad a través de criterios divididos en impactos en las operaciones, la seguridad y ambiente. El Método de Antony Ciliberti (Ciliberti, 1996) establece una serie de valores como herramientas para la estimación de cada factor asignándole diferentes pesos en base a las condiciones de operación, de ambiente y de seguridad que posean cada equipo o componente en estudio.

Los pasos para llevar a cabo el análisis de criticidad según esta metodología se muestran y describen a continuación:

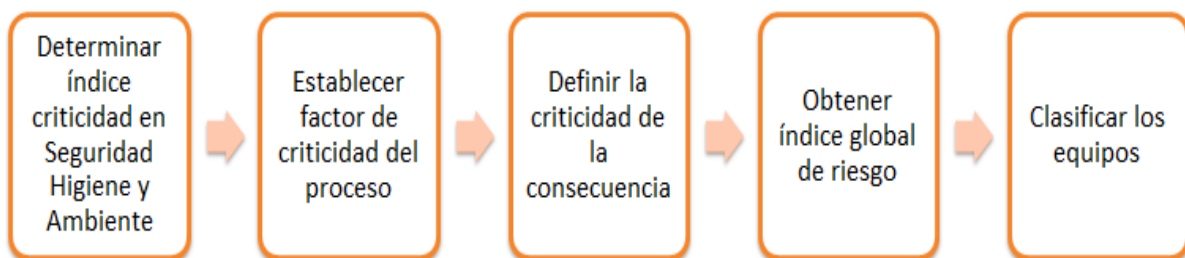


Ilustración 4-9: Pasos para efectuar análisis de criticidad con Metodología de Antony Ciliberti.

Fuente: Elaboración Propia

4.5.5.1 PASO 1: Determinación del índice de criticidad en seguridad higiene y ambiente (ICSHA)

Este índice cuantifica el riesgo del activo en relación a su entorno, evaluando los peligros químicos y físicos en una escala del 0 al 4, siendo 4 el peor de los casos.

El ICSHA es determinado seleccionando el escenario más crítico y dándole crédito a los factores que mitigan el riesgo. Por tanto dicho índice queda definido mediante la ecuación (4.6) de criticidad en Seguridad higiene y ambiente (SHA).

$$\text{ICSHA} = \text{FCSHA} - \text{FRSHA} - \text{FMSHA} \quad (4.6)$$

PASO 1A. Factor de riesgo asociado al servicio

Se considera el valor mayor entre inflamabilidad, toxicidad y reactividad como factor crítico de riesgo asociado al servicio, según la norma NFPA⁷ 704 o conocida como el diamante de materiales peligrosos.



Ilustración 4-10: Norma NFPA 704.

Fuente: <https://www.nfpa.org> – National Fire Protection Association (USA).

⁷ NFPA, (National Fire Protection Association), diseñada en Estados Unidos, permite identificar peligros en materiales de respuesta ante emergencias. Fuente: <http://www.revistaseguridadadminera.com/emergencias/nfpa-704-significado-caracteristicas/>

PASO 1B. Otros riesgos

Con el valor mayor entre la velocidad de rotación, presión y temperatura de diseño se selecciona el índice de peligrosidad correspondiente según su clasificación.

Tabla 4-5: Clasificación Otros Riesgos.

Peligros muy altos (4)	Temperaturas > 1000 °F o <-50°F
	Presiones > 500 Psig o < 1 atm. Donde el Oxígeno presente puede causar una explosión potencial
	Velocidad de rotación > 5000 r.p.m
	Regulaciones químicas poco controlables
	Mecanismo o aparato crítico de seguridad
	Alto grado de Contaminación ambiental
Peligros altos (3)	Temperaturas > 500°F o < -20°F
	Presiones > 250 Psig.
	Velocidad de rotación > 3500 r.p.m
	Regulaciones químicas que puedan ser controlables.
	Mecanismo de seguridad en mal estado.
	Grado moderado de contaminación ambiental
Peligros moderados (2)	Temperaturas > 212 ° F
	Presiones > 150 Psig
	Velocidad de rotación < 3500 r.p.m
	Regulaciones químicas medias que puedan ser controlables.
	Contaminación ambiental posible
Peligros bajos (1)	Presiones mayores a 15 Psig
	Equipos con velocidades rotacionales de < 200 r.p.m
No peligrosos	Valor 0

Fuente: Establishing mechanical integrity of process equipment using a criticality-based maintenance program. (Ciliberti, 1996)

PASO 1 C. Factor de criticidad seguridad, higiene y ambiente (FCSHA)

Corresponde al mayor valor entre riesgo asociado al servicio y otros riesgos.

PASO 1 D. Factor de reducción de riesgos en SHA (FRSHA)

Este valor dependerá de los efectos causado por la falla a la seguridad, higiene y ambiente, y de la probabilidad de ocurrencia del mismo, por tanto para determinarlo se discute con el equipo de trabajo sobre estimar la probabilidad de que la ocurrencia de la falla en el equipo afecte a la seguridad, higiene y ambiente.

Tabla 4-6: Factor de reducción de riesgos.

Factor de reducción de riesgos	FRSHA = 0	Cuando el riesgo de que ocurra el incidente es potencial y éste afecta la salud, la seguridad y traiga consecuencias sobre el medio ambiente
	FRSHA = 1	Cuando existe un riesgo bajo o mínimo de que ocurra el incidente y afecte la salud, seguridad y ambiente
	FRSHA = 4	Cuando no es posible que ocurra este incidente, no afecta la salud, la seguridad ni el ambiente.

Fuente: Establishing mechanical integrity of process equipment using a criticality-based maintenance program. (Ciliberti, 1996)

PASO 1E. Factor de mitigación de riesgos en SHA (FMSHA)

Evalúa si una vez que ocurra un evento existe algún mecanismo para mitigar la consecuencia de la falla, se pondera en la tabla 4.7.

Tabla 4-7: Factor de mitigación de riesgos FMSHA.

Factor de mitigación de riesgos	FMSHA = 1	Si existe una línea de repuesto o plan de contingencia que mitigue el peligro
	FMSHA = 0	Si no existe un plan de contingencia

Fuente: Establishing mechanical integrity of process equipment using a criticality-based maintenance program. (Ciliberti, 1996)

4.5.5.2 PASO 2. Índice de criticidad del proceso (ICP)

Es determinado por la evaluación que verifica el impacto que tiene la falla del equipo en el proceso y se ve afectado por un factor de respaldo del equipo. Por tanto dicho índice queda definido mediante la ecuación (4.7) de índice de ICP.

$$\text{ICP}=\text{FCP}-\text{FRP} \text{ (4.7)}$$

Observación: Se ocupa valor cero si el resultado es negativo.

PASO 2A. Factor de criticidad del proceso (FCP)

Se evalúa bajo el siguiente criterio ponderado, según sea el caso establecido en la tabla 4.8.

Tabla 4-8: Factor de criticidad del proceso.

Criticidad del equipo en proceso (FCP)	FCP 4	Equipo crítico para la capacidad del proceso, falla del equipo que causaría una parada total de la producción. Falla inaceptable
	FCP 3	Equipo necesario para la realización del proceso, la falla del equipo resultaría una pérdida de uno de los requerimientos del producto final
	FCP 2	Equipo útil al proceso. Pérdida de fuerza en el equipo.
	FPC 1	Equipo con un impacto mínimo en el proceso.
	FPC 0	La falla del equipo no afecta la capacidad del proceso.

Fuente: Establishing mechanical integrity of process equipment using a criticality-based maintenance program. (Ciliberti, 1996)

PASO 2B. Factor de respaldo de proceso u opción operacional (FRP)

El valor depende de la existencia del equipo de respaldo que realice la función de equipo en estudio en caso de falla del mismo. Si existe o no, la ponderación de este factor se asigna según el criterio (Tabla 4.9).

Tabla 4-9: Factor de respaldo de proceso (FRP).

Factor de respaldo de equipos de procesos	FRP = 1	Si existe un proceso que permita mitigar las consecuencias de la falla del equipo
	FRP = 0	No existe tal proceso

Fuente: Establishing mechanical integrity of process equipment using a criticality-based maintenance program. (Ciliberti, 1996)

4.5.5.3 PASO 3. Índice de criticidad de la consecuencia

Para ello los índices ICSHA e ICP son representados en una matriz de valores. Estos valores serán de forma alfanumérica, con el primer carácter alfa identificando la categoría de criticidad (A - D) siendo “A” el valor más crítico. El segundo y tercer carácter son numéricos, identifican el peligro y el valor del proceso respectivo (Tabla 4.10).

Tabla 4-10: Matriz de valores del índice de criticidad de la consecuencia.

ICP	ICSHA				
	4	3	2	1	0
4	A44	B34	A24	A14	A04
3	A43	B33	A23	B13	B03
2	A42	B32	C22	C12	C02
1	A41	B31	C21	D11	D01
0	A40	B30	C20	D10	D00

Fuente: Establishing mechanical integrity of process equipment using a criticality-based maintenance program. (Ciliberti, 1996)

4.5.5.4 PASO 4. Índice Global de Riesgo

El índice global de riesgo es el resultado de la intersección entre el índice de criticidad de la consecuencia y la frecuencia de falla del equipo, teniendo en cuenta que la frecuencia de falla puede estar clasificada en cuatro niveles como los que se presenta a continuación:

- 0/1 No hay fallas
- 2: Baja frecuencia
- 3: Mediana frecuencia
- 4: Alta frecuencia

El índice global de criticidad es un código alfanumérico, donde la letra indica la condición de criticidad del equipo, el primer número el índice de criticidad en SHA, el segundo el índice de criticidad en el proceso, y el último la frecuencia de falla del equipo (Ilustración 4.11).

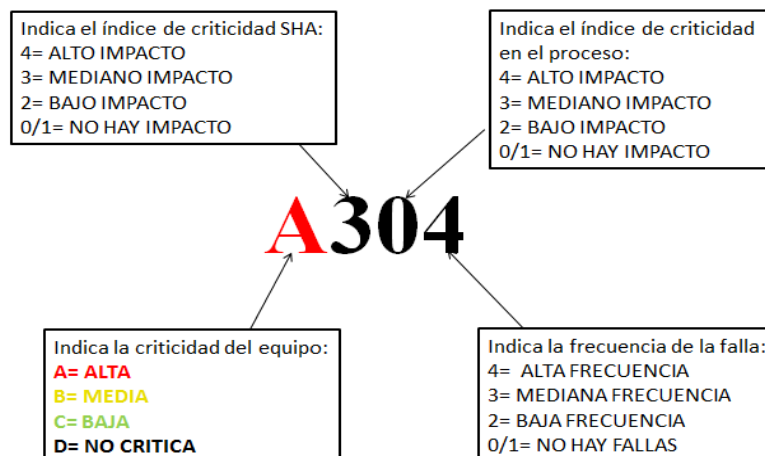


Ilustración 4-11: Nomenclatura índice global de criticidad.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-11: Matriz del índice global de criticidad basado en riesgo.

Matriz		Frecuencia			
		1	2	3	4
Consecuencias	44	B411	A442	A443	A444
	43	B431	A432	A433	A434
	42	B421	A422	A423	A424
	41	B411	A412	A413	A414
	40	B401	A402	A403	A404
	34	B341	A342	A343	A344
	24	B241	A242	A243	A244
	14	B141	A142	A143	A144
	4	B041	A042	A043	A044
	33	B331	B332	B333	A344
	32	B321	B322	B323	A324
	31	B311	B312	B313	A314
	30	B301	B302	B303	A304
	23	B231	B232	B233	A234
	13	B131	B132	B133	A134
	3	B031	B032	B033	A034
	22	C221	C222	B223	A224
	21	C211	C212	B213	A214
	20	C201	C202	B203	A204
	12	C121	C122	B123	A124
	2	C021	C022	B023	A024
	11	D111	C112	B113	B114
	10	D101	C102	B113	B104
	1	D011	C012	B103	B014
0	D001	C002	B003	B004	

Fuente: Establishing mechanical integrity of process equipment using a criticality-based maintenance program. (Ciliberti, 1996)

4.5.5.5 PASO 5: Clasificación de los equipos

Consiste en la obtención de resultados, luego de la aplicación de cada uno de los pasos del método de Antony Ciliberti y posterior clasificación de cada uno de los equipos según su criticidad a fin de ser presentados como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-12: Condición del equipo según su índice de criticidad basado en riesgo.

Código del equipo	Índice global de criticidad basada en riesgo	Condición
		ALTA CRITICIDAD
		MEDIA CRITICIDAD
		BAJA CRITICIDAD
		NO CRITICO

Fuente: Elaboración propia.

4.5.6 Metodología Jack-Knife

Según Viveros et al (2011) el método de análisis Jack-Knife corresponde a un estudio multi-criterio de las distintas variables involucradas, o que inciden en los modos de falla, en las cuales se puede mencionar: frecuencia de ocurrencia de falla (tasa de falla promedio), número de fallas, tiempo fuera de servicio (MTTR), costos asociados, entre otros. El mecanismo de análisis, es un diagrama en dos o más dimensiones, en donde cada una de éstas corresponde a una variable de estudio.

En el caso de trabajar con números de falla y tiempo fuera de servicio, en el gráfico se trazan líneas de referencia que denotan el número promedio de fallas y el tiempo promedio de reparación de los modos de falla, generando cuatro cuadrantes. Es importante mencionar que la línea que denota el número promedio de fallas es entendida como el límite de confiabilidad del sistema en análisis, por su parte la línea que denota el tiempo promedio de reparación de los modos de falla va a ser comprendida como el límite de mantenibilidad para el análisis de la variable.

Luego de tener definidos los cuadrantes cada uno de estos va a recibir una clasificación la cual se menciona a continuación:

- **Cuadrante Leve y poco frecuente:** En esta zona se incluyen bajas números de fallas en donde sus duraciones son cortas, por lo tanto se puede decir que en esta zona se tiene las fallas de menor importancia con respecto a los demás cuadrantes.

- **Cuadrante Agudo o Grave:** Se incluyen aquellas fallas que tienen un tiempo de parada que es extenso siendo su número de fallas bajo, en este caso la mantenibilidad pasa a ser ineficiente.

• **Cuadrante Crónico:** En esta zona se tiene que el número de fallas es más frecuente, aunque con tiempos de parada no tan elevadas, por lo tanto se dice que se tiene una baja confiabilidad.

• **Cuadrante Agudo – Crónico:** En esta zona se encuentra las fallas que tienen una alta frecuencia e involucran un elevado tiempo de parada, por lo tanto se tiene ineficiencia en la mantenibilidad y también reducción de la confiabilidad generando una No disponibilidad. Cabe mencionar que este cuadrante pasa a ser el más crítico.

Adicionalmente, se pueden trazar rectas de isoindisponibilidad de manera que se identifiquen los modos de falla que generen una indisponibilidad mayor a la planteada o esperada. Para esto, por lo general se utilizan escalas logarítmicas para que las líneas de isoindisponibilidad sean rectas. Considerando que estas rectas de isoindisponibilidad corresponden a combinaciones entre las variables que en este caso son tiempo de reparación y número de fallas que van a determinar a lo largo de la recta un mismo nivel de indisponibilidad.

La finalidad del Diagrama de Jack Knife es permitir determinar prioridades de manera gráfica, teniendo en cuenta el indicador que se quiera mejorar, ya sea confiabilidad, mantenibilidad o disponibilidad.

En la siguiente gráfica se presenta un ejemplo de un diagrama de Jack-knife en donde se indica lo que representa cada uno de sus componentes:

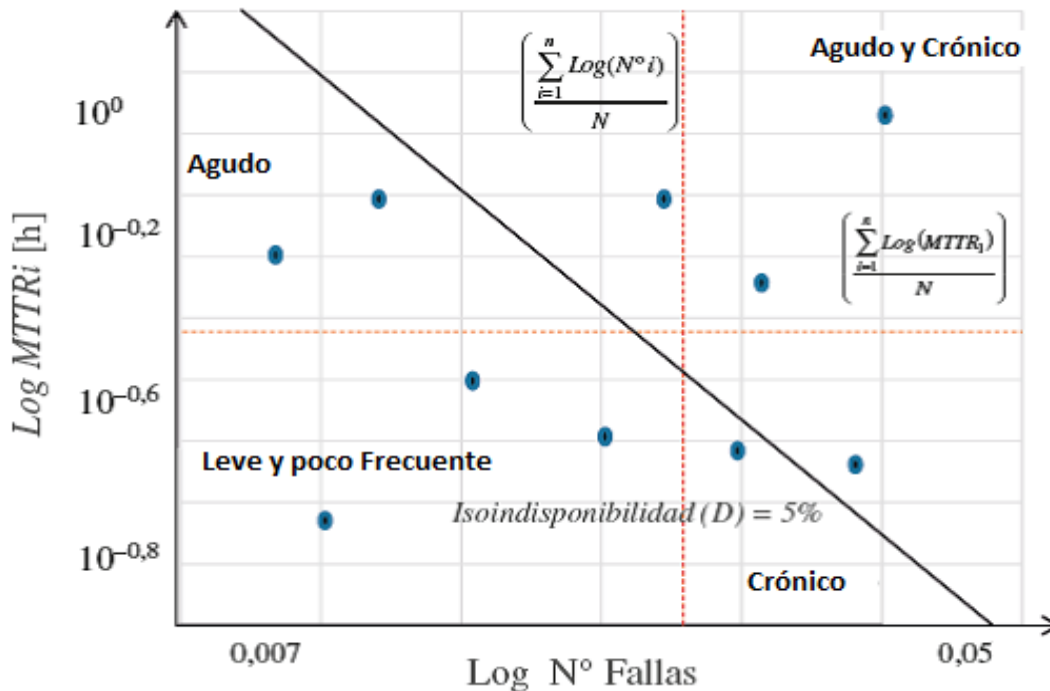


Ilustración 4-12: Ejemplo de Diagrama Jack-Knife.

Fuente: Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo, (Viveros et al, 2012)

Dónde:

$MTTR_i$ = Tiempo Medio de Reparación del Modo de falla i .

$N^\circ i$ = Número de Intervenciones del Modo de falla i .

N = Número de Modos de falla del Equipo o Sistema.

$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Log} (N^\circ i)}{N}\right)$ = Promedio del Logaritmo del Número de Intervenciones de los N modos de falla.

$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Log} (MTTR_i)}{N}\right)$ = Promedio del logaritmo del Tiempo Medio de Reparación de los N modos de falla.

4.5.7 Metodología MAFEC

Según Arata (2009) el MAFEC es una metodología que permite clasificar y recopilar información de los componentes críticos, permitiendo proyectar y diseñar las estrategias de mantenimiento para un equipo o sistema.

El análisis se compone de cuatro fases descritas a continuación:

Fase 1: Selección de máquina crítica.

Fase 2: Descomposición de la máquina.

Fase 3: Individualización del modo de falla y evaluación de la criticidad de los elementos.

Fase 4: Análisis de las causas de falla e individualización de los componentes críticos.

En la fase 1, el responsable de la unidad, con el apoyo de mantenimiento, define y localiza los equipos que afectan en mayor grado la productividad de los medios de trabajo y/o la calidad del producto o servicio.

La fase 2 se desarrolla estudiando cada una de las partes o piezas que se obtienen como resultado de una disgregación por subsistemas (o partes) de la máquina. Este análisis se realiza considerando los siguientes niveles de descomposición:

Nivel I: Es ocupado por la máquina, estación u operación tomada en consideración.

Nivel II: Fase del proceso o conjunto/grupo funcional de la máquina.

Nivel III: Subsistemas de componentes que desarrollan las operaciones elementales concurrentes en la ejecución del Nivel II.

Nivel IV: Componentes significativos críticos, en los que tiene origen la falla que se trasmite a los niveles superiores de la máquina. Es obtenida normalmente después de la fase 4.

Para el desarrollo de la fase 2 se utiliza la “Plantilla de descomposición de la máquina”.

Tabla 4-13: Plantilla de la descomposición de máquina.

Empresa							
Departamento							
Equipo							
Operación							
Código	Nivel I	Código	Nivel II	Código	Nivel III	Código	Nivel IV

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales, (Arata, 2009).

Las actividades del grupo de trabajo en la fase 3 y fase 4 están reglamentadas en la “Planilla MAFEC del medio de trabajo”, la cual entrega una modalidad operativa para individualizar cualitativa y cuantitativamente los componentes críticos. Esta fase colabora en la capacitación del equipo de operadores y mantenedores.

Cabe mencionar que la plantilla MAFEC del medio de trabajo se compone de dos sub-plantillas, la sección A que es la individualización de los modos de falla y cuantificación de la criticidad y sus efectos, y la sección B que es el análisis de la causa de falla e individualización del componente crítico, ambas se describen a continuación:

Sección A: Individualización de los modos de falla y cuantificación de la criticidad y sus efectos. Es importante estipular claramente cuáles son los modos de falla existentes en el sistema, por ello en la siguiente plantilla se crea un listado, que junto con los modos de falla contiene información que da a conocer la relevancia de cada una de las fallas.

Tabla 4-14: Individualización de los modos de falla y cuantificación de la criticidad y sus efectos.

Subsistema		Individualización de los modos de falla y cuantificación de la criticidad y sus efectos						
Código	Número de elementos	Tipo de falla sub-conjunto	Frecuencia [veces/año]	Efecto sobre la máquina	Efecto sobre el producto	Reparación provisoria	Tiempo de detención [Horas]	Indisponibilidad [Horas/año]

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales, (Arata, 2009).

Sección B. Análisis de la causa de falla e individualización del componente crítico. La plantilla permite establecer la relación entre la causa de falla y el componente que lo origina.

Tabla 4-15: Análisis de la causa de falla e individualización del componente crítico.

Subsistema		Análisis de la causa de falla e individualización del componente crítico						
Código	Criticidad del proceso	Índice de criticidad	Tipo de falla Componente	Causa de falla Componente	Parte de repuesto	Código repuesto	Síntomas observables	Síntomas externos

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales, (Arata, 2009).

En la siguiente tabla se presenta una aclaración de los elementos que se deben ser incorporados en cada una de las columnas de las plantillas expuestas anteriormente.

Tabla 4-16: Explicación Componentes de la Sección A.

Columna	Detalle
Número de Elementos	¿Cuál es la multiplicidad del sistema? Indicar cuantos subconjuntos existen en el subsistema bajo análisis.
Tipo de falla de subconjunto	¿Ha fallado alguna vez el subconjunto? ¿Qué tipo de falla se ha verificado? Indicar tipo de falla total o parcial.
Frecuencia [veces/año]	¿Con qué frecuencia se ha verificado la falla? Especificar el número de fallas ocurridas durante un año.
Efecto sobre la máquina	Especificar si al ocurrir la falla, la máquina se bloquea en forma parcial o total
Efecto sobre el servicio	¿Cuáles son los efectos sobre el producto/servicio? Indicar si el tipo de falla provoca degradamiento cualitativo sobre el producto/servicio.
Reparación provisoria	¿Existe la posibilidad de una reparación provisoria? Indicar si existe una reparación provisoria previa a la reparación definitiva.
Tiempo de detención [horas]	¿Cuánto tiempo está detenida la máquina al ocurrir la falla?
Indisponibilidad [horas/año]	¿Cuál es la indisponibilidad de la máquina? Calcular la indisponibilidad de la máquina como la multiplicación entre la frecuencia de falla y el tiempo de detención.

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales, (Arata, 2009).

Tabla 4-17: Explicación de los componentes de la Sección B.

Columna	Detalle
Criticidad del proceso	Criticidad en el servicio Ajustar valor de la criticidad de acuerdo a la tabla de valores de criticidad
Índice de la criticidad	Se obtiene multiplicando el valor de la criticidad por la indisponibilidad de la máquina
Tipo de falla del componente	Descripción del tipo de falla a la que está sujeto el componente
Causa de la falla del componente	Se indica cuál es la causa que produce la falla en el componente.
Parte de repuesto y código repuesto	Se describe la parte del repuesto adecuada para el reemplazo en cada falla.
Síntomas Observables	Síntomas inherentes a la falla. Se reporta en esta columna la “señal débil” observable directa o indirectamente de los primeros síntomas que surgen de la falla.
Síntomas Externos	Se reportan las señales o síntomas externos a la falla.

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales, (Arata, 2009).

Además Arata (2009) sugiere valores del índice de criticidad para procesos de distinta índole.

Tabla 4-18: Valores de criticidad para procesos de distinta índole.

Índice	Características de procesos
1	Ninguna criticidad cualitativa. El tipo de falla no influye sobre la calidad del producto/servicio
2	Marginalmente crítica. Calidad aceptable al límite de lo estándar.
3	Poco crítica. Calidad no aceptable.
4	Crítica.
5	Muy crítica. Calidad no aceptable, riesgo de enviar al cliente el producto fuera de estándar. Peligro para el personal.

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales, (Arata, 2009).

La fase 4 persigue el análisis de la falla y el origen de ésta, de forma de disponer de la información necesaria para un diagnóstico temprano de la falla o para realizar una reparación transitoria rápida, cuando la falla ha ocurrido.

Luego de haber realizado el análisis anterior es posible establecer el plan de mantenimiento productivo, en donde la jerarquización de los componentes críticos se realiza en base a causas y frecuencia, también es necesario confeccionar una pauta de inspección, indicando las frecuencias de cada intervención (turno, diaria, mensual) y la forma en que se realiza (máquina detenida o en funcionamiento).

Tabla 4-19: Plantilla MAFEC del plan de mantenimiento productivo.

Código Nivel II				Inspección/ prevenciones cíclicas							Acción Correctiva		
Código Nivel II	Código	Descripción Nivel II	Código	Descripción Nivel IV	Descripción	Frecuencia	Tiempo	MD	MF	O	M	Señal Débil	Acción Correctiva

Fuente: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales, (Arata, 2009).

Dónde:

MD: Máquina detenida.

MF: Máquina funcionando.

O: Acción realizada por el operador.

M: Acción realizada por el mantenedor.

4.5.8 Análisis RAM: Una metodología que permite determinar la criticidad de los activos.

4.5.8.1 Definición del Análisis RAM

Gómez & Medina, (2009) establecen que el análisis RAM (Reliability, Availability and Maintainability), o en sus siglas en español conocido como CDM (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad), permite pronosticar para un período determinado de tiempo la disponibilidad y el factor de servicio de un proceso de producción, basado en su configuración, en la confiabilidad de sus componentes y en la filosofía de mantenimiento. La base fundamental de este análisis es la selección de los TPPF (Tiempo promedio para

falla), TPEF (Tiempo promedio entre fallas) y TPPR (Tiempo promedio para reparar) que mejor caracterizan los diversos equipos del sistema de producción, tomados de bancos de datos genéricos de la industria, experiencia propia y opinión de expertos.

El análisis se sustenta en un modelo de simulación que toma en cuenta la configuración de los equipos, las fallas aleatorias, las reparaciones, las paradas parciales y totales y el mantenimiento planificado.

Una vez construido, el modelo RAM trabaja como un simulador de escenarios, que permite inferir el impacto que tienen en la disponibilidad y producción diferida del sistema: nuevos modelos de mantenimiento, cambios en la mantenibilidad de los equipos, aplicación de nuevas tecnologías, cambios en la configuración de los equipos dentro de los procesos de producción, cambios en la política de inventarios e implantación de nuevos métodos de producción.

Como resultado del proceso se obtiene una lista de criticidad de elementos o equipos, con base a su impacto a la disponibilidad y factor de producción diferida, con la finalidad de establecer las acciones que mitiguen el riesgo, y permitan optimizar la rentabilidad del negocio.

4.5.8.2 Definición de los componentes del Análisis RAM

Los componentes del análisis RAM son Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad, todos estos son descritos a continuación:

- **Confiabilidad:** Según Vergara (2007) es la probabilidad de un ítem a ejecutar una función requerida bajo condiciones establecidas por un periodo de tiempo determinado. La confiabilidad en su forma más simplificada es definida por la siguiente ecuación (4.8):

$$C(t) = e^{-\lambda*t} = e^{\frac{1}{TTPF}*t} \quad (4.8)$$

Donde,

t = tiempo de la misión (horas; días; semanas, meses, años etc.)

λ = tasa de falla

TTPF = $1/\lambda$ = tiempo promedio para fallar o tiempo promedio entre fallas.

Esta ecuación (4.8) tiene validez para tiempos de falla que sigan la distribución exponencial.

- **Disponibilidad:** Según Vergara (2007) la disponibilidad es la probabilidad de que un sistema o componente ejecute una función requerida en un instante de tiempo o sobre un periodo de tiempo específico cuando son operados y mantenidos de una manera preestablecida.

La disponibilidad se puede obtener de la siguiente ecuación (4.9):

$$A = \frac{TPEF}{(TPEF + TPPR)} \quad (4.9)$$

Donde,

A= Disponibilidad

TPEF= Tiempo medio entre fallas

TPPR= Tiempo promedio para reparar

- **Mantenibilidad:** Según Vergara (2007) es la probabilidad de que una acción de mantenimiento para un ítem bajo condiciones dadas de uso pueda ser llevado a cabo dentro de un intervalo de tiempo específico, cuando el mantenimiento es ejecutado bajo las condiciones dadas y usando los procedimientos y recursos establecidos. La mantenibilidad se puede calcular de la siguiente manera:

$$M(t) = e^{-\frac{1}{TPPR} * t} \quad (4.10)$$

Donde,

M: Mantenibilidad

TPPR: Tiempo promedio para reparar

t : tiempo misión (horas; días; semanas, meses, años etc.)

4.5.8.3 Modelo para realizar un análisis RAM

Según Gómez & Medina (2009) el plan de trabajo para efectuar un análisis RAM, se desarrolla en tres etapas fundamentalmente las cuales son representadas en la ilustración 4.13 con su respectiva explicación:

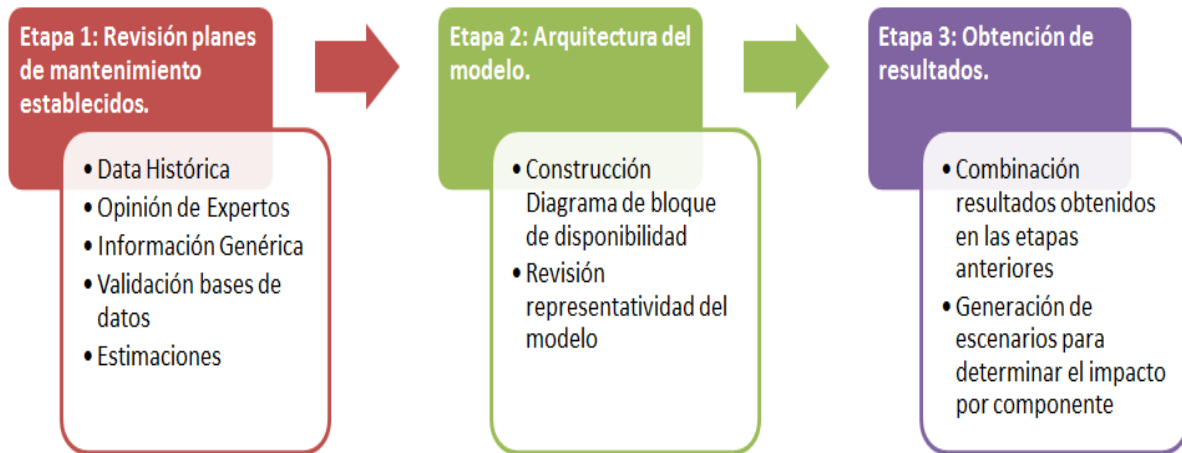


Ilustración 4-13: Modelo para efectuar un Análisis RAM

Fuente: Elaboración Propia

Primera Etapa

Consiste en la asignación de las tasas de falla y reparación de los componentes o equipos que conforman el sistema, así como la revisión de los planes de mantenimiento planificados y no planificados. Para esta etapa se realizan los siguientes pasos:

- **Recopilación de Data Histórica Propia:** Muchas empresas buscando la mejora continua de sus procesos han hecho grandes esfuerzos en la recolección de información de campo sobre datos de falla (tipo y frecuencia) y datos de reparación de sus equipos. La cantidad y calidad de este tipo de información son de gran importancia para este estudio pues reducen los valores de incertidumbre en el análisis.

- **Recopilación de Opinión de Expertos:** Existen casos donde no se cuenta con suficiente información de campo, y en ausencia de ella existen metodologías que permiten la recolección de información a partir de opiniones de expertos.
- **Búsqueda y adecuación de Información Genérica:** Con la finalidad de obtener resultados confiables, es extremadamente importante complementar la información de fallas propia del sistema, con datos de confiabilidad genéricos provenientes de reconocidas bases de datos internacionales como OREDA⁸, PARLOC⁹, IEEE¹⁰. Sin embargo, es vital adecuar esta información al entorno operacional bajo análisis, seleccionando de las bases de datos, solo aquellos modos de fallas que puedan realmente ocurrir en el entorno bajo estudio.
- **Revisión y Validación de las Bases de Datos:** En esta etapa, un equipo de trabajo dirige sus esfuerzos en validar la información de confiabilidad para cada elemento del sistema (TPPF y TPPR). Esta etapa incluye un conjunto de entrevistas formales de trabajo con personal asociado al proceso productivo (operadores, mantenedores, analistas, programadores, ingenieros de procesos), con la finalidad de intercambiar y aclarar las premisas referentes a la base de datos, y de revisar y definir la filosofía de operaciones del proceso productivo bajo estudio. Esto incluye la revisión de los diagramas funcionales, diagramas de proceso, registros de operación y fallas,

⁸ OREDA desde 1981 recolecta información a partir de 265 instalaciones, 16.000 equipos con 38.000 fallas y 68.000 records de mantenimiento. (Zapata, 2011)

⁹ PARLOC (The Pipeline and Riser Loss of Containment) es una base de datos de evaluación de riesgos en la industria de petróleo y gas en alta mar.

¹⁰ IEEE es una Base de Datos con más del 30% de la literatura actualizada en ingeniería eléctrica, electrónica y ciencias de la Computación, cubre 22 áreas especializadas en los temas de ingeniería.

(Fuente: <http://sistemadebibliotecas.udistrital.edu.co/index.php/bases-de-datos?sid=22:ieee>)

planes de mantenimiento y otras fuentes de información para complementar el análisis.

- **Estimaciones:** La información proveniente de los pasos anteriores se utiliza para obtener una estimación representativa de las tasas de falla y reparación característica del sistema o proceso. Esto se logra formulando relaciones algebraicas que permita usar distribuciones de probabilidad para combinar la evidencia con información genérica.

Segunda Etapa

Está relacionada con la revisión y verificación de la arquitectura del modelo; y la misma se realiza en las siguientes etapas:

- **Construcción del Diagrama de Bloque de Disponibilidad:** La configuración del sistema de producción debe representarse en modelos de bloque; lo cual implica la revisión detallada de los diagramas funcionales y diagramas de proceso.
- **Revisión de la representatividad del modelo:** Consiste en verificar la representatividad que el modelo diagramado tiene del sistema de producción bajo estudio. En esta etapa; el modelo se somete a prueba en reuniones con expertos en dicho proceso productivo.

Tercera Etapa

Consiste en la combinación de los resultados obtenidos en las etapas I y II. La información de tasas de falla y reparación actualizadas proveniente de la primera etapa se introduce al modelo obtenido en la etapa II.

A partir de este momento comienza el proceso final de modelaje, con la generación de un número pre-establecido de escenarios y la realización de un análisis de sensibilidad (en cada caso), para establecer el impacto de cada componente del sistema en los factores de disponibilidad y producción diferida del proceso analizado.

4.5.8.4 Resultados de un análisis RAM.

Gómez et al (2009) indican que entre los resultados del análisis se tienen los siguientes:

- 1) Pronóstico de la disponibilidad para un período determinado de tiempo.
- 2) Factor de producción diferida de un proceso de producción, basado en su configuración, en la confiabilidad de sus componentes y en la filosofía de mantenimiento.
- 3) Base de Datos con información técnica, operacional y de confiabilidad del sistema.
- 4) Modelo de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (Modelo CDM).
- 5) Perfil estocástico de la Disponibilidad y Producción Diferida por Unidad Operativa o Sistema Productivo (para el ciclo de vida definido).
- 6) Lista jerarquizada de los equipos y sistemas críticos, con base a su impacto al factor de disponibilidad.
- 7) Lista de recomendaciones técnicas para mitigar el riesgo e incrementar la disponibilidad.

4.5.9 Metodología de análisis basada en el cumplimiento de criterios del mantenimiento centrado en confiabilidad

Suárez & Collado (2003) establecen este método que permite determinar la criticidad de equipos industriales en tres categorías, esto mediante la ponderación de cuatro factores que serán descritos más adelante. Esta metodología basa su aplicación en el mantenimiento centrado en confiabilidad, dando enfoque principalmente a los factores que mejor se adaptan a la realidad operacional de las empresas.

El procedimiento consta de dos fases, las cuales serán descritas a continuación:

La primera fase consiste en la recolección y clasificación de datos a través de las siguientes etapas:

- a) Seleccionar el equipo a evaluar.
- b) Definir sus funciones.
- c) Definir sus estándares de funcionamiento.
- d) Definir los efectos de las fallas.
- e) Evaluar sus consecuencias.

La segunda etapa consiste en determinar la criticidad del elemento o equipo y para realizar esto, se evalúan los siguientes cuatro factores:

- 1) Velocidad de manifestación de la falla
- 2) Seguridad del personal y del ambiente
- 3) Costos de paro de producción.
- 4) Costos de reparación.

A continuación se describen cada uno de los factores:

- La determinación del factor velocidad de manifestación, requiere analizar el tiempo que puede transcurrir entre el momento en que se detecta la falla potencial y el momento en que ésta se transforma en funcional.
- El factor seguridad del personal y del ambiente se enfoca a evaluar las consecuencias que la falla podría ocasionar sobre las personas y su impacto sobre el medio ambiente.
- La evaluación del factor costos de paro de producción permite establecer criterios de categorización de los equipos según las consecuencias sobre el proceso de producción
- El factor costos de reparación permite determinar criterios de clasificación de las fallas según costos directos de la reparación. Para este factor es recomendable aplicar la metodología ABC (Pareto)¹¹ para clasificar los efectos según orden descendente de los costos totales.

¹¹ La clasificación ABC indica que los ítems se dividen en tres clases, la clase A comúnmente incluye el 20% de los ítems que representan el 80 % del valor/costo. Lo que equivale a la menor cantidad más significativa. La clase B incluye un 30% de los ítems representando el 15% del valor/costo. Por último la C incluye el 50% de los ítems que representan el 5% del valor/costo. (Morán & Gomes, 2005)

Es importante mencionar que el valor relativo que se otorga a cada uno de los factores va a depender directamente de la peligrosidad de las actividades de la organización con las personas y el ambiente, así como del valor de sus equipos que se utilizan para la realización de sus actividades económicas. Por lo tanto Suarez & Collado (2003) sugieren que se deba analizar y sopesar la importancia de cada factor mencionado según el contexto de análisis para la asignación de valores porcentuales.

Pasos para efectuar la metodología.

En la ilustración 4.14 se presentan los pasos para llevar a cabo esta metodología con la debida explicación de lo que incluye cada uno:

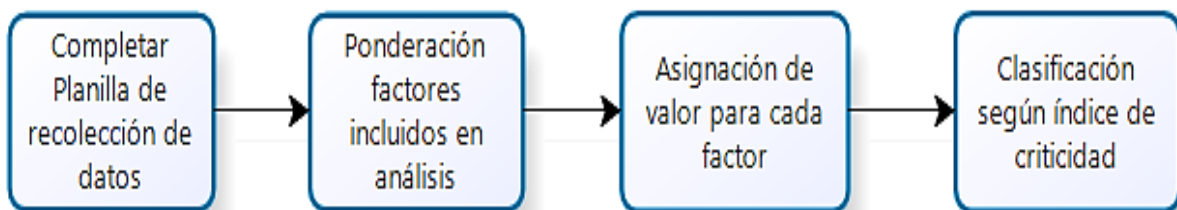


Ilustración 4-14: Pasos para llevar a cabo método de criticidad basado en M.C.C

Fuente: Elaboración Propia

El primer paso se relaciona con la primera fase y tiene que ver con completar la planilla de recolección de datos de los elementos del sistema, dicha planilla se muestra a continuación:

Tabla 4-20: Formato para la recolección de datos del sistema.

Equipo o Elemento: _____
 Código: _____ Ubicación: _____
 Fecha de elaboración: _____ Analista: _____

FUNCIÓN	ESTÁNDAR DE FUNCIONAMIENTO	EFECTOS DE LA FALLA	CONSECUENCIAS
----------------	---------------------------------------	--------------------------------	----------------------

Fuente: Metodología de clasificación de equipos según su criticidad utilizando los criterios del mantenimiento centrado en confiabilidad, (Suárez & Collado, 2003)

El segundo paso tiene que ver primero con determinar la ponderación de cada uno de los factores y luego el análisis de los factores para lo cual se utilizan las siguientes tablas de evaluación:

Tabla 4-21: Factor de velocidad de manifestación de la falla.

PERIODO P-F (Potencia- Funcional)	PONDERACIÓN
Muy corto, no da tiempo a detener el equipo	100% del valor asignado al factor
Corto, es posible detener el equipo	50% del valor asignado al factor
Suficiente, es posible programar intervención	20% del valor asignado al factor

Fuente: Metodología de clasificación de equipos según su criticidad utilizando los criterios del mantenimiento centrado en confiabilidad, (Suárez & Collado, 2003)

Tabla 4-22: Factor de seguridad del personal y del ambiente.

DESCRIPCIÓN	PONDERACIÓN
Sin consecuencias	0% del valor asignado al factor
Efecto temporal sobre personas, no afecta el ambiente	30% del valor asignado al factor
Efecto temporal sobre el ambiente y las personas	80% del valor asignado al factor
Efecto irreversible sobre personas, no sobre ambiente	80% del valor asignado al factor
Efecto sobre ambiente, irreversible sobre personas	100% del valor asignado al factor

Fuente: Metodología de clasificación de equipos según su criticidad utilizando los criterios del mantenimiento centrado en confiabilidad, (Suárez & Collado, 2003)

Tabla 4-23: Factor de costos de paro de producción.

CRITERIO	PONDERACIÓN
No implica demora en plazos de entrega	0% del valor asignado al factor
Implica demora leve	60% del valor asignado al factor
Implica retraso significativo y pérdida de clientes	100% del valor asignado al factor

Fuente: Metodología de clasificación de equipos según su criticidad utilizando los criterios del mantenimiento centrado en confiabilidad, (Suárez & Collado, 2003)

Tabla 4-24: Factor de costos de reparación.

CLASIFICACIÓN SEGÚN PARETO	PONDERACIÓN
A	100% del valor asignado al factor
B	50% del valor asignado al factor
C	10% del valor asignado al factor

Fuente: Metodología de clasificación de equipos según su criticidad utilizando los criterios del mantenimiento centrado en confiabilidad, (Suárez & Collado, 2003)

El último paso tiene que ver con clasificar el elemento o equipo según el índice de criticidad, el cual está en función de la ponderación global asignada por el analista para los factores considerando que la suma de la ponderación de la importancia de los factores debe ser de un cien por ciento. En la siguiente tabla se muestra las ponderaciones totales y su respectivo índice de criticidad:

Tabla 4-25: Índice de criticidad en función de la ponderación global.

PONDERACIÓN TOTAL	INDICE DE CRITICIDAD
Más de 90%	Crítico
Entre 50 y 90%	Semi-crítico
Menos de 50%	No crítico

Fuente: Metodología de clasificación de equipos según su criticidad utilizando los criterios del mantenimiento centrado en confiabilidad, (Suárez & Collado, 2003)

5 Propuestas relacionadas al análisis de criticidad

En el presente trabajo se indican dos propuestas relacionadas con el estudio del análisis de criticidad, la primera indica un modelo a seguir para llevar a cabo dentro de una empresa un análisis de criticidad que permita jerarquizar los activos de ésta y posteriormente elaborar programas de mantenimiento para aquellos equipos que sean calificados como críticos con su respectivo plan de control.

La segunda propuesta tiene que ver con análisis de las distintas metodologías que permiten efectuar un análisis de criticidad enfocadas en un impacto de producción. El objetivo de este análisis es que permita determinar a los encargados la(s) metodología(s) a utilizar en la jerarquización de sus activos dependiendo de su contexto operacional y del nivel de análisis que se quiera lograr, por lo tanto se incluyen clasificaciones de las metodologías, ventajas, desventajas, comentarios, recomendaciones entre otras.

5.1 Primera Propuesta: Modelo para efectuar un análisis de criticidad

Se presenta una propuesta que muestra un modelo para efectuar un análisis de criticidad con el fin de obtener una jerarquización de activos, teniendo en cuenta el contexto operacional de donde se está realizando el análisis, además de considerar la posibilidad de posibles modificaciones en la aplicación de las metodologías según la situación lo amerite.

El objetivo de este modelo es establecer una base que pueda ser utilizada para elaborar planes de mantenimiento para los equipos críticos dentro de una empresa, ya sea en su etapa de operación o de diseño. Siendo recomendable aplicar en nuevas instalaciones o para empresas que no están teniendo resultados tan eficientes.

Esta guía se compone de seis pasos, los cuales deben ser desarrollados en forma secuencial y están compuestos por los que se indica en la ilustración 5.1.

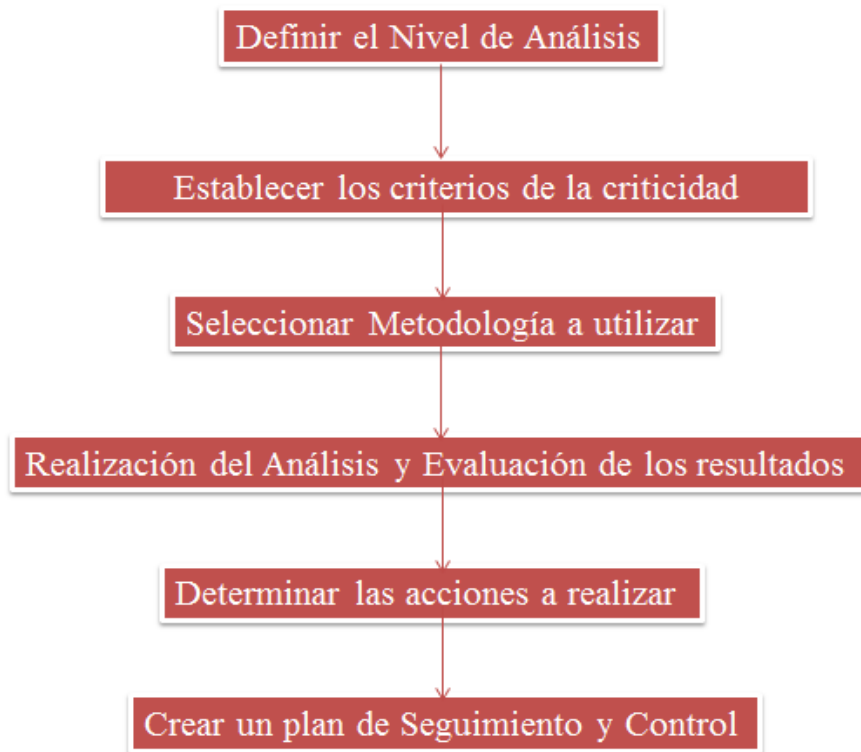


Ilustración 5-1: Pasos para efectuar un análisis de criticidad.

Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes Ilustraciones (5.2 y 5.3) se muestra el flujo para llevar a cabo el modelo, y por consiguiente desarrollar un análisis de criticidad con las respectivas acciones posteriores a la jerarquización de activos. Además se procede a explicar lo que involucra cada una de las seis etapas incluidas en el modelo.

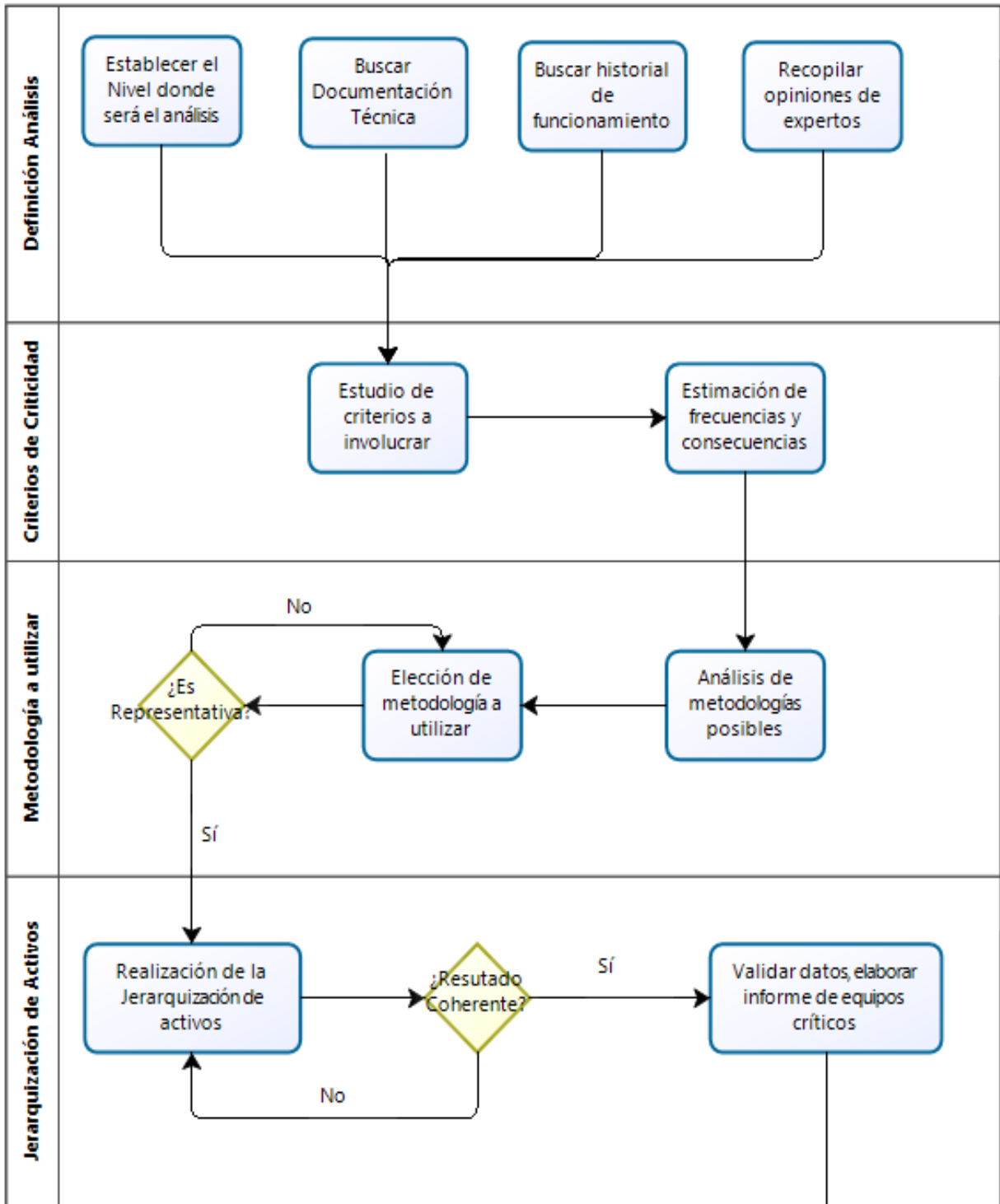


Ilustración 5-2: Parte 1- Modelo para efectuar Análisis de Criticidad.

Fuente: Elaboración Propia.

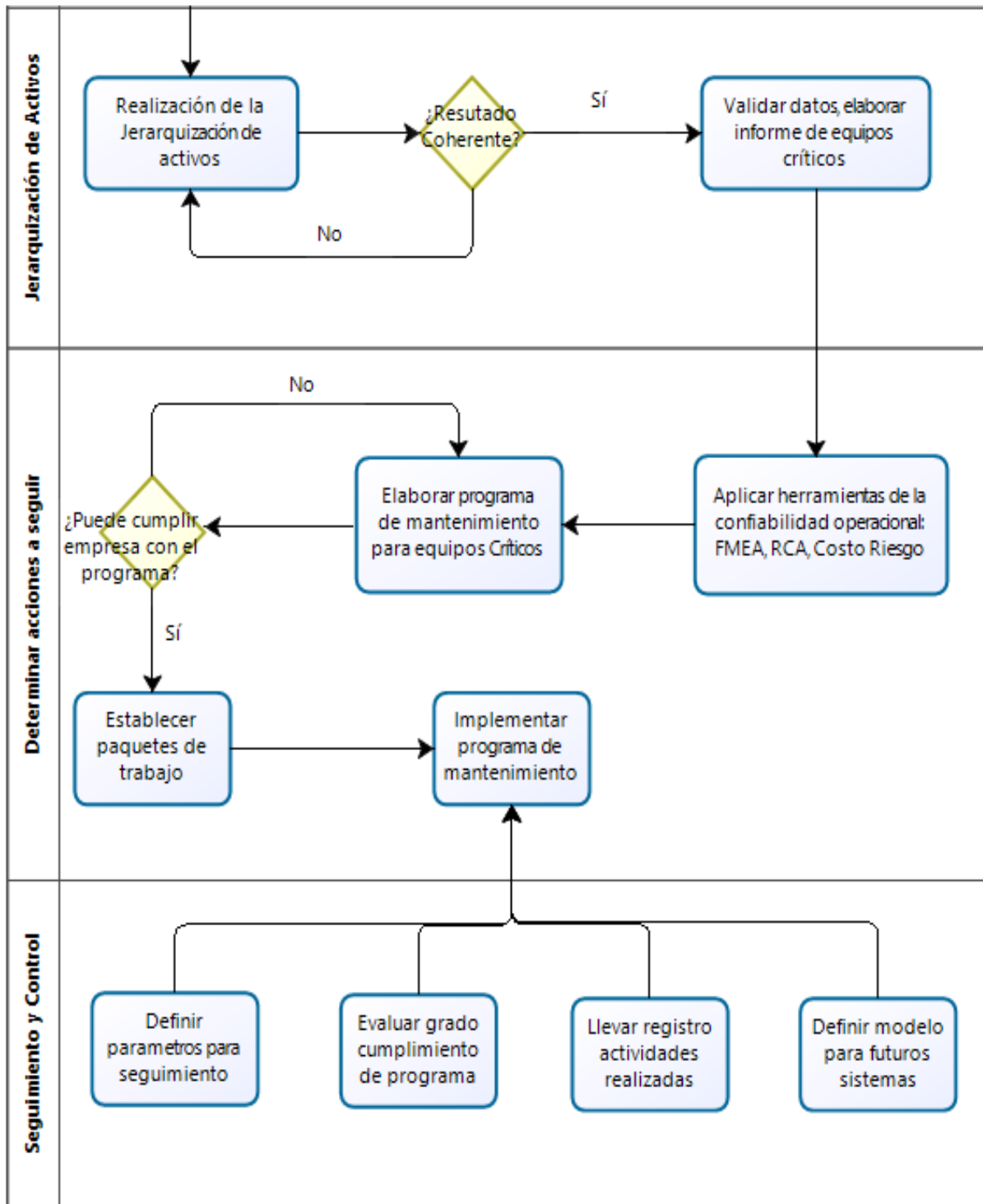


Ilustración 5-3: Parte 2 - Modelo para efectuar un Análisis de criticidad

Fuente: Elaboración Propia.

Paso N°1: Definir el nivel de análisis:

En esta primera etapa se debe definir en qué niveles se efectuara el análisis, ya sea en la instalación, proceso, sistema, equipo o elemento, teniendo en cuenta las necesidades de información requerida para efectuar el análisis. Huerta (2000) presenta un estilo de agrupación utilizado frecuentemente que permite observar la jerarquía de los activos según su composición, entendiéndose que dependiendo que la complejidad de la composición afectara directamente el grado de análisis que se deba efectuar.

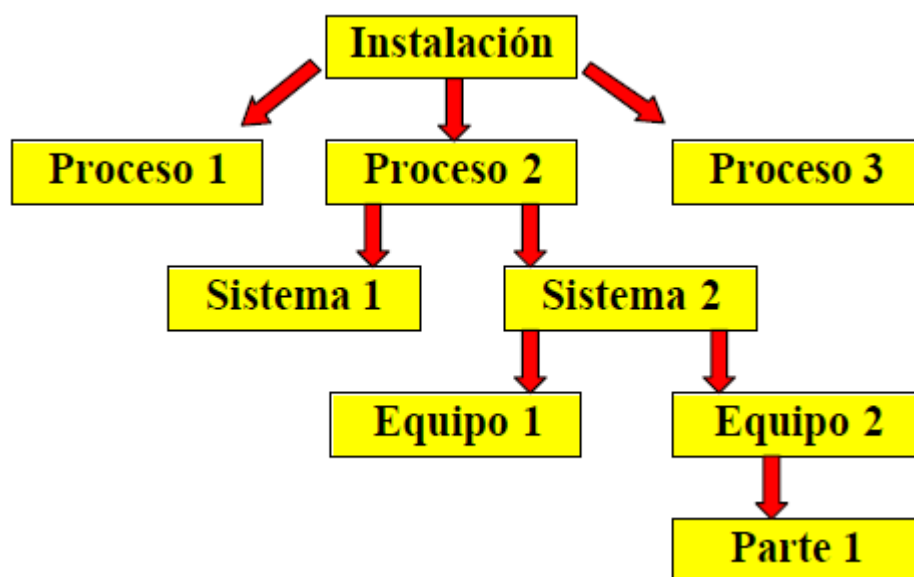


Ilustración 5-4: Ejemplo de Agrupación de activos.

Fuente: El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional, (Huerta, 2000)

Una vez definido el nivel de análisis se deberá comenzar a recopilar información relevante al nivel seleccionado como la documentación técnica, el historial de funcionamiento, opiniones de los operadores y expertos.

Paso N°2: Establecer los criterios de la Criticidad

Los componentes principales de la criticidad de los activos son la frecuencia de la falla y las consecuencias de éstas, y para realizar una estimación de ambas variables que permita elaborar un análisis de criticidad se recurre a criterios y rangos que se encuentran previamente establecidos.

A continuación se presentan algunos de los criterios que comúnmente son utilizados para llevar a cabo un análisis de criticidad, junto con un resumen de lo que éstos representan:

- **Frecuencia de Fallas.** Representa las veces que falla cualquier componente del sistema que produzca la pérdida de su función, es decir, que implique una parada, en un periodo de un año.
- **Nivel de Producción.** Representa la producción aproximada por día de la instalación y sirve para valorar el grado de importancia de la instalación a nivel económico.
- **Tiempo Promedio para Reparar.** Es el tiempo promedio por día empleado para reparar la falla, se considera desde que el equipo pierde su función hasta que esté disponible para cumplirla nuevamente. El MTTR, mide la efectividad que se tiene para restituir la unidad o unidades del sistema en estudio a condiciones óptimas de operabilidad.

- **Impacto en la Producción.** Representa la producción aproximada porcentualmente que se deja de obtener (por día), debido a fallas ocurridas (diferimiento de la producción). Se define como la consecuencia inmediata de la ocurrencia de la falla, que puede representar un paro total o parcial de los equipos del sistema estudiado y al mismo tiempo el paro del proceso productivo de la unidad.
- **Costo de Reparación.** Se refiere al costo promedio por falla requerido para restituir el equipo a condiciones óptimas de funcionamiento, incluye labor, materiales y transporte.
- **Impacto en la Seguridad Personal.** Representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasionen daños a equipos e instalaciones y en los cuales alguna persona pueda o no resultar lesionada.
- **Impacto Ambiental.** Representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasionen daños a equipos e instalaciones produciendo la violación de cualquier regulación ambiental, además de ocasionar daños a otras instalaciones.
- **Impacto Satisfacción al Cliente.** En él se evalúa el impacto que la ocurrencia de una falla afectaría a las expectativas del cliente. En este caso se considera cliente a las áreas a las cuales se les suministran los servicios industriales.

Paso N°3: Seleccionar Metodología a utilizar.

La elección de la metodología que se utilizara depende de los pasos anteriores, dado que no existe una estructura única para realizar una jerarquización de activos, es decir, éstas se van adecuando según el contexto operacional en el cual se encuentre y el nivel de análisis que se quiera lograr.

Existe un gran número de metodologías que pueden servir para realizar un análisis de criticidad que evalúan distintos parámetros y se representan en diferentes formas como matrices, porcentajes, tablas o gráficas. Es importante destacar que se puede complementar entre metodologías a fin de obtener un análisis más completo.

A continuación en la Tabla 5.1 se presenta un resumen de las metodologías que pueden ser seleccionadas para llevar a cabo un análisis de criticidad:

Tabla 5-1: Resumen Metodologías a utilizar para efectuar Análisis de Criticidad

Metodología	Tipo de Análisis	Enfoque
Flujograma de Parra & Crespo	Cualitativa	Producción del Sistema
CTR	Semi Cuantitativa	Producción del Sistema
D.S.	Semi Cuantitativa	Área de Mantenimiento y Operaciones
HAZOP	Cualitativo	Etapas de Operación o Diseño
Criticidad de Antony Ciliberti	Semi Cuantitativa	Operaciones y Medio Ambiente
Jack Knife	Cuantitativa	Modos de Falla
MAFEC	Cualitativa	Producción del Sistema
Análisis RAM	Cuantitativa	Disponibilidad y Producción del Sistema
Análisis basado en M.C.C	Semi Cuantitativo	Mantenimiento centrado en la Confiabilidad

Fuente: Elaboración Propia

Paso N°4: Realización del Análisis y Evaluación de resultados.

Luego de haber seleccionada la o las metodologías más adecuadas para llevar a cabo el análisis bajo el contexto operacional, éste debe ser desarrollado, obteniéndose como resultado una clasificación de los activos o expresado de otra forma una jerarquización de éstos. Luego los resultados obtenidos deberán ser analizados con el objetivo de validarlos, a fin de detectar cualquier posible desviación que amerite la reevaluación de la criticidad, además de elaborar un informe indicando cuales son los equipos críticos el cual puede servir para presentar a las unidades de las empresas, como también para dejar un registro.

Paso N°5: Determinar las acciones a realizar.

Posterior a la obtención del análisis de criticidad, se deben definir las acciones a seguir para los equipos que se han clasificados como críticos los cuales pasan a ser prioritarios, con el fin de mitigar el impacto potencial de la falla o la frecuencia que tenga ésta. Es por esto que debe establecer un programa de mantenimiento, el cual debe estar sujeto a las condiciones y requerimientos de la empresa. En éste se establecen paquetes y programas de trabajo, donde se definen funciones, responsabilidades, plazos, inspecciones a ser desarrolladas por el equipo de trabajo designado. Para lograr elaborar y cumplir con este programa es que se debe recurrir a las herramientas de la confiabilidad operacional, destacando las siguientes:

- 1) FMEA:** Esta herramienta proporciona la orientación que el grupo de trabajo designado debe seguir para identificar y evaluar las fallas potenciales y el efecto que tienen éstas. Además determinar acciones para eliminar o reducir la posibilidad de tener fallas que potencialmente afecten a la confiabilidad.

2) RCA: Se basa en el supuesto que tratar las causas de un problema es más efectivo que tratar los síntomas. Este debe realizarse en forma sistemática, con la debida documentación de las actividades incluidas en su proceso, permitiendo así disminuir la variabilidad de los procesos y estar mejor preparado ante los riesgos. Algunas de las técnicas que se pueden utilizar en un análisis causa-raíz son: Diagrama de Ishikawa, Análisis de Pareto, Análisis árbol factor causal, entre otras.

3) Análisis Costo Riesgo Beneficio: Esta técnica permite modelar y analizar distintos escenarios con el fin de determinar el momento oportuno para realizar una actividad ya sea de mantenimiento, inspección, reemplazo, servicio etc. Además de conocer la viabilidad económica de un proyecto o una inversión. Los resultados permitirán optimizar la toma de decisiones que influirá en la confiabilidad.

Paso N°6: Crear un plan de seguimiento y control.

Posterior a realizar todos los pasos anteriores se debe crear y establecer un plan de Seguimiento y Control, con la finalidad de garantizar el cumplimiento de las acciones que fueron determinadas a realizar, junto con la continua evaluación de la criticidad de los equipos analizados.

Dentro de los objetivos de este plan se puede mencionar:

- Definir exactamente los parámetros que serán evaluados, junto a esto establecer los plazos de evaluación, las responsabilidades y la documentación que deberá ser elaborada.

- Evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos del programa de trabajo establecido para aquellos equipos calificados como críticos.
- Llevar un registro de cada una de las actividades que sean realizadas ya sea planificadas o no planificadas por el programa de trabajo.
- Establecerse como una base para futuros planes y como un modelo a seguir para otros sistemas que puedan ser evaluados.

5.2 Segunda Propuesta: Análisis Comparativo de las Metodologías de Criticidad enfocadas al Impacto en Producción.

En esta propuesta se incluye cada una de las metodologías que fueron estudiadas anteriormente, y dentro de sus objetivos está facilitar la decisión del encargado de mantenimiento sobre que metodología utilizar según el contexto de su empresa y del sistema o equipo que quiere analizar.

El análisis está compuesto de tablas que incluyen una descripción de cada metodología, además de sus ventajas y desventajas, junto a comentarios y recomendaciones relacionadas con su aplicación.

A continuación se presenta cada una de las metodologías y su respectivo análisis:

Tabla 5-2: Análisis Metodología Flujograma de Parra & Crespo

Metodología	Método Flujograma de Parra & Crespo
Tipo de Análisis	Cualitativo
Enfoque	Producción del Sistema
VARIABLES INVOLUCRADAS	Las variables que son utilizadas para el análisis son: Medioambiente, calidad, seguridad, trabajo, entrega, confiabilidad y mantenibilidad.
Sistema de Ejecución	Se ejecuta un programa de preguntas en series, evaluando así cada variable, clasificando en cada una de las preguntas hasta efectuarlas todas.
Producto del análisis	Se obtiene la jerarquización de los equipos sumado a un concepto de rendimiento por cada variable estudiada.
Posibilidad de Modificación	Sí, agregando nuevas variables dentro del flujograma de decisión.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Para realizar el análisis y posterior clasificación se evalúan varios criterios relacionados con el componente, lo que permite obtener una idea general de su funcionamiento. • Puede ser ocupado como complemento para generar una idea rápida de la criticidad del elemento.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • La evaluación queda sujeta al criterio y experiencia de los analistas. • Los límites de los rangos de clasificación no se encuentran claramente establecidos, por lo tanto resulta difícil estimar cuanta diferencia existe entre una clasificación y otra.
Comentarios y Recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Este método depende de gran manera de los analistas que lo ejecuten, por lo tanto se recomienda que al ser ejecutado se tenga un conocimiento previo del componente y su contexto. • Es recomendable ocuparlo junto a otras metodologías cuantitativas, donde pueda aportar como una visión más global y rápida de interpretar entregando un contexto.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5-3: Análisis Metodología CTR (Criticalidad Total por Riesgo)

Metodología	CTR (Criticalidad Total por Riesgo)
Tipo de Análisis	Semi-Cuantitativo
Enfoque	Producción del sistema
VARIABLES INVOLUCRADAS	Las variables a estudiar son: Producción, Flexibilidad Operacional, Costos de mantenimiento, Seguridad Higiene y ambiente.
Sistema de Ejecución	Evaluación de factores otorgándole una calificación, los cuales serán incluidos en un modelo de cálculo de criticidad y representados en una matriz.
Producto del Análisis	Los equipos son jerarquizados en base a cuatro factores y representados en una matriz que indica distintas zonas de criticidad.
Posibilidad Modificación	Sí, modificando los factores o el modelo de cálculo de criticidad.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Fundamenta sus bases en el concepto del riesgo, el cual es proporcional a la criticidad. • Este método complementa la ponderación de factores cuantitativos con una evaluación cualitativa, representados por medio de una matriz que define las áreas de criticidad, lo que facilita la interpretación.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • La evaluación está sujeta al grado de experiencia y conocimiento que posean los analistas. • Los componentes son evaluados individualmente, por lo tanto se pierde el concepto general de un sistema.
Comentarios y Recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Este método posee límites definidos en áreas para cada una de sus clasificaciones, por lo tanto se puede apreciar más claramente cuál es la diferencia entre una y otra. Además es representado en una matriz que facilita la presentación e interpretación de los datos. • Para que el resultado de este método sea eficiente, se debe analizar cuidadosamente las ponderaciones de las variables que serán incluidas y los encargados deben tener un conocimiento previo del componente/equipo que será analizado.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5-4: Análisis Metodología D.S (Diógenes Suarez)

Metodología	D.S. (Diógenes Suarez)
Tipo de Análisis	Semi-Cuantitativo
Enfoque	Área de Mantenimiento y Operacional
VARIABLES INVOLUCRADAS	Las variables a estudiar son: Número de fallas, Efectividad, Backlog, Disponibilidad de Repuesto, Cumplimiento de plan de mantenimiento, conexión de sistema, costos de producción, Seguridad Higiene y Ambiente.
Sistema de Ejecución	Se evalúan distintos parámetros relacionados con el área de mantenimiento y operacional, todo esto por medio de ponderaciones que deben hacer los analistas, para finalmente ser introducidas en un modelo de cálculo de criticidad.
Producto del Análisis	Se obtiene una clasificación de los equipos representada por un valor porcentual de criticidad definido por el modelo, enfocado en el área de mantenimiento y operaciones.
Posibilidad de Modificación	Sí, modificando las variables a incluir, o las ponderaciones de éstas.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • La clasificación de las zonas de criticidad posee límites que permiten entender de mejor manera cuanta diferencia hay entre una y otra. • Este método considera variables que se relacionan tanto como el área de mantenimiento como operacional.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Se basa en la evaluación subjetiva de los analistas para evaluar el criterio elegido en cada parámetro. • El modelo se compone de constantes que pueden resultar difícil de ajustar ante modificaciones.
Comentarios y Recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Es importante que los analistas posean conocimiento del equipo/componente al momento de realizar este análisis dado que se basa en la ponderación de criterios para introducirlos en el modelo. • Una de las principales virtudes es que este método considera una cantidad considerable de variables que no son incluidas por otros métodos además combina las áreas de mantenimiento y operaciones. • Sería recomendable combinar esta metodología con alguna otra gráfica para tener una interpretación visual.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5-5: Análisis Metodología HAZOP

Metodología	Hazop
Tipo de Análisis	Cualitativo
Enfoque	Etapas de Operación y Diseño
VARIABLES INVOLUCRADAS	Las variables a estudiar son de operación que pueden provocar riesgos o desviaciones como por ejemplo: Temperatura, Caudal, Viscosidad, Presión, altura entre otras.
Sistema de Ejecución	Se ejecuta a través de etapas donde se realiza un análisis sistemático de causas y consecuencias, utilizando palabras guías para finalmente determinar medidas correctoras
Producto del Análisis	Se obtiene una estructura que permite indicar medidas correctoras para aquellas variables que presentan desviaciones en sus procesos.
Posibilidad Modificación	Sí, modificando las palabras guías que se incluyen en el análisis.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Permite evaluar etapas de diseño • No tiene límite de evaluación de variables por lo tanto se pueden evaluar todas las que se estime conveniente. • Introduce el concepto de palabras guías que van orientando acerca de las causales de la desviación.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • El análisis está condicionado al nivel de conocimiento y experiencia de los analistas. • El grado de criticidad de las variables no es cuantificado por lo tanto resulta complejo clasificar cual es más crítica que otra.
Comentarios y Recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Este método depende del uso adecuado de las palabras guías para que sea eficiente y poder entender los riesgos. • Es recomendable utilizarlo junto a otra técnica cuantitativa, dado que permitiría complementar el análisis de criticidad con la causal de la desviación/riesgo y entregar a su vez las medidas correctoras.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 5-6: Análisis Metodología Criticidad de Antony Ciliberti

Metodología	Criticidad de Antony Ciliberti
Tipo de Análisis	Semi-Cuantitativo
Enfoque	Operaciones y Medio Ambiente
VARIABLES INVOLUCRADAS	Las variables involucradas tienen que ver con procesos como temperaturas, presiones, velocidades de rotación, diamante de materiales peligrosos, además de seguridad y ambiente.
Sistema de Ejecución	Se realizan ponderaciones de factores asociados a seguridad, ambiente y producción, los cuales determinarán una notación de criticidad que será incluida en una matriz con zonas de criticidad definidas.
Producto del Análisis	Se obtiene una clasificación de los equipos según su nivel de criticidad enfocándose en el área de operaciones y medioambiente, representada a través de una matriz con distintas zonas de criticidad.
Posibilidad de Modificación	La estructura de elaboración no puede ser modificada, pero sí la asignación de los factores dependiendo el contexto y manteniendo los límites definidos para cada rango.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Se basa en los principios del análisis de riesgo, que está directamente relacionado con la criticidad. • El resultado de la metodología entrega una notación que permite identificar a los equipos, además de generar una matriz que facilita la interpretación del análisis.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • La metodología solo se enfoca a evaluar factores correspondientes a operación, ambiente y seguridad, por lo tanto se puede decir que existen algunas variables relacionadas con el mantenimiento que no son consideradas. • Se constituye de una evaluación subjetiva, que debe realizarse con conocimientos previos para su resultado efectivo.
Comentarios y Recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Esta metodología da gran énfasis al impacto en medio ambiente, dejándolo al mismo nivel que el impacto operacional. • Se puede decir que la evaluación de la frecuencia puede resultar un tanto ambigua, por lo tanto se debe definir claramente ésta para que no afecte en el resultado de criticidad • Es importante resaltar que esta metodología entrega una notación y una matriz que facilita la interpretación.

Fuente: Elaboración Propio.

Tabla 5-7: Análisis Metodología Jack Knife

Metodología	Jack-Knife
Tipo de Análisis	Cuantitativo
Enfoque	Modos de falla
VARIABLES INVOLUCRADAS	Las variables a estudiar pueden ser número de fallas, tiempos fuera de servicio, costos asociados a mantención, entre otras.
Sistema de Ejecución	Se genera un diagrama de dos dimensiones, en donde cada dimensión corresponde a una variable de estudio, además los ejes vienen definidos por el promedio de los datos de cada variable, dando a cada cuadrante una clasificación.
Producto del Análisis	Se obtiene una representación gráfica, en donde los equipos serán clasificados en cuadrantes que indican distintos grados de criticidad.
Posibilidad Modificación	Tiene que ver con seleccionar las variables que serán incluidas en el diagrama.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Es de rápida interpretación dada su representación gráfica • Se pueden utilizar distintas combinaciones entre las variables, las que permiten establecer objetivos.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Solo permite evaluar dos variables al mismo tiempo. • Las variables incluidas obtienen la misma ponderación, por lo tanto no se puede agregar distintos grados de importancia según la variable analizada.
Comentarios y Recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede decir que esta metodología es directa dado que los datos son graficados obteniendo inmediatamente una representación de criticidad según el cuadrante donde queden éstos. • Esta metodología no incluye un modelo de cálculo, dado que las variables obtienen la misma ponderación en el gráfico. • Sería relevante complementar con alguna metodología cualitativa que permitiera explicar más el contexto del análisis.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5-8: Análisis Metodología MAFEC

Metodología	MAFEC
Tipo de Análisis	Cualitativo
Enfoque	Producción del Sistema
VARIABLES INVOLUCRADAS	Las variables utilizadas son efectos de la falla, tiempos de detención, repuestos entre otras.
Sistema de Ejecución	El análisis se compone de fases donde se van evaluando los modos de falla según una estructura propuesta, para finalmente establecer un plan de mantenimiento productivo para aquellos equipos definidos como críticos.
Producto del Análisis	Se obtiene un plan de mantenimiento productivo, a través de una planilla de trabajo para los equipos más críticos seleccionados por causa y frecuencia.
Posibilidad de Modificación	Sí, se pueden agregar elementos a las tablas de individualización de los modos de falla.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Esta metodología evalúa todos los componentes de un sistema. • Genera un plan de mantenimiento para inspecciones futuras. • Explica cada uno de los componentes que se deben analizar.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • No entrega una clasificación definida de criticidad, por lo tanto no tiene límites, quedando éstos a juicio del analista. • Los grados de criticidad no son cuantificables en esta metodología.
Comentarios y Recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Esta metodología permite analizar causas y consecuencias de fallas potenciales, pero no entrega una clasificación exacta de criticidad. • En la evaluación se toma en cuenta todos los componentes de un sistema lo que permite entender el contexto del funcionamiento. • Es recomendable complementar con alguna metodología cuantitativa, que genere una jerarquización más exacta y MAFEC se ocupe de la explicación.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5-9: Análisis Metodología RAM

Metodología	Análisis RAM
Tipo de Análisis	Cuantitativo
Enfoque	Disponibilidad y Producción
VARIABLES INVOLUCRADAS	Las variables a estudiar son configuración de equipos, fallas aleatorias, reparaciones, paradas parciales y totales, mantenimiento planificado entre otras.
Sistema de Ejecución	Se compone de tres etapas, donde primero se recauda información relevante del sistema, se establece un modelo de disponibilidad y luego se definen distintos escenarios donde se evalúa el impacto.
Producto del Análisis	Se obtiene la jerarquización de los equipos en base a factores de producción y disponibilidad, además de generar un modelo de representación de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.
Posibilidad Modificación	Se relaciona con los tipos de escenarios que se pueden elegir para realizar el análisis, junto con las formas de recopilar la información.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Debido a que el sistema va siendo segregado se va obteniendo un concepto de funcionamiento. • La evaluación se basa en el concepto de disponibilidad y su importancia.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • No establece un rango de clasificación de los equipos o componentes, dado que este va quedando a criterio del evaluador. • Requiere de una cantidad importante de información la cual puede ser difícil de obtener.
Comentarios y Recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Esta metodología aporta con el concepto de disponibilidad de los equipos, si bien entrega una idea general del sistema analizado, no genera una clasificación definida. • Es recomendable complementar esta metodología con alguna que genere una jerarquización y que pueda ser representada gráfica o matricialmente.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5-10: Análisis Metodología Criticidad basada en M.C.C

Metodología	Criticidad basada en M.C.C
Tipo de Análisis	Semi Cuantitativo
Enfoque	Mantenimiento centrado en confiabilidad
VARIABLES INVOLUCRADAS	Las variables utilizadas son velocidad de manifestación de la falla, seguridad del personal y ambiente, costos de paro de producción y costos de reparación.
Sistema de Ejecución	La metodología cuenta con dos fases, la primera es donde se recolecta información y se analiza los efectos y consecuencias de la falla. La segunda es donde se selecciona la ponderación de los factores para determinar la criticidad.
Producto del Análisis	Se obtiene la clasificación de los equipos según su nivel de criticidad, representado en valores porcentuales obtenidos de la combinación de factores de su modelo de cálculo.
Posibilidad de Modificación	Pueden ser modificados los factores y su ponderación dependiendo si la situación lo amerita.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Evalúa variables de distinta índole en su ejecución. • Entrega una clasificación que trae límites definidos, por lo tanto se pueden realizar comparaciones y definir metas. • Genera una planilla con el contexto de la falla.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • El método de ponderación depende en gran parte del conocimiento de los analistas. • Solo permite evaluar los elementos como unidades independientes, se pierde el concepto de sistema.
Comentarios y Recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Esta metodología genera una jerarquización principalmente en base a criterios determinados por los analistas. • Se puede decir que en general es simple, y permite ir evaluando equipos individualmente, por lo tanto sería conveniente complementar con alguna metodología que se enfoque en el funcionamiento de sistemas para generar una idea más completa.

Fuente: Elaboración Propia

5.3 Análisis de las propuestas realizadas

Las dos propuestas son presentadas como un apoyo para los encargados de mantenimiento de empresas de sectores industriales, y se puede decir que ambas están relacionadas entre sí permitiendo realizar de forma más exacta una jerarquización de activos.

La primera propuesta del modelo está enfocada en permitir comprender la estructura a seguir en la realización de un análisis de criticidad para jerarquizar los activos, y posterior a eso generar programas de mantenimiento que permitan llevar un control más estricto y anteponerse a situaciones de riesgo que causen consecuencias negativas dentro de la empresa.

Por su parte la segunda propuesta del análisis comparativo de las metodologías está diseñada para permitir a los encargados adquirir un mayor conocimiento acerca de éstas, con tal de determinar cuál se adecua mejor a las condiciones operacionales de su empresa, dar la posibilidad de aplicar nuevas metodologías en su análisis o establecer combinaciones entre éstas que lleven a obtener un mayor nivel de detalle en la jerarquización de los activos.

Con respecto al modelo de aplicación sus dos primeros pasos que son definir el nivel de análisis y establecer los criterios de criticidad, se puede decir que van a establecer los límites del estudio a llevar a cabo, dados los parámetros que sean seleccionados por los analistas. A su vez estos pasos condicionaran al siguiente que es donde se elige la metodología a utilizar. En esta etapa cabe mencionar que dependiendo de la elección que se haga, se determinará de cierto modo el nivel de exactitud que tendrá el análisis, por lo tanto la elección de metodología a utilizar debe ser con un respectivo análisis y justificación.

Una vez elegida la metodología o combinaciones de estas se debe realizar el análisis, y verificar que los resultados sean coherentes a la realidad operacional, esto para evitar errores que vayan alterar las etapas siguientes.

La etapa de determinación de acciones a realizar es tan importante como la jerarquización de activos, dado que es en ésta que se establece las causas que llevan a que los activos sean críticos, el estudio de las posibles fallas, todo esto con el fin de establecer un plan que pueda ser llevado por la empresa y que permita mitigar las consecuencias junto con disminuir las frecuencias de falla.

Por último, el paso de seguimiento y control tiene que ver con velar por el cumplimiento del programa de trabajo, para que éste se interiorice como una práctica habitual dentro de la empresa.

En relación al análisis de las metodologías se puede destacar lo siguiente:

De las metodologías cualitativas donde se incluye Flujograma de Parra & Crespo, HAZOP y MAFEC, se puede decir que permiten el análisis de distintas variables, en general no incluyen límites establecidos y entregan una visión global del funcionamiento del equipo o instalación analizados. Como aspecto negativo mencionar que no definen rangos preestablecidos de jerarquización, quedando estos a juicio del encargado, por lo tanto éste debe preocuparse de mantener el mismo criterio para todos los niveles de análisis.

Acerca de HAZOP y MAFEC, hay que destacar que aparte de clasificar a los equipos por su nivel de criticidad incluyen establecer medidas correctoras que facilitan la elaboración de programas de mantenimiento.

Con respecto a las metodologías Semi-Cuantitativas donde se incluyen CTR, D.S, Ciliberti, Criticidad basada en M.C.C, todas éstas son definidas a través de estructuras en las cuales el analista debe determinar rangos de los parámetros que son incluidos en los respectivos modelos de cálculo. Dentro de lo positivo que tienen estas es que definen rangos de criticidad, por lo tanto facilita el establecimiento de objetivos para ir mejorando.

Es importante destacar que si se realizan modificaciones en la calificación de los parámetros de las variables a evaluar, éstas deben ser coherentes con el modelo respectivo.

En relación a las metodologías cuantitativas que son Jack-Knife y RAM, se puede decir que ambas requieren de una cantidad importante de data para ser realizadas. Estas demuestran dos formas distintas de realizar el análisis de forma cuantitativa, Jack- Knife siendo más directa en la presentación de resultados, en cambio RAM incluyendo un análisis más elaborado en donde se evalúan distintos escenarios.

6 Conclusiones

Teniendo en cuenta el estudio realizado para este trabajo, junto con la elaboración de propuestas relacionadas con el análisis de criticidad se presentan las siguientes conclusiones:

El análisis de criticidad es una importante técnica que va a permitir a las empresas de sectores industriales jerarquizar sus activos independiente de la complejidad estructural, aportando así en la confiabilidad operacional, siendo éste uno de los principales enfoques del mantenimiento en la actualidad.

La correcta realización del análisis va a posibilitar la generación de planes de mantenimiento para los equipos que sean establecidos como críticos, lo que permitirá dirigir los esfuerzos de mantenimiento preventivo para éstos, junto con otras herramientas de la confiabilidad operacional, con el fin de reducir los riesgos, y comprender las causas y efectos de las potenciales fallas que se puedan presentar.

Para realizar una jerarquización de activos, es importante conocer uno de los conceptos que se relaciona directamente con ésta, el cual es el Riesgo, que permite enfocar esfuerzos y recursos para lograr un cuidado de los activos. También es relevante mencionar que se debe tener claro los criterios que se incluirán en el análisis, pudiendo ser estos relacionados a operaciones, mantenimiento, medioambiente, costos entre otros.

Acerca de las metodologías que permiten llevar a cabo un análisis de criticidad, se debe destacar que existe una gran variedad que realizan análisis cualitativos, cuantitativos o mixtos. La diferencia principal que tienen éstas radica en el enfoque que poseen para realizar la jerarquización evaluando distintos parámetros y presentando el resultado a través de diferentes formas como gráficas, tablas, matrices, porcentajes de criticidad.

Dentro de los aspectos en común que presentan las metodologías está que todas necesitan de un profundo análisis por parte de los encargados en desarrollarlas por lo tanto éstos deben tener un conocimiento previo acerca del equipo o sistema a jerarquizar. Esto se justifica debido a que muchas metodologías incluyen evaluaciones de rangos, los cuales deben ser lo más exactos posibles.

Un aspecto a destacar es que gran parte de las metodologías permiten modificaciones en su ejecución, y esto se debe a que estas técnicas por lo general fueron creadas bajo un contexto de operación, y han sido adaptadas para ser aplicadas en distintos tipos de condiciones operacionales. Por lo tanto para realizar estos ajustes, se deben estudiar las limitaciones que las metodologías presentan, y los requerimientos acerca del contexto operacional.

Es recomendable combinar la aplicación de las metodologías con el fin de obtener un análisis con mayor nivel de detalle y exactitud. Es por esto que las combinaciones más adecuadas tienen que ver entre metodologías que muestren de forma clara la clasificación de los activos y metodologías que se enfoquen en las causas, consecuencias y medidas correctoras de los activos que sean clasificados como críticos.

En relación a las propuestas, la primera del modelo de aplicación para llevar a cabo un análisis de criticidad, se presenta como una alternativa a seguir para empresas que no tengan jerarquizados sus activos, y por lo tanto no tengan programas de mantenimiento establecidos para éstos. Cabe mencionar que para llevar a cabo este modelo, se debe analizar el contexto operacional de la empresa, con el fin de realizar de formar coherente cada uno de las etapas que componen el modelo. El objetivo final de esta propuesta es que se interiorice en los encargados de mantenimiento y permita analizar la mayor cantidad de sistemas presentes en su empresa.

La segunda propuesta del análisis comparativo entre las metodologías enfocadas al impacto en producción, corresponde a la determinación de los principales componentes de cada metodología, lo que permita facilitar la decisión del encargado de mantenimiento sobre las técnicas que se adecuan de mejor forma para realizar un análisis en su empresa, así también como un resumen sobre cada metodología que posibilite la instrucción de aquellas que son desconocidas para el analista.

7 Referencias

- Abella, M. (2008). *Mantenimiento Industrial*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales* . Santiago, Chile: RIL Editores.
- Ciliberti, A. (1996). Establishing mechanical integrity of process equipment using a criticality-based maintenance program. *National Petroleum Refiners Association.*, 1-5.
- Espinoza, F., & Salinas, G. (2011). *Gestión de activos industriales: Modelos y herramientas*. Santiago, Chile: EAE.
- García, O. (2012). *Gestión moderna del mantenimiento* . Boyacá, Colombia: Editorial de la U.
- García, S. (2010). *La contratación del mantenimiento industrial*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- García, S. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Gómez, F. (1998). *Tecnología del Mantenimiento Industrial*. Murcia, España: Editum.
- Gómez, H., & Medina, N. Y. (2009). Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y mantenibilidad en sistemas productivos. *Reliability and Risk Management S.A.*, 1-10.
- González, J. (2007). *Análisis de criticidad en el sistema de alimentación de alúmina y fluoruro de las celdas de reducción de C2*. Caracas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar .
- González, J., & Amendola, L. (2009). Modelo de criticidad operacional en generadores de parques eólicos. *12th International Conference on Project Engineering* (págs. 2331-2340). Zaragoza, España: AEIPRO.
- Gutiérrez, E., Agüero, M., & Calixto, I. (2007). Análisis de criticidad integral de activos. *R2M*, 2-4.
- Huerta, R. (2000). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. *Ingeniería mecánica*, 13-19.

- Morán, W., & Gomes, H. (2005). Una forma de clasificación multicriterio. *Revista Pesquisa e desenvolvimento engenharia de producao*, 55-66.
- Mulet, E., Ramos, J., Bovea, M., & Chulvi, V. (2011). *Problemas resueltos de análisis de riesgos en instalaciones industriales*. Castellón, España: Universidad Jaime I.
- Parra, C., & Crespo, A. (2012). *Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos*. Sevilla, España: Ingeman.
- Pérez, G. (2009). *Propuesta de acciones de mantenimiento basadas en el mantenimiento centrado en confiabilidad a los ventiladores de enfriamiento*. Barcelona, Venezuela: Universidad de Oriente.
- Ríos, M., & Sanchez, J. (1997). *Eficacia Organizacional*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Sanzol, L. (2010). *Implantación de mantenimiento TPM en planta de cogeneración*. Navarra, España: Universidad Pública de Navarra.
- Suárez, D., & Collado, M. (2003). Metodología de clasificación de equipos según su criticidad utilizando los criterios de mantenimiento centrado en confiabilidad. *Información Tecnológica*, 143-148.
- Vergara, E. (2007). *Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del sistema de crudo diluido de petrozuata*. Caracas: Universidad Simón Bolívar.
- Viveros, P. (2011). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Revista chilena de la ingeniería*, 125-138.
- Yañez, M., Gómez, H., & Valbuena, G. (2004). *Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo*. Táchira, Venezuela: Reliability and Risk Management S.A.
- Zapata, J. (2011). *Manual de datos Oreda*. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.