

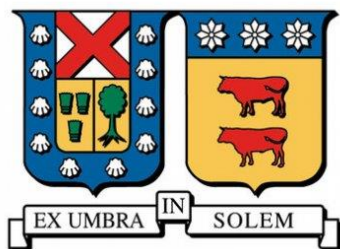
2018

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD OPERACIONAL MEDIANTE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN, PARA EVALUACIÓN DE RIESGOS EN LA ETAPA DE DISEÑO DE UN PROYECTO INDUSTRIAL

LALANNE ROJAS, VALENTINA ALEJANDRA

<http://hdl.handle.net/11673/43449>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD OPERACIONAL
MEDIANTE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN, PARA EVALUACIÓN DE
RIESGOS EN LA ETAPA DE DISEÑO DE UN PROYECTO INDUSTRIAL**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL**

AUTOR

VALENTINA ALEJANDRA LALANNE ROJAS

PROFESOR GUÍA

FREDY KRISTJANPOLLER

VALPARAÍSO

JUNIO, 2018

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de título tiene como objetivo principal desarrollar una metodología de análisis de criticidad operacional mediante herramienta de simulación para evaluar riesgos en la etapa de diseño de un proyecto industrial y establecer la importancia de definir un buen plan de mantenimiento.

Para poder explicar de mejor manera la metodología, se realizó un caso práctico en el cual se evalúa la implementación de una planta siderúrgica con foco en el proceso de laminación del acero con una capacidad productiva de 600.000 [ton/año] para colada continua de planchones y 1.000.000 [ton/año] para colada continua de palanquillas.

El caso práctico se llevó a cabo en varias etapas en las cuales fue necesaria una exhaustiva búsqueda de información fidedigna de los datos. Éste se inicia con una descripción de todo el proceso productivo involucrado, mencionando los equipos que deben ser utilizados y se establece una configuración lógica funcional de los mismos. Luego de esto y acorde a la investigación obtuvieron los tiempos medios entre falla y tiempos medios de reparación con los cuales se puede dar inicio al análisis de criticidad.

Posterior al análisis de criticidad se realizó una simulación en el software Crystal Ball a modo de determinar la disponibilidad del sistema con un error de un 0,03%, obteniendo una disponibilidad total del sistema de un 89,53%, con la cual se realizó un análisis comparando los niveles de criticidad de cada subsistema y la indisponibilidad de los mismo para poder determinar cuales serían los subsistemas a los cuales hay que tener en observación. Los equipos críticos encontrados en el análisis fueron la máquina corrugadora, el limpiador electrolítico, el laminador de temple y el estañador electrolítico.

Para los cuales acorde al plan de mejoras se debe tener un plan de mantenciones con una frecuencia mayor de revisiones y además, se deben tener un stock especial de repuestos para estos equipos.

Del plan de mejora definido en el trabajo, se menciona también que es necesario tener un stock de repuestos para los equipos que generan altos costos de producción por falla como lo son las máquinas de colada continua y los hornos de recalentamiento.

Finalmente se debe mencionar la importancia que tiene poder realizar un análisis desde la etapa de diseño de una planta, ya que permite poder tomar decisiones importantes en lo que respecta a los costos de inversión en las fases iniciales del proyecto hasta los costos de operación del mismo, y la forma de ser eficiente con estos recursos, implica aprovechar la herramientas que actualmente existen disponibles para poder predecir el comportamiento de la planta diseñada y definir una estrategia de implementación de mantenimiento que se ajuste a las necesidades encontradas y así evaluar los riesgos existentes desde una fase temprana del proyecto.

INDICE DE CONTENIDOS

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	5
2. OBJETIVOS	8
1.1. OBJETIVO GENERAL	8
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. MARCO TEÓRICO	9
3.1. EVALUACIÓN DE UN PROYECTO	9
3.2. COSTO DEL CICLO DE VIDA DE UN PROYECTO	11
3.3. CONSIDERACIÓN DEL RIESGO EN LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN.....	12
3.4. FUENTE DE RIESGO: LA TECNOLOGÍA.....	13
3.5. ANÁLISIS DE RIESGO	15
3.6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS.....	17
3.7. ANÁLISIS DE SISTEMAS PRODUCTIVOS EN LA FASE DE DISEÑO	18
3.8. ANÁLISIS DE SISTEMAS PRODUCTIVOS EN FASE DE OPERACIÓN	21
3.9. INDICADORES RELEVANTES EN UN SISTEMA PRODUCTIVO: CONFIABILIDAD Y MANTENIBILIDAD.....	23
4. METODOLOGÍA	25
4.1. ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	25
4.2. RELIABILITY BLOCK DIAGRAM.....	28
4.3. SIMULACIÓN CRYSTAL BALL	34
5. CASO PRÁCTICO	39
5.1. ETAPA 1 SELECCIÓN DEL PROYECTO: PLANTA SIDERÚRGICA	39
5.2. ETAPA 2 CONFIGURACIÓN EQUIPOS	44
5.3. ETAPA 3 TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS Y TIEMPO MEDIO PARA REPARAR.....	46
5.4. ETAPA 4 ANÁLISIS DE CRITICIDAD	46
1° Nivel de Análisis	46
2° Estimación de la frecuencia de falla funcional	48
3° Estimación impactos o consecuencias de fallas	49
4° Cálculo nivel de criticidad.....	54
5.5. ETAPA 5 SIMULACIÓN	55
5.6. ETAPA 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
5.7. ETAPA 7 PLAN DE MEJORAS	60
5.7.1 Objetivos	60
5.7.2 Modelo de mantenimiento.....	61
5.7.3 Tareas de mantenimiento	63
5.7.4 Plan de mantenimiento	64
5.7.5 Personal de mantenimiento	65
5.7.6 Importancia de la disponibilidad de repuestos	67
5.7.7 Control sobre las mantenciones correctivas	68
6. CONCLUSIONES.....	69
7. REFERENCIAS	71

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la actualidad pocas son las empresas que consideran la mantención de los equipos de producción un factor de diferenciación para la empresa, dado que han sido capaces de notar que comparten tecnologías con los competidores y por lo tanto la firma que obtendrá una ventaja de esto, será la firma que sea capaz de gestionar esta tecnología de la manera más eficiente. Esto ha comenzado a tener importancia dado que los costos propios de mantenimiento de una empresa pueden superar el 30% de los costos de producción propios de una empresa intensiva en activos físicos (Arata, 2008).

Lo que muchas veces ha pasado desapercibido para los ejecutivos, hoy en día es bien obvio: un mal mantenimiento y baja confiabilidad significan: bajos ingresos, más costos de mano de obra y altos "stocks", clientes insatisfechos y productos de mala calidad, lo que, para las empresas, el costo puede significar decenas y hasta centenas de millones de dólares(Tavares, 2000).

Es por esto que hay que tener en consideración la importancia del mantenimiento para las empresas, dado que, gracias a la globalización, las empresas se han visto obligadas a cumplir con estándares de calidad internacionales que les permita ser competitivas a nivel nacional e internacional con el fin de poder pertenecer a una categoría World Class Manufacturing (WCM), entre los cuales, el mantenimiento es un pilar importante por lo cual debe ser una prioridad para las empresas tener un apropiado plan de mantenimiento que les permita conservar sus equipos, herramientas e instalaciones en las mejores condiciones de funcionamiento.

Una parte importante del mantenimiento, es el mantenimiento preventivo el cual a partir de 1966, con la difusión de las computadoras, el fortalecimiento de las

Asociaciones Nacionales de Mantenimiento, creadas al final del periodo anterior y la sofisticación de los instrumentos de protección y medición, la Ingeniería de Mantenimiento pasó a desarrollar criterios de predicción o previsión de fallas, con el objetivo de optimizar el desempeño de los grupos de ejecución del mantenimiento (Tavares, 2000)

Por lo tanto una de las formas de poder gestionar de forma más eficiente estas nuevas tecnologías en las industrias que poseen una gran inversión de activos físicos mencionadas anteriormente, es mediante un mantenimiento preventivo eficaz utilizando una metodología potente como lo es el análisis de criticidad operacional el cual 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 (Huerta, 2010).

Ahora, ¿por qué aplicarlo en la etapa de diseño de un proyecto?, esto es debido a la necesidad de poder predecir el comportamiento que tendrán estos equipos durante su funcionamiento, determinar qué tan viable será adquirirlos, determinar cómo debiesen ser configurados para aprovechar su máxima capacidad y determinar desde un inicio los posibles riesgos que existirán en la criticidad operacional del proyecto. Además, en la fase de diseño de equipos o sistemas, se debe buscar el equilibrio entre la disponibilidad y el costo. Dependiendo de la naturaleza de requisitos del sistema, el diseñador puede alterar los niveles de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad, de forma a disminuir el costo total del ciclo de vida (Mesa, 2006). El costo total del ciclo de vida corresponde a la suma de todos los costos iniciales de proyecto y adquisición, hasta los costos de operación, mantenimiento y disposición final. La idea

que se plantea es la siguiente, generar un aumento de los CAPEX, por ende se invierte más tiempo y recursos en un estudio de los equipos en las etapas iniciales del proyecto, logrando reducciones significativas de los OPEX en la etapa de operación del proyecto, dado que el 65% de las oportunidades de reducción de costes se encuentra en las fases iniciales de un proyecto, esto se da ya que en las etapas iniciales se tiene mayor flexibilidad para poder hacer cambios, permitiendo que al tener un buen diseño del proyecto y sus necesidades lleve a mayores beneficios.

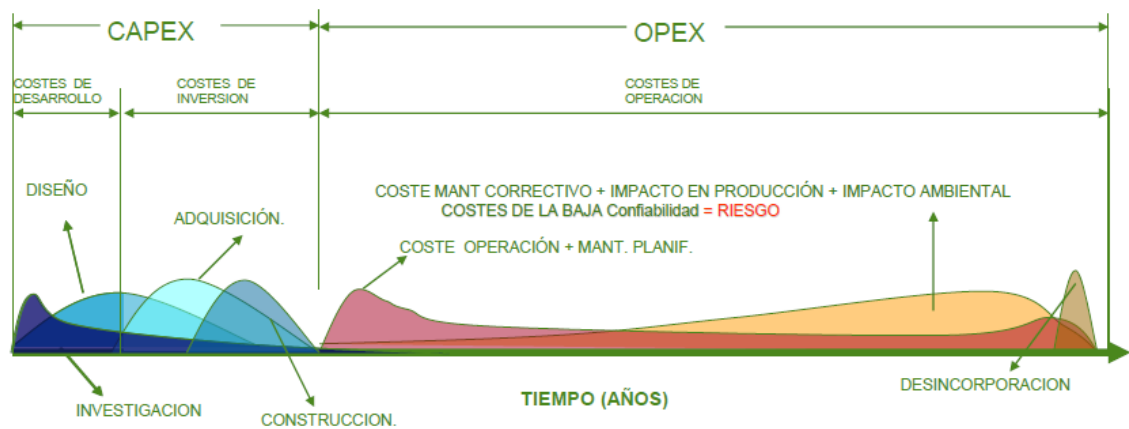


Figura 1 Life Cycle Cost

2. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología de análisis de criticidad operacional mediante herramientas de simulación para evaluar riesgos en la etapa de diseño de un proyecto industrial.

1.2. Objetivos Específicos

- Comprender la importancia del análisis de los sistemas productivos en la fase de diseño para determinar los riesgos en los cuales incurren en esta etapa.
- Plantear como deben ser realizados los análisis de función de vida (confiabilidad) y reparación (mantenibilidad) de los equipos, para ser utilizado en la simulación.
- Plantear los diferentes escenarios posibles, profundizando en las distintas configuraciones lógicas de fallas existentes y los indicadores más relevantes que serán utilizados para realizar un correcto análisis de criticidad.
- Comprender la importancia, objetivos y la aplicación del análisis de criticidad operacional para su uso en múltiples industrias.
- Realizar un análisis de riesgo para determinar los indicadores que incorporan criticidad operacional con mayor variabilidad en la simulación para ayudar en la toma de decisiones.

3. MARCO TEÓRICO

3.1.Evaluación de un proyecto

La evaluación de un proyecto es el proceso de identificar, cuantificar y valorar los costos y beneficios que se generen de éste, en un determinado periodo de tiempo. Siendo su objetivo, determinar si la ejecución del proyecto es conveniente para quien lo lleve a cabo. En este caso, interesa la evaluación de un proyecto de inversión , el cual se define como la propuesta por el aporte de capital para la producción de un bien o la prestación de un servicio, mediante la cual un sujeto decide vincular recursos financieros líquidos a cambio de la expectativa de obtener unos beneficios, también líquidos, a lo largo de un plazo de tiempo que se denomina vida útil (Santos, 2008).

La trayectoria de todo proyecto, que se materializa generalmente en una obra física, constituye su ciclo de vida. En éste se distinguen tres estados sucesivos: preinversión, inversión y operación. En el primero, se prepara y evalúa el proyecto, a fin de determinar si es conveniente o no ejecutarlo; en el segundo, si se decide llevarlo a cabo, se efectúa la construcción de la obra; por último, en el estado de operación, se pone en marcha la obra terminada, de acuerdo con lo que se proyectó, la que generará durante su vida útil los beneficios netos estimados en el estado de preinversión (Mideplan, 1998).

En este caso se le prestará principal atención a la etapa de preinversión , en la cual se debe realizar un estudio de factibilidad que se puede definir como el conjunto orgánico de los estudios de mercado, técnicos, organizacionales y económicos emprendidos para verificar la conveniencia de la inversión, y que sustentan, por lo tanto, la decisión de proceder a realizar el proyecto (Arata, 2008).

El estudio de factibilidad se divide según (Fondo de Crédito Industrial, 2000) en:

Estudio de Mercado: Tiene como finalidad determinar si existe o no una demanda insatisfecha que justifique, bajo ciertas condiciones, la puesta en marcha de un programa de producción de ciertos bienes o servicios en un espacio de tiempo.

El estudio de mercado es fundamental para el análisis de otros aspectos técnicos, económicos y financieros que determinen la toma de decisiones, entre las que destacan la selección del tamaño de la planta y de la localidad geográfica donde será instalada.

Ingeniería del Proyecto: La ingeniería de un proyecto industrial tiene por objeto llenar una doble función, primero, la de aportar la información que permita hacer una evaluación económica del proyecto; y segundo, la de establecer las bases técnicas sobre las que se construirá e instalará la planta, en caso de que el proyecto demuestre ser económicamente atractivo. La primera fase de la ingeniería del proyecto consiste en la realización de una serie de actividades que tienen por objeto obtener la información necesaria para la adopción de un proceso de producción adecuado; es necesario que se seleccione la tecnología a utilizar, es decir, el paquete de técnicas, procesos y prácticas, la determinación de los insumos, de las materias primas y las obras civiles, etc. En la segunda fase se especifica la maquinaria, equipos y obras civiles para obtener cotizaciones y presupuestos, y con esta base, determinar la magnitud de la inversión requerida.

Tamaño y Localización: Se conoce como la capacidad instalada de producción de la misma. Esta capacidad se expresa en la cantidad producida por unidad de tiempo, es decir volumen, peso, valor o unidades de producto elaborados por año, mes, días y turno, hora, etc. En algunos casos la capacidad de una planta se expresa, no en términos de la cantidad de producto que se obtiene, sino en función del volumen de materia prima que se procesa. En las plantas industriales que cuentan con equipos de diferentes capacidades, la

capacidad de la planta se da en función del equipo de menor capacidad. En aquellas industrias que elaboran diversos lotes de productos de diferentes características, el tamaño de la planta se suele especificar con respecto a la producción de un lote tipo o mezcla de productos.

Organizacionales: Se definirá el tipo de empresa y su estructura, en la cual se refiere a los recursos humanos disponibles para administrar el proyecto, ya sea número de empleados, cargos, organigrama, etc.

Económicos y Financieros: Se determinan los recursos financieros necesarios para la instalación y puesta en marcha de la planta industrial, además se deberá demostrar que el proyecto es rentable y que puede realizarse con los recursos financieros programados.

3.2.Costo del ciclo de vida de un proyecto

Un ciclo de vida de un proyecto son las diferentes etapas que recorre el proyecto desde que se concibe la idea hasta que se materializa en una obra, se producen los beneficios y en algunos casos hasta su clausura.

Para poder evaluar un proyecto, es necesario tener estudios técnicos y financieros necesarios para esto, dado que existen numerosos costos asociados con la adquisición, operación y mantenimiento del proyecto. Sólo los costos que son relevantes para la decisión y de importancia en la cantidad son necesarios para tomar una decisión de inversión válida. Los costos son relevantes cuando son diferentes para una alternativa en comparación con otra; los costos son significativos cuando son lo suficientemente grandes como para hacer una diferencia creíble en el LCC de una alternativa del proyecto.

Para la evaluación del proyecto, se debe realizar un análisis en base de costos del ciclo de vida, como medida de decisión en cuanto a un proyecto u otro, el cual se basa en estimar los costos generales de las alternativas del proyecto y seleccionar el diseño que asegure

que la instalación proporcionará el costo total de propiedad más bajo consistente con su calidad y función. El análisis del ciclo de vida del proyecto debe realizarse en el proceso de diseño, mientras todavía hay una oportunidad de refinar el diseño para asegurar una reducción en los costos del ciclo de vida LCC (Fuller, 2016).

$$LCC = C_k + C_o + C_m + C_d + V_r$$

C_k : Costo de capital inicial

C_o : Costos operacionales proyectados

C_m : Costos de Mantenimiento proyectados

C_d : Costos de disposición proyectado

V_r : Valor residual proyectado

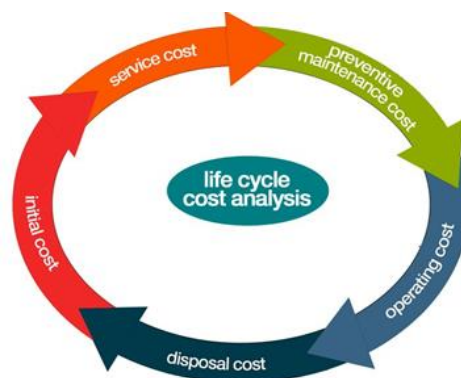


Figura 2 Life Cycle Cost Analysis

3.3.Consideración del riesgo en la evaluación de proyectos de inversión

¿Qué es riesgo?

Hay riesgo si los eventos que sucederán en el futuro no son determinísticos, sino que existe un grado de incerteza acerca de lo que sucederá. Este grado de incerteza es sólo parcial debido a la historia, la que nos permite conocer los resultados obtenidos

anteriormente en alguna experiencia y nos sirve para estimar la probabilidad de que ocurra un evento específico sometido a iguales condiciones (Diez, 1999).

Fuentes de Riesgo:

- Poco conocimiento de la industria
- Precios
- Demandas
- Gustos y modas
- Costos de insumos
- Tecnologías
- Uso de fuentes de información poco confiables
- Dinámica de los mercados
- Errores de interpretación de datos
- Errores en la manipulación de información

En el actual caso, el enfoque será hacia la ingeniería del proyecto y la tecnología utilizada

3.4.Fuente de riesgo: La tecnología

En el estudio técnico se deben incluir la mayor cantidad de especificaciones técnicas posibles sobre la tecnología que se introducirá a la organización. Estos detalles deben comprender, además de los ya tradicionales como volumen de unidades, insumos requeridos, condiciones del lay out, cédulas de producción, mantenimiento, vida útil, métodos y procedimientos, y diagramas de flujo (Medina, 1998).

Dentro de los factores adicionales se deben contemplar es que cuando se selecciona una tecnología, es necesario asegurarse que existe la capacidad para reparar y mantener este equipo y tener claro cuáles son los costos de dicha mantención y cómo se pueden prevenir estas fallas. El elegir mal un tipo de tecnología, puede generar una deuda técnica la cual es el resultado de implementar software o hardware inacabado o en pobre

estado, en la mayoría de las ocasiones, las consecuencias negativas de tomar una mala decisión tecnológica crecen con el paso del tiempo, aumentando el coste de su reparación cada día.

Así pues según (Rey Sacristán, 2008), más que el equipo-sistema de producción en sí, el factor decisivo en su compra será el objetivo al que se destina, y sólo en función de este objetivo es como podremos hacer una valoración técnica y comercialmente justa. Sea cual fuere lo que promueve la intención de invertir, ya sea por expansión de la industria ya sea por reposición, lo más importante será evitar pensar en equipos que no contribuyan a mejorar la competitividad de la empresa y su rentabilidad. Hemos de tener en cuenta las dificultades para discernir cuál de los equipos disponibles en el mercado para cada caso en particular es el que resultaría más adecuado, pues la capacidad de producción de un equipo depende no solamente de las tecnologías-automatismos que le complementan, sino que también depende de las demás actividades de la empresa relacionadas con la producción, en particular de las actividades de los servicios de mantenimiento y sus consiguientes costes tanto propios como de pérdidas de rendimiento-disponibilidad.

La mayor contribución para mejorar la productividad puesta a disposición por el que invierte en nuevos equipos de producción lo constituye el hacer de cada inversión una parte integral del sistema productivo, con un alto grado de utilización y fiabilidad del nuevo equipo de producción. Hemos de abordar el proyecto de una nueva planta o la ampliación de la existente con un enfoque ambicioso, reflexionando y cuestionando las estrategias y tecnologías hasta ahora implantadas en la producción. Ésta será la mejor manera de garantizar la optimización y rendimiento adecuado a la inversión, poniendo especial atención a los siguientes aspectos:

1. Máxima productividad que alcanzar.

2. Sincronización del sistema productivo, con un equilibrio de carga-capacidad.
3. Simplificación logística.
4. Potenciación del aprovechamiento de las habilidades y competencias de los recursos humanos (flexibilidad de horarios y polivalencia en el puesto de trabajo).
5. Organización de la producción hacia un aprovechamiento máximo de los recursos (implantaciones, hombres, etc.).

No son pocos los casos en que los profesionales de proyectos buscan disminuir las inversiones sin considerar el efecto de tal decisión en la probabilidad de buen funcionamiento (confiabilidad) y en la probabilidad de reparación (mantenibilidad) de los equipos seleccionados. Como también no es extraño que los profesionales de proyectos para estimar los costos de mantenimiento lo realizan como un porcentaje de la inversión, siendo que un equipo más sofisticado o una solución sistémica con mayor redundancia por cierto está asociada a un costo de capital mayor pero con el beneficio de reducir el costo de ejercicio de la planta dado la mayor seguridad operacional (Arata, 2008).

3.5. Análisis de Riesgo

Habiendo ya identificado y clasificados los riesgos, pasamos a realizar el análisis de los mismos, es decir, se estudia la posibilidad y las consecuencias de cada factor de riesgo con el fin de establecer el nivel de riesgo de nuestro proyecto. El análisis de riesgos determinará cuáles son los factores de riesgo que potencialmente tendrían un mayor efecto sobre nuestro proyecto. Los métodos utilizados para determinar el nivel de riesgo son:

- **Método Cualitativo:** Es el método de análisis de riesgos más utilizado en la toma de decisiones en proyectos empresariales, utilizan el juicio, experiencia e intuición

para la toma de decisiones. Se pueden utilizar cuando el nivel de riesgo sea bajo y no justifica el tiempo y los recursos necesarios para hacer un análisis completo.

Los métodos cualitativos incluyen; brainstorming, cuestionario y entrevistas estructuradas, evaluación para grupos multidisciplinarios y técnica Delphi.

- **Método Cuantitativo:** Permiten asignar valores de ocurrencia a los diferentes riesgos. Los métodos cuantitativos incluyen; análisis de probabilidad, análisis de consecuencias, simulación computacional.

El desarrollo de dichas medidas puede ser realizado mediante diferentes mecanismos, entre los cuales destacamos el **Método Montecarlo**, el cual se caracteriza por:

- Amplia visión para mostrar múltiples posibles escenarios
- Sencillez para llevarlo a la práctica
- Computarizable para la realización de simulaciones

Este método busca representar la realidad a través de un **modelo de riesgo** matemático, de forma que, asignando valores de manera aleatoria a las variables de dicho modelo, se obtengan diferentes escenarios y resultados.

Monte Carlo, al igual que los demás modelos matemáticos de análisis de riesgo, contiene como mínimo cuatro pasos o etapas de desarrollo generales, que normalmente son secuenciales:

1. Identificación y descripción de los riesgos.
2. Evaluación y valoración.
3. Cálculo matemático.
4. Comparación contra variables predefinidas.

El **modelo de riesgo** es un mecanismo que nos permite poner en práctica el método cuantitativo de Montecarlo para el análisis de riesgos. Es la

representación de la realidad a analizar a través de una estructura de cálculos matemáticos, en la cual se detectan las variables significativas de riesgo y se ponen en relación con el resto de las variables que afectan a nuestro proyecto, y con las variables económicas sobre las que vamos a medir el nivel de riesgo del mismo, Beneficio y Valor actual neto.

Los pasos para desarrollar un modelo de riesgo son 4:

1. Selección de funciones de probabilidad
2. Identificación de las variables sobre las que se medirá el riesgo
3. Simulación computacional
4. Perfil de riesgo

3.6.Herramienta de simulación para la evaluación de riesgos

La gestión de riesgos tiene como objetivo identificar, analizar y dar respuesta a los riesgos inherentes a los proyectos, para disminuir las consecuencias de los riesgos negativos y aumentar la probabilidad y el impacto de los riesgos positivos. La gestión de los riesgos consta de cuatro procesos definidos: Identificación, análisis, planificación de la respuesta y supervisión y control de riesgos.

A la hora de gestionar el riesgo de un proyecto, nos enfrentamos a situaciones sobre las que no es posible obtener una información satisfactoria, dado que su investigación o su análisis es muy complicado para aplicar métodos tradicionales, pero existe la posibilidad de diseñar un proceso y una realidad mediante la simulación. Así, las herramientas de simulación pretenden representar una realidad de una manera simplificada, recogiendo las relaciones o criterios que se consideran fundamentales y, por consiguiente, determinantes de la realidad a simular.

La simulación computacional se considera un método cuantitativo, el cual permite asignar valores de ocurrencia a los diferentes riesgos identificados, es decir, calcular el nivel de riesgo del proyecto. Los beneficios de la simulación es que nuevos procesos como procesos ya existentes pueden proyectarse, evaluarse y contemplarse sin correr el riesgo asociado a experiencias llevadas a cabo en un sistema real. Pero a su vez posee ciertas desventajas como que puede ser muy costosa, por la necesidad de utilizar algún equipo computacional y recursos humanos dedicados a esto, además, se pueden obtener resultados falsos si no se tienen las variables correctas, la simulación es imprecisa, porque no siempre se logra simular la realidad.

Uno de los softwares a utilizar será Oracle Crystal Ball acorde a (Oracle, 2017) es una aplicación basada en hojas de cálculo, líder para modelaje predictivo, previsión, simulación y optimización. Le da una visión sin precedentes sobre los factores críticos que afectan el riesgo de su análisis. Con Crystal Ball, se puede tomar las decisiones correctas y formular tácticas para alcanzar sus objetivos y tener ventajas competitivas, incluso en las condiciones de mercado más inciertas.

3.7. Análisis de sistemas productivos en la fase de diseño

Si el proyecto está en fase de diseño, se debe partir con el análisis del ciclo de vida (LCCA). A menudo el costo total del sistema de producción no es visible, en particular aquellos costos asociados con: la operación, el mantenimiento, las pruebas de instalación, la formación del personal, entre otros. El costo del ciclo de vida se determina identificando las funciones aplicables en cada una de sus fases (diseño, fabricación y producción), calculando el costo de estas funciones y aplicando los costos apropiados durante toda la extensión del ciclo de vida (Ahmed, 1995).

Los costos de adquisición del equipo (que incluyen investigación, diseño, prueba, producción y construcción) son por lo general obvios, pero el análisis de costos de ciclo de vida depende crucialmente de valores derivados de la fiabilidad, por ejemplo, del análisis de la tasa de fallas, del costo de las piezas de recambio, de los tiempos de reparación, de los costos de los componentes, etc. (Viveros, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

Para esto es necesario conocer la curva de costos globales:

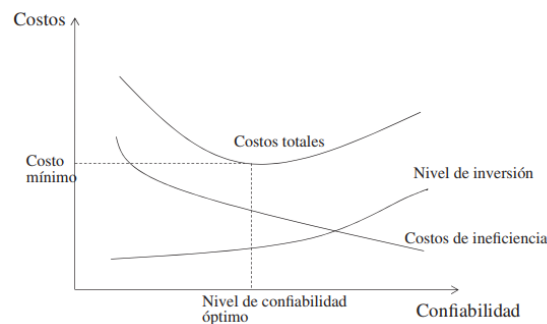


Figura 3 Curva de costos globales

Acorde con (Arata, 2008), los costos globales son la cuantificación de todos aquellos costos generados durante el ciclo de vida de un proyecto o instalación, y pueden determinarse utilizando la relación:

$$\text{Costo global} = \text{Costo capital fijo} + \text{Costo operacional} + \text{Costo de ineficiencia}$$

Los cuales se detallan a continuación:

- **Costo de capital fijo:** el costo de los equipos e instalaciones asociadas al proyecto.
- **Costo operacional:** queda definido por la cuantificación de todos aquellos elementos propios de la operación de un sistema, tales como: insumos, energía, repuestos, entre otros.

- **Costo de ineficiencia:** dado por el costo asociado a la indisponibilidad de la instalación durante el período de evaluación, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$C.ineficiencia = \sum_{k=1}^n \frac{1}{(1+i)^k} H C_i (1 - A_{sistema})$$

En donde:

C_i : Costos de ineficiencia por horario definido (\$/h; US/día; etc.).

H : Periodo de evaluación dentro del horizonte del proyecto.

$A_{sistema}$: Disponibilidad esperada del sistema.

i : Tasa de costo de capital de la empresa.

n : Años de operación.

k : Índice para el periodo de evaluación

Una vez definidos los costos globales, se pueden analizar las distintas alternativas de equipo y de configuraciones del sistema de forma que la alternativa técnica más recomendable será aquella que tenga el mínimo costo global (Viveros et al., 2013).

Impacto

- Reducción de costos operacionales y de ineficiencia
- Mejora en la toma de decisiones en cuanto al equipo y configuraciones a utilizar
- Posiblemente exista un aumento de los costos de capital fijo

Riesgos

- El nivel de incertidumbre es el más alto y, por lo tanto, el riesgo de no cumplir con los objetivos es más elevado al inicio del proyecto. La certeza de terminar con éxito aumenta gradualmente a medida que avanza el proyecto.
- El poder que tienen los interesados en el proyecto para influir en las características finales del producto del proyecto y en el coste final del proyecto es más alto al comienzo y decrece gradualmente a medida que avanza el proyecto. Una de las principales causas de este fenómeno es que el coste de los cambios y de la corrección de errores generalmente aumenta a medida que avanza el proyecto. (Americana, 2004)

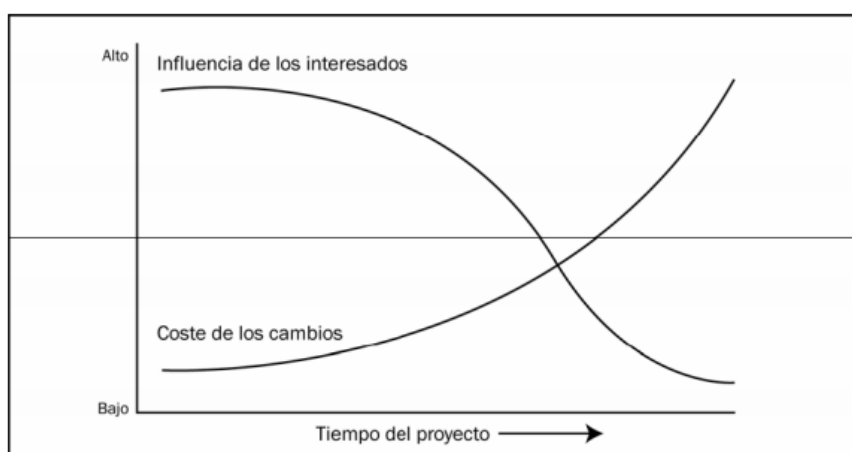


Figura 4 Influencia de los interesados a lo largo del tiempo

3.8. Análisis de sistemas productivos en fase de operación

Dado que el proceso ya existe y está en funcionamiento, el análisis comienza con la jerarquización de equipos críticos, requiriendo de una evaluación para la respectiva optimización. Esta evaluación o diagnóstico de la situación actual debe considerar todos aquellos aspectos relacionados con el mantenimiento de equipos de los cuales se disponga información; por ejemplo, aspectos tales como la planificación, programación y ejecución de las tareas de mantenimiento, histórico de fallas, indicadores de tiempo medio entre

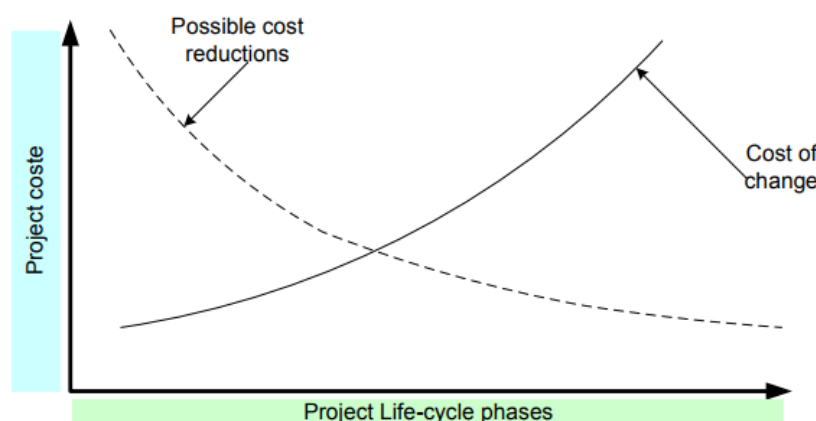
fallas (MTTF) y tiempo medio de reparación (MTTR), recursos financieros asignados al mantenimiento, impacto económico o en producción (consecuencia de falla del equipo) por parada no programada de la planta (sistema) o subsistema, entre otros (Barberá, L., González, V., Crespo, A., & Moreu, 2010)(Andrés, Landajo, & Lorca, 2009).

Impactos

- Reducción en las pérdidas que implican para la producción la falla ocurrida
- Permite tener una programación detallada de todas las actividades de mantenimiento pretende optimizar la asignación de recursos tanto humanos como materiales, así como minimizar el impacto en la producción.
- El control de la programación permite realimentar y optimizar el diseño de los planes de mantenimiento mejorando de este modo su eficacia y eficiencia.
- Reducción de costos por fallas inesperadas de los equipos
- Reducción de costos de reparación lo cuales involucran repuestos, materiales y mano de obra que se utilicen

Riesgos

- Un posible riesgo es que a medida que avanza el proyecto, se reducen las posibilidades de reducir costos, y el costo de realizar un cambio es muy alto. Por lo tanto, tomar la decisión de hacer un cambio en la configuración o realizar el cambio de un equipo, puede resultar demasiado costoso para el proyecto.



3.9. Indicadores relevantes en un sistema productivo: Confiabilidad y Mantenibilidad

El mantenimiento puede ser definido como el conjunto de acciones destinadas a mantener o reacondicionar un componente, equipo o sistema, en un estado en el cual sus funciones pueden ser cumplidas. Entendiendo como función cualquier actividad que un componente, equipo o sistema desempeña, bajo el punto de vista operacional (Kardec & Nascif, 2002).

El análisis de la confiabilidad operacional y de la mantenibilidad de un proceso productivo es relevante para la determinación de la disponibilidad y de la capacidad de la planta. Con el fin de cuantificar la importancia de cada equipo en la disponibilidad sistémica y mejorar la toma de decisiones relacionadas con la gestión de activos. (Kristjanpoller, Crespo, López-Campos, & Viveros, 2017).

Para comenzar se necesitan dejar en claro algunos conceptos:

- **Análisis de criticidad:** es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Para realizar un análisis de criticidad se debe: definir un alcance y propósito para el análisis, establecer los criterios de evaluación y seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas objeto del análisis.

- **Tiempo Promedio para Fallar (TPPF) – Mean Time To Fail (MTTF):**

Este indicador mide el tiempo promedio que es capaz de operar un activo a capacidad sin interrupciones dentro del periodo considerado; éste constituye un indicador indirecto de la confiabilidad (Amendola, 2006).

$$MTTF = \frac{\text{tiempo de operación}}{n^{\circ} \text{ de fallos}}$$

- **Tiempo Promedio para Reparar (TPPR) – Mean Time To Repair (MTTR):**

El Tiempo Promedio para Reparar es un parámetro de medición asociado a la mantenibilidad, es decir, a la ejecución del mantenimiento, este indicador mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que la unidad se encuentra fuera de servicio por un fallo, dentro de un período de tiempo determinado.

$$MTTR = \frac{\text{tiempo de reparación}}{n^{\circ} \text{ de fallos}}$$

- **Confiabilidad de un elemento:** Probabilidad de que un ítem pueda desempeñar su función requerida durante un intervalo de tiempo establecido y bajo condiciones de uso definidas (Lafraia, 2001).
- **Confiabilidad operacional:** es la capacidad de una instalación o sistema, para cumplir su función dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico. Aquí es donde se consideran cuatro aspectos importantes que son la confiabilidad humana, confiabilidad de los procesos, mantenibilidad de los equipos y la confiabilidad de los equipos.

$$R(t) = e^{\frac{-t}{MTTF}}$$

- **Mantenibilidad:** es un parámetro estadístico que se define como la probabilidad que tiene un ítem en estado de falla, de ser diagnosticado y reparado con éxito en un tiempo t, y en el contexto de operación establecido (Pistarelli, 2010).
- **Disponibilidad:** La disponibilidad, objetivo principal del mantenimiento, puede ser definida como la confianza de que un componente o sistema que sufrió mantenimiento ejerza su función satisfactoriamente para un tiempo dado. En la práctica, la disponibilidad se expresa como el porcentaje de tiempo en que el

sistema está listo para operar o producir, esto en sistemas que operan continuamente(Pinto, 1995).

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \times 100$$

- **Redundancia:** Se presenta como una solución a los problemas de protección y confiabilidad, ya que redundancia en profundidad es la constituida por la duplicación del material o de los dispositivos sensibles (máquinas, aparatos, instrumentos, medidores, etc.) para una misma función vital; de esta manera y en caso de fallo de un dispositivo sensible (o de varios), la función vital igualmente podrá ser asegurada y cumplida, produciendo que, la probabilidad de fallo simultáneo global será inferior a la probabilidad de fallo de un solo aparato o dispositivo, lo que se convierte en mayor grado de confianza, y menor grado de criticidad.

La aplicación de técnicas de fiabilidad con el fin de apoyar la toma de decisiones es una tarea fundamental para la gestión eficiente y precisa de los activos y recursos en cualquier organización industrial. Es conocido que la capacidad productiva real de una planta depende fuertemente de la disponibilidad sistémica, la cual a su vez está determinada por la configuración lógica en la que se encuentran los equipos. Equipos dispuestos en serie o con alguna clase de redundancia tendrán de por sí, distinto impacto en la disponibilidad del sistema, independientemente de su propia fiabilidad y disponibilidad individual (Kristjanpoller et al., 2017).

4. METODOLOGÍA

4.1. Análisis de criticidad

Según (“El Análisis de Criticidad, una Metodología para mejorar la Confiabilidad Operacional,” n.d.), el objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que

sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta compleja, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable.

La criticidad se puede expresar como:

$$\textbf{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Donde la frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado y, la consecuencia está referida con: el impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente.

En función de lo antes expuesto se establecen como criterios fundamentales para realizar un análisis de criticidad los siguientes:

- Seguridad
- Ambiente
- Producción
- Costos (operacionales y de mantenimiento)
- Tiempo promedio para reparar
- Frecuencia de falla

Según (Romero Carranza, 2016), para determinar la criticidad de una unidad o equipo se utiliza una matriz de frecuencia por consecuencia de la falla, en la cual un eje representa la frecuencia de falla y en otro los impactos o consecuencias en los cuales incurrirá la unidad o equipo en estudio si le ocurre una falla.



Figura 6 Matriz de criticidad

Para realizar en Análisis de Criticidad debes seguir los siguientes pasos:

1. Definir los niveles en donde se realizará el análisis, ya sea equipos, sistema u instalación de acuerdo con los requerimientos de jerarquización de activos.
2. La estimación de la frecuencia de falla y el impacto total o consecuencia de las fallas, las cuales pueden ser daños al personal, daños a las instalaciones, impacto a la producción, impacto al ambiente e impacto a la población.
3. Calculo de nivel de criticidad: para determinar el nivel de criticidad de una instalación, sistema, equipo o elemento se debe emplear la fórmula mencionada anteriormente. Luego una vez obtenido el valor de la criticidad, se busca en la matriz de criticidad, para determinar el nivel de criticidad de acuerdo con los valores y la jerarquización establecidos.
4. Análisis y Validación de los resultados: Los resultados obtenidos deberán ser analizados a fin de definir acciones para minimizar los impactos asociados a los modos de falla identificados que causan la falla funcional.
5. Definir el nivel de análisis: La valoración del nivel de criticidad y la identificación de los activos más críticos permitirá orientar los recursos y esfuerzos a las áreas

que más lo ameriten, así como gerenciar las acciones de mitigación del riesgo en elementos subsistemas, considerando su impacto en el proceso.

6. Determinar la criticidad, dado que, si el valor de criticidad se debe a valores altos en alguna de las categorías de consecuencias, las acciones deben orientarse a mitigar los impactos que el evento (modo de falla o falla funcional) puede generar. Dentro de las acciones o actividades que se recomiendan, se pueden incluir la aplicación de metodologías basadas en confiabilidad.
7. Sistema de Seguimiento de control: Después de la selección de las acciones de mejora en las frecuencias de
8. ocurrencia de los eventos y mitigación de impactos se debe crear y establecer en
9. Seguimiento y Control, para garantizar el monitoreo de la ejecución de las acciones seleccionadas y el cumplimiento de las recomendaciones consecuentes del análisis de criticidad, el cual permitirá asegurar la continuidad en el tiempo de la aplicación de los planes de acción y monitorear los cambios o mejoras que pueden derivarse de la aplicación de las acciones generadas como resultados de los análisis.

4.2. Reliability Block Diagram

Diferentes metodologías de análisis, tales como la metodología de RBD, han sido desarrollados y ampliamente aplicados en el sector minero debido a su adaptabilidad en la representación de arreglos complejos y entornos con grandes cantidades de equipos, lo que simplifica el análisis de la fiabilidad. Para el correcto desarrollo de un análisis RAM (reliability, availability, and maintainability) se debe realizar una exploración completa de los datos para poder ajustarlos a un modelo estadístico y obtener sus indicadores clave. Con una herramienta de apoyo a la gestión de mantenimiento, diferentes oportunidades

de mejora pueden ser identificados, y las recomendaciones se pueden ofrecer para desarrollar las acciones más apropiadas.(Kristjanpoller & Viveros, 2015).

Acorde con (Fallis & Harry, 2007) la metodología RBD realiza los análisis de confiabilidad y disponibilidad del sistema en sistemas grandes y complejos usando diagramas de bloques para mostrar las relaciones de la red. La estructura del diagrama de bloques de confiabilidad define la interacción lógica de las fallas dentro de un sistema que se requieren para sostener la operación del sistema. Un diagrama solo debe contener una entrada y un nodo de salida y el sistema RBD está conectado mediante una configuración en paralelo o en serie.

Se usa una conexión paralela para mostrar la redundancia y se une a múltiples enlaces o rutas desde el nodo de inicio al nodo de término.

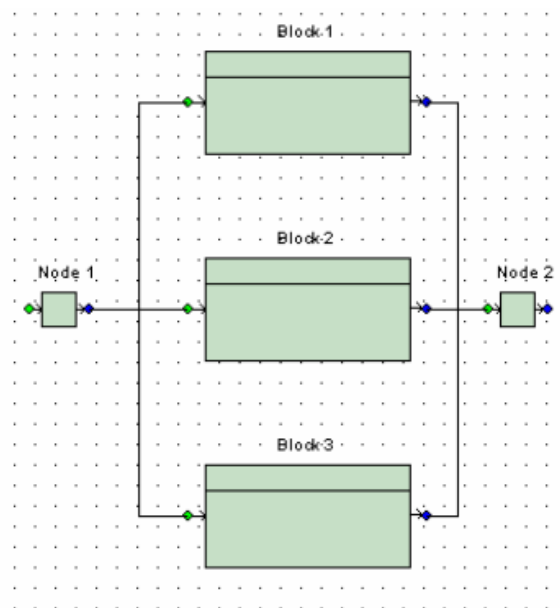


Figura 1 RBD Configuración en paralelo

Una conexión en serie se une mediante un enlace continuo desde el nodo de inicio al nodo final.

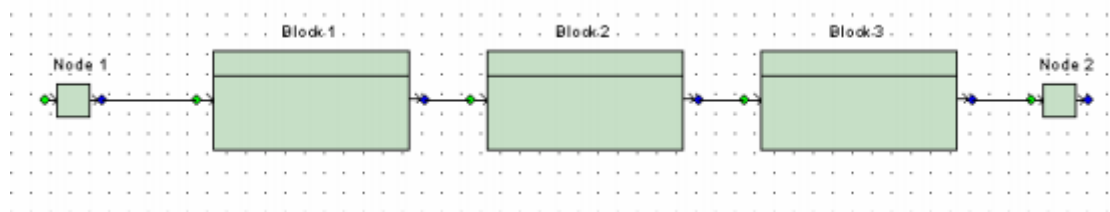


Figura 2 RBD Configuración en serie

Además, un sistema puede contener una serie, paralelo o combinación de series y conexiones paralelas.

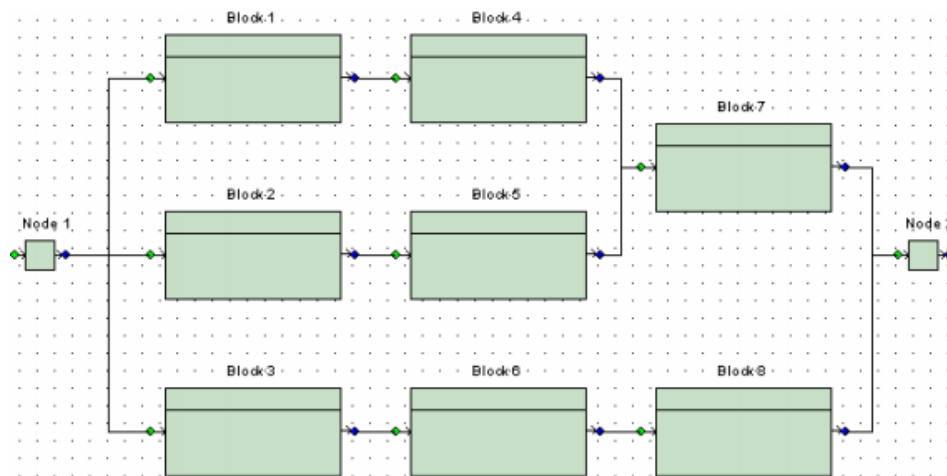


Figura 3 RBD Configuración mixta

Un diagrama de bloques de confiabilidad (RBD) es una herramienta de dibujo y cálculo utilizada para modelar sistemas complejos. Un RBD es una serie de imágenes (bloques) que representan porciones de un sistema. Una vez que las imágenes (bloques) están configurados correctamente y se proporcionan los datos de imagen, la tasa de fallas, el MTBF, la confiabilidad y la disponibilidad del sistema puede ser calculada, y a medida que la configuración del diagrama cambia, los resultados del cálculo también cambian.

Configuraciones RBD

Según (Arata & Villalon, 2008), a continuación se presentan las bases conceptuales de las cinco configuraciones lógico-funcionales incluidas en la metodología RBD.

Serie: La configuración en Serie implica que la falla de cualquier equipo o subsistema bajo este modelo provoca una detención total del sistema al que pertenecen.

Paralelo: La configuración en paralelo relaciona a dos o más equipos siendo cada uno de ellos capaz de soportar la carga total de la etapa del proceso.

Fraccionamiento: La configuración en fraccionamiento representa que dos o más equipos se reparten la carga total de trabajo según una ponderación generalmente asociada a capacidad productiva de los equipos. A diferencia del sistema en paralelo la falla de cualquiera de los equipos supone una pérdida de carga equivalente al impacto del equipo en el proceso de producción.

Stand By: La configuración de subsistemas en Stand By se compone de dos equipos, uno primario y otro secundario. El equipo primario opera hasta su falla y tras este evento lo reemplaza el equipo secundario, capaz de soportar en un 100% la capacidad del primario. La falla en el subsistema se verifica cuando los equipos se encuentran en un estado de falla de manera simultánea.

Redundancia Parcial: El subsistema en configuración de redundancia parcial está compuesto por “n” equipos, de los cuales se requiere una fracción para la correcta operación del proceso productivo.

Importancias RBD

- **Importancia de Birnbaum:** Según (Rivero, 2008) Es una de las medidas de importancia más conocida y utilizada. Representa la máxima variación (pérdida) en la confiabilidad del sistema cuando el componente i pasa de la condición de perfecto funcionamiento a la condición de total falla. Está definida de la siguiente manera:

$$Bi(t) = \frac{\partial Rs(t)}{\partial Ri(t)} = (Rs(t)|Ri(t) = 1) - (Rs(t)|Ri(t) = 0)$$

Donde:

$Rs(t)$: Confiabilidad del sistema en un tiempo t.

$Ri(t)$: Confiabilidad del componente i en un tiempo t.

$(Rs(t)|Ri(t) = 1)$: Confiabilidad del sistema en un tiempo t dado que el componente i funciona perfectamente.

$(Rs(t)|Ri(t) = 0)$: Confiabilidad del sistema en un tiempo t dado que el componente i ha fallado.

- **Importancia de Fussell-Vesely**

Según (Ar, Sof, Alberola, Martorell, & Curso, 2014), la medida de importancia Fussell-Vesely indica la contribución de un bloque / evento a la indisponibilidad del sistema. El cambio en la indisponibilidad de bloques / eventos con valores de alta importancia tendrán el efecto más significativo sobre la indisponibilidad del sistema. Fussell-Vesely tiene en cuenta, además de la importancia estructural del componente en el sistema, la indisponibilidad de este.

$$FV_i = \frac{Q - Q_i^1}{Q} \approx \frac{u_i \times Bi}{Q}$$

Donde:

Q: Indisponibilidad media anual del sistema.

Q_i^1 : Indisponibilidad cuando se sabe que el componente i no va a fallar.

u_i : Indisponibilidad media del componente.

Bi : Medida de importancia de Birnbaum del componente i.

- **Risk Achievement Worth (RAW)**

Según (Ar et al., 2014), RAW también conocida como Risk Increase Factor (RIF) permite evaluar como mediante la introducción de redundancias con respecto a un componente o a un conjunto de componentes es posible mejorar la fiabilidad y por tanto la indisponibilidad del sistema. Cuanto mayor sea el valor del factor RAW, la mejora obtenida con esta redundancia también será mayor.

$$RIF_i = \frac{Q_i^1}{Q} \approx 1 + \frac{Bi}{Q}$$

Donde:

Q : Indisponibilidad media anual del sistema.

Q_i^1 : Indisponibilidad cuando se sabe que el componente i no va a fallar.

Bi : Medida de importancia de Birnbaum del componente i .

4.3.Simulación Crystal Ball

Crystal Ball extiende la capacidad de pronosticar modelos sobre la hoja de cálculo de Excel y provee la información necesaria para que el usuario del software pueda llegar a ser un mejor y más eficiente tomador de decisiones.

Las hojas de Excel son excelentes herramientas para el análisis, pero tiene limitaciones, tales como que solo permite asignar un valor simple a cada celda, de modo que para crear escenarios se debe cambiar manualmente el valor de cada una. Es por esto que el software Crystal Ball funciona como complemento de Excel, dado que al instalarlo se añade directamente en la barra de herramientas.



Figura 4 Crystal Ball en Excel

Crystal Ball posee su propia barra de herramientas, la cual se compone de 5 secciones, definir, ejecutar, analizar, herramientas y ayuda.

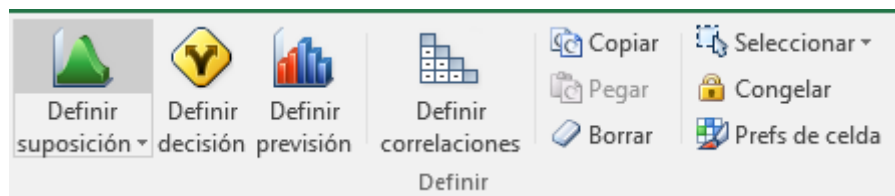


Figura 5 Sección "Definir" en CB

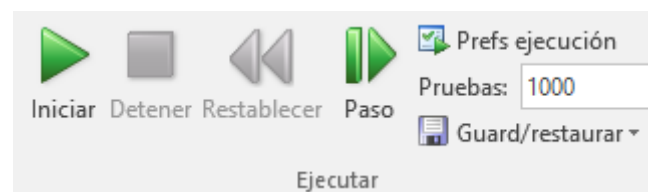


Figura 6 Sección "Ejecutar" en CB

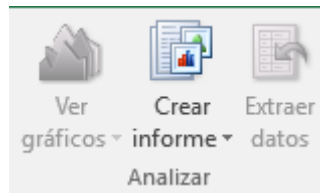


Figura 7 Sección "Analizar" en CB

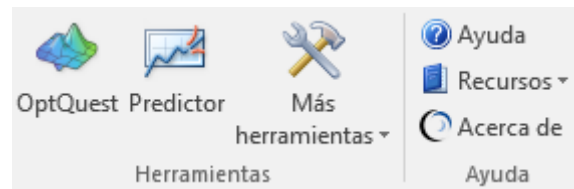


Figura 8 Sección "Herramientas" y "Ayuda" en CB

Definir un supuesto

El primer paso para la simulación es definir el supuesto, el cual se basa en determinar cuáles variables del modelo son inciertas, establecer que tan confiable es el valor de cada entrada. Por lo cual una vez identificadas las variables, se seleccionan y hace clic sobre el botón “definir suposición” y se elige la distribución probabilística a utilizar y se modifican los parámetros. Inmediatamente después la celda-supuesto estará sombreada verde.

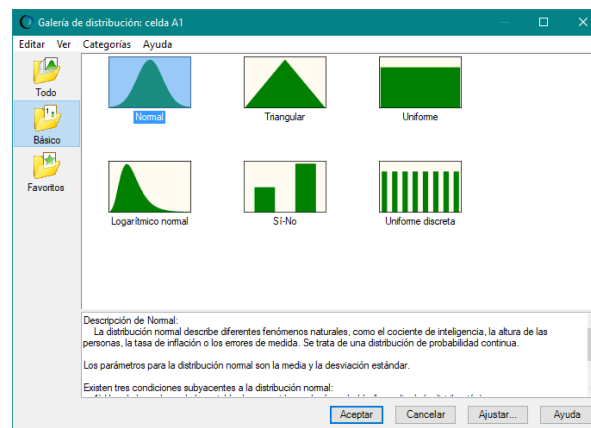


Figura 9 Opción "Definir suposición"

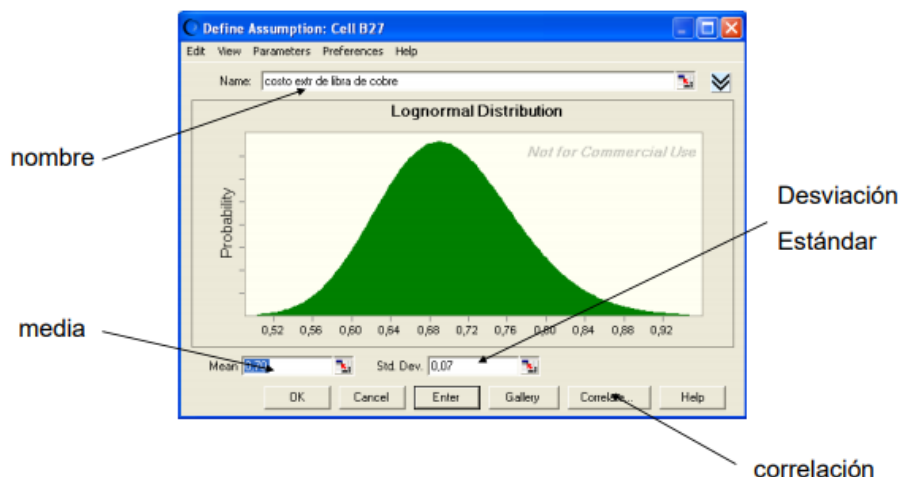


Figura 10 "Definir suposición" - modificación de parámetros

Definir un pronóstico

Este es el segundo paso por seguir, en el cual se le debe indicar al Crystal Ball las celdas a monitorear. Este pronóstico, son celdas que contienen fórmulas que son afectadas por las celdas-supuestos. Un pronóstico es una variable de interés que se intenta calcular, se pueden definir tantos pronósticos como se quiera. Para esto se debe hacer clic en el botón "Definir previsión", en la cual se le asigna el nombre y unidad al pronóstico. Inmediatamente después la celda-pronóstico estará sombreada celeste.

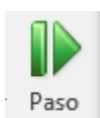
Figura 11 Opción "Definir previsión"

Correr la simulación

Crystal Ball usa la simulación de Monte Carlo para generar dinámicamente escenarios alternativos dentro de los modelos de la hoja de cálculo de Excel. Para esto existen las siguientes opciones:



Ejecuta varios ensayos en un solo paso, se puede configurar para un cierto número de ensayos que se deseen simular



Hace cada ensayo uno a uno, por lo tanto, se pueden observar los diferentes valores que toma la celda-pronostico respecto a los supuestos después de varias iteraciones.



Reestablece los valores originales de la simulación

Análisis de resultados

Para poder realizar un análisis de los resultados, Crystal Ball presenta diferentes herramientas las cuales se puede utilizar, tales como gráficos, optquest, predictor, análisis de remuestreos, análisis de escenarios, etc. Además, te permite crear reportes con los resultados obtenidos de la simulación

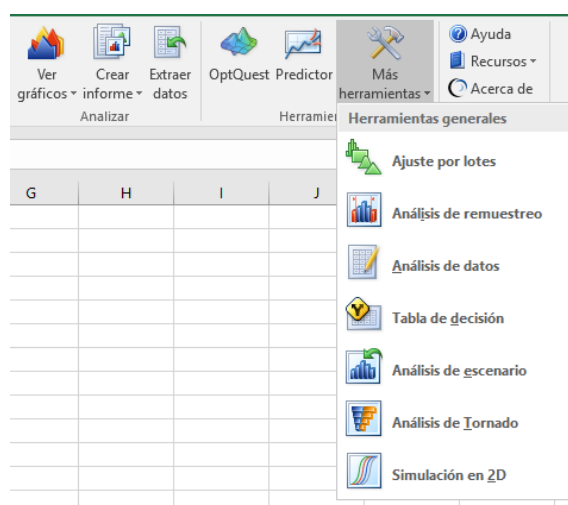


Figura 12 Herramientas de análisis CB

Pasos previos antes de simular un caso real

Para realizar una simulación de la planta se requieren cumplir los siguientes pasos:

1. Estudiar los procesos de la planta que se quiere simular.
2. Realizar un listado de todos los equipos necesarios en los procesos e investigar MTTR y MTBF de cada uno.
3. Diseñar un diagrama lógico funcional de la planta
4. Ingresar datos a una tabla con la siguiente información:
 - a. Subsistema
 - b. Equipo
 - c. Configuración
 - d. Alfa
 - e. Beta
 - f. MTTR
 - g. MTBF
 - h. Disponibilidad equivalente por equipo
 - i. Indisponibilidad equivalente por equipo
 - j. MTBF del subsistema
 - k. MTTR del subsistema
 - l. Disponibilidad de cada subsistema
 - m. Disponibilidad total

5. CASO PRÁCTICO

5.1. ETAPA 1 Selección del proyecto: Planta Siderúrgica

- **Descripción del proceso**

Según (Almanza & Milena, 2008), se denomina siderurgia a la técnica del tratamiento del mineral de hierro para obtener diferentes tipos de este o de sus aleaciones. El proceso de transformación del mineral de hierro comienza desde su extracción en las minas. El hierro se encuentra presente en la naturaleza en forma de óxidos, hidróxidos, carbonatos, silicatos y sulfuros. Los más utilizados por la siderurgia son los óxidos hidróxidos y carbonatos.

La cadena siderúrgica comprende la obtención del acero, la fabricación de artículos de acería laminados en caliente como las barras, varillas, láminas y alambrón (utilizados en obras de infraestructura), artículos laminados en frío (utilizados en la metalmecánica para la fabricación de electrodomésticos), planos revestidos (utilizados para la fabricación de cubiertas y envases) y tubería con costura. Estos productos son obtenidos a partir de procesos de fundición, laminación y forjado, entre otros.

Para el presente trabajo nos enfocaremos a partir de la tercera etapa de ***“Laminación del acero”***.

Tercera etapa

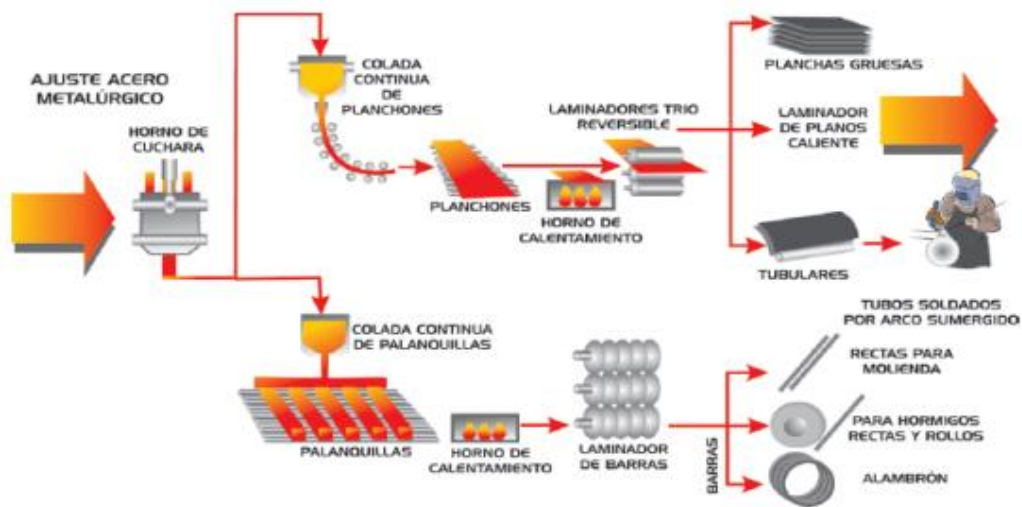


Figura 13 Diagrama laminación del acero

- 1. Colada continua de Planchones:** El acero líquido de la cuchara es vaciado a una artesa que se comunica por el fondo con un molde en constante movimiento que es enfriado por agua, en él se inicia el proceso de solidificación del acero que se completa a lo largo del trayecto por el interior de la máquina. El planchón que se produce es una cinta continua con un espesor y ancho variables y que a la salida se va cortando a los largos requeridos.
- 2. Colada continua de palanquillas:** La máquina de colada continua de palanquillas, cuenta con líneas conformadas por tubos de cobre de sección cuadrada con refrigeración interna por agua, con sistema de enfriamiento controlado a lo largo de la línea y agitador electromagnéticos al final de la línea para prevenir segregación en aceros alto carbono. Una vez que se ha formado una piel suficientemente gruesa dentro del molde, el acero inicia su recorrido curvo dentro de la máquina, sometido a la acción de rociadores de agua controlados en función de la velocidad de la máquina. Al término de esta zona la palanquilla es enderezada

mediante rodillos y cortada a la dimensión especificada por sopletes de oxígeno-propano para terminar siendo identificada con un número de colada.

3. **Laminador de barras:** Las palanquillas son productos semiterminados de sección y longitud variables. Después de ser precalentadas en un horno se laminan en pases sucesivos y se transforman en barras redondas lisas o con resaltes para hormigón, todos ellos, productos terminados ampliamente utilizados como materiales de construcción y en la manufactura de alambres, clavos, tornillos, bolas para molinos, pernos, etc.

Cuarta etapa



Figura 14 Diagrama fabricación de rollos

4. **Laminador de planos en caliente:** Los planchones que produce la Colada Continua son sometidos a laminación en caliente, con lo cual se reduce el espesor y aumenta su longitud. El proceso comienza calentando el material en un horno. Una vez alcanzada la temperatura requerida, los planchones son reducidos en su espesor, primero en un Laminador Trio, el que mediante pases sucesivos entrega un semilaminado (plancha gruesa), para pasar posteriormente al laminador continuo y obtener rollos con dimensiones y peso variables. Una parte de los productos obtenidos va directamente al mercado, tanto en forma de rollos o

planchas, donde encuentra una gran aplicación en la industria, y la otra parte de rollos, continúa su proceso en el Laminador de Planos en Frío.

Quinta etapa

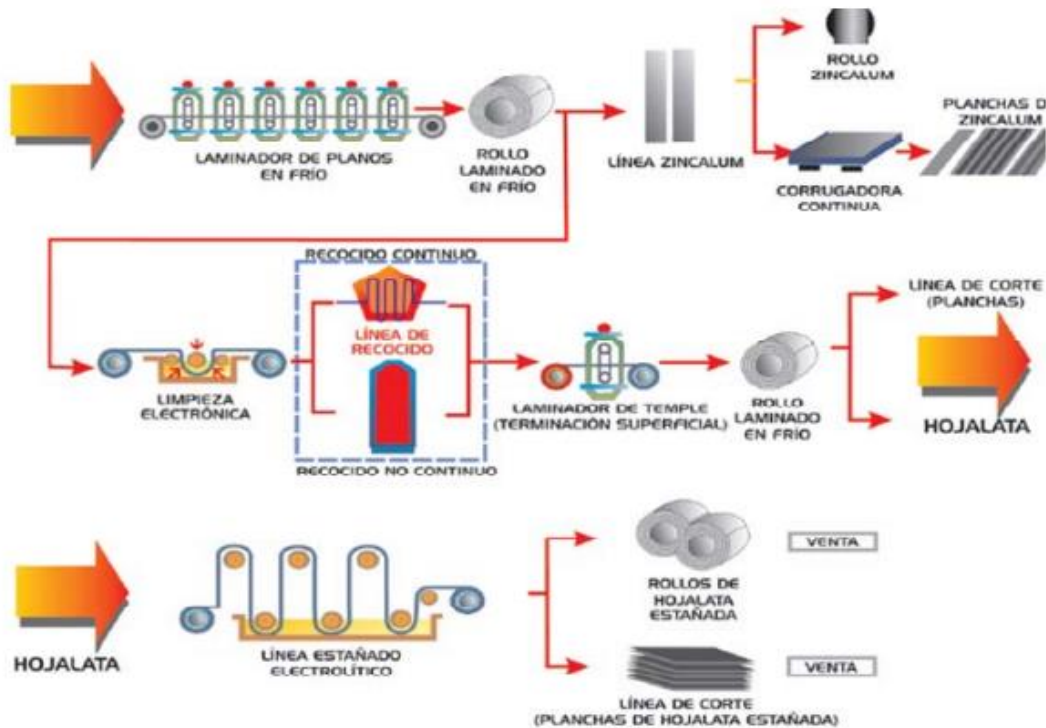


Figura 15 Diagrama laminador planos en frío

5. **Laminador de planos en frío:** A los rollos laminados en caliente, que se destinan a la fabricación de productos planos laminados en frío, se le somete al proceso de decapado para eliminar los óxidos y laminación en frío para disminuir el espesor. En esta etapa, los rollos también pueden ser procesados en la línea Zinc-Alum, para obtener productos recubiertos con una aleación de Zinc y Aluminio, necesarios en la construcción. En otro proceso los rollos son sometidos a limpieza electrolítica para eliminar el aceite empleado en la laminación en frío; recocido en atmósfera protectora, que puede ser en Hornos o en línea de recocido continuo para eliminar la acritud dada por el trabajo mecánico realizado en frío, y laminador de

temple para eliminar las líneas de 302 fluencia, corregir la forma y dar la terminación superficial requerida. Una fracción de los rollos templados se despacha al mercado, como tales o cortados previamente en planchas, para ser usados en la industria metalmecánica. Otra fracción de ellos es estañada en la línea de Estañado Electrolítico para obtener hojalata apta para la industria de conservación.

Una vez estudiado el proceso de producción, se debe diseñar el layout de la planta y establecer el diagrama lógico funcional.

5.2.ETAPA 2 Configuración equipos

Subsistema	Equipos	Configuración
Colada Continua Planchones		Fraccionamiento
	Maq.Colada Continua	33%
	Maq.Colada Continua	33%
	Maq.Colada Continua	33%
Colada Continua Palanquillas		Fraccionamiento
	Maq.Colada Continua	33%
	Maq.Colada Continua	33%
	Maq.Colada Continua	33%
Recalentamiento Planchones		Stand By
	Horno 1	
	Horno 2	
Recalentamiento Palanquillas		Stand By
	Horno 1	
	Horno 2	
Laminado trio reversible		Redundancia
	Laminador trio rev	3 sobre 2
	Laminador trio rev	
	Laminador trio rev	
Laminado de barras		Redundancia
	Laminador de barras	4 sobre 3
	Laminador de barras	
	Laminador de barras	
Laminado de planos en caliente		Fraccionamiento
	Laminador planos c.	50%
	Laminador planos c.	50%
Decapado		Serie
	Decapado	
Laminado de planos en frío		Fraccionamiento
	Laminador de planos f.	50%
	Laminador de planos f.	50%
Corrugado		Serie
	Maq. Corrugadora	
Limpieza y Estañado		Serie
	Limpiador electrolítico	
	Laminador de temple	
	Estañador electrolítico	

Tabla 1 Listado equipos y configuración lógica

En el anexo se podrá encontrar el diagrama lógico funcional de la planta

Para la planta se consideraron:

- 3 equipos de colada continua de planchones
- 3 equipos de colada continua de palanquillas
- 4 hornos de recalentamiento
- 3 laminadores trio reversibles
- 4 laminadores de barra
- 2 laminadores de planos calientes
- 2 laminadores de planos en frío
- 1 maquina decapadora
- 1 maquina corrugadora
- 1 limpiador electrolítico
- 1 laminador de temple
- 1 estañador electrolítico

5.3.ETAPA 3 Tiempo medio entre fallas y tiempo medio para reparar

Acorde a la investigación del proceso realizada, se tienen los tiempos medio entre fallas y tiempos medio para reparar de cada uno de los equipos que componen el proceso de laminación del acero, los cuales están en [horas]:

Equipos	MTBF	MTTR
Maq. Colada Continua Planchones	5000	40
Maq. Colada Continua Palanquillas	5000	40
Horno de recalentamiento	2500	30
Laminador Trio Reversible	2200	20
Laminador de barras	1200	12
Laminador de planos calientes	1800	25
Decapadora	1000	15
Laminador de planos en frío	1500	14
Maq. Corrugadora	800	20
Limpiador electrolítico	900	5
Laminador de temple	1000	12
Estañador electrolítico	3000	6

Tabla 2 MTBF y MTTR por equipo

5.4.ETAPA 4 Análisis de criticidad

1° Nivel de Análisis

Se deben definir los niveles en donde se efectuará el análisis: instalación, sistema, equipo o elemento, de acuerdo con los requerimientos o necesidades de jerarquización de activos.

Para el caso práctico actual se analiza la criticidad de los equipos y la disponibilidad de cada subsistema asociado a la planta, los cuales se presentan a continuación:

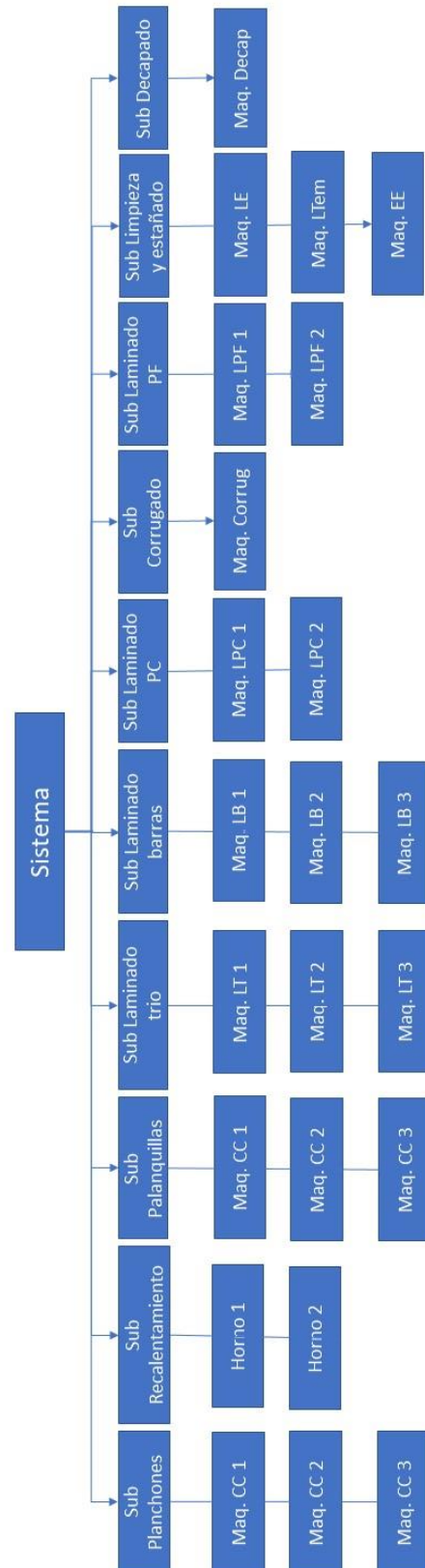


Figura 16 Definición nivel de análisis

Se establecen 11 subsistemas, de los cuales dos corresponden al subsistema de “Recalentamiento”.

2° Estimación de la frecuencia de falla funcional

Tal como se mencionó en el capítulo 3, para poder obtener un nivel de criticidad, es necesario determinar la frecuencia y el impacto de la falla.

La frecuencia de ocurrencia del evento se determina por el número de eventos por año.

Para categorizar la frecuencia de falla, utilizaremos como guía la siguiente tabla:

Categoría	Nivel
1	Baja
2	Medio bajo
3	Medio
4	Medio alto
5	Alta

Tabla 3 Categorización según número de fallas por año

Por lo tanto, utilizando los datos de la tabla 2 y considerando que un año posee 8760 [horas] se obtienen los siguientes resultados:

Equipos	MTBF [horas]	MTBF [año]	Categoría
Maq. Colada Continua Planchones	5000	0,57	1
Maq. Colada Continua Palanquillas	5000	0,57	1
Horno de recalentamiento	2500	0,29	2
Laminador Trio Reversible	2200	0,25	2
Laminador de barras	1200	0,14	4
Laminador de planos calientes	1800	0,21	3
Decapadora	1000	0,11	5
Laminador de planos en frío	1500	0,17	3
Maq. Corrugadora	800	0,09	5
Limpiador electrolítico	900	0,10	5
Laminador de temple	1000	0,11	5
Estañador electrolítico	3000	0,34	2

Tabla 4 Frecuencia falla Planta Siderúrgica

En la tabla 4, se puede observar que acorde a los resultados obtenidos, los equipos de decapado, corrugadora, limpiador electrolítico y laminador de temple poseen una frecuencia de categoría 5, lo cual significa que es muy probable que ocurran varias fallas

en un año al tener un menor valor de MTBF y por tanto sea necesario realizar un plan mantenimiento con intervalos de tiempo breves entre cada chequeo.

3° Estimación impactos o consecuencias de fallas

Para la estimación de las consecuencias o impactos de la falla, se emplean los siguientes criterios y sus rasgos preestablecidos:

Categoría	Daños al personal	Efecto en la población	Impacto ambiental	Pérdida de producción (USD)	Daños a la instalación (USD)
5	Muerte o incapacidad total permanente, daños severos o enfermedades en uno o más miembros de la empresa.	Muerte o incapacidad total permanente, daños severos o enfermedades en uno o más miembros de la comunidad.	Daños irreversibles al ambiente y que violen regulaciones y leyes ambientales.	Mayor de 50 MM	Mayor de 50 MM
4	Incapacidad parcial, permanente, heridas severas o enfermedades en uno o más miembros de la empresa.	Incapacidad parcial, permanente, daños o enfermedades en al menos un miembro de la población.	Daños irreversibles al ambiente pero que violan regulaciones y leyes ambientales.	De 15 a 50 MM	De 15 a 50 MM
3	Daños o enfermedades severas de varias personas de la instalación. Requiere suspensión laboral.	Puede resultar en la hospitalización de al menos 3 personas.	Daños ambientales regables sin violación de leyes y regularizaciones, la restauración puede ser acumulada.	De 5 a 15 MM	De 5 a 15 MM
2	El personal de la planta requiere tratamiento médico o primeros auxilios.	Puede resultar en heridas o enfermedades que requieran tratamiento médico o primeros auxilios.	Mínimos daños ambientales sin violación de leyes y regulaciones.	De 500 mil a 5 MM	De 500 mil a 5 MM
1	Sin impacto en el personal de la planta.	Sin efecto en la población	Sin daños ambientales ni violación de leyes y regulaciones.	Hasta 500 mil	Hasta 500 mil

Tabla 5 Categorización de impactos de falla (Romero Carranza, 2016)

La tabla posee cinco tipos de impactos:

- Daños al personal
- Impacto a la población
- Impacto al ambiente
- Impactos en la producción
- Impactos asociados a daños en las instalaciones

De los cuales, los tres primeros serán categorizados considerando los criterios que se indican en la tabla Categoría de los Impactos.

El impacto en la producción IP se estimará en función de la cantidad de toneladas por unidad de tiempo que se deja de producir durante el periodo en que se repara el equipo para luego estimar las perdidas monetarias.

Sea:

PPA: Produccion perdida acumulada [ton]

PP_i: Produccion perdida equipo i [$\frac{ton}{h}$]

PpH_i: Producción por hora del equipo i [$\frac{ton}{h}$]

K_i: Cantidad de equipos i en funcionamiento [$\frac{ton}{h}$]

MTTR_i: Tiempo medio entre reparación del equipo i [h]

$$PPA = PP_i + MTTR_i \times \%PP \sum_{i=1}^{13} PpH_{i+1} \times K_{i+1}$$

Cabe mencionar que, si el equipo *i* es el último de la serie asociada a la configuración lógica, la producción perdida acumulada será igual a la producción perdida del equipo *i*.

Equipos	Produccion total [ton/h]	MTTR	N° Eq	PPi [ton/h]	PPA [ton]
Maq. Colada Continua Planchones	22,82	40	3	2738	5904
Maq. Colada Continua Palanquillas	28,52	40	4	4563	6845
Horno de recalentamiento PL	68,45	30	1	2054	4625
Horno de recalentamiento PA	114,1	30	1	3423	5135
Laminador Trio Reversible	34,23	20	2	1369	2049
Laminador de barras	38,03	12	3	1369	1369
Laminador de planos calientes	17,13	25	2	856	1715
Decapadora	17,13	15	1	257	1031
Laminador de planos en frío	8,6	14	2	241	482
Maq. Corrugadora	8,6	20	1	172	172
Limpiador electrolítico	8,6	5	1	43	129
Laminador de temple	8,6	12	1	103	206
Estañador electrolítico	8,6	6	1	52	52
				Total	29714

Tabla 6 Producción acumulada perdida por reparación de los equipos

Por Ej.: Si falla la máquina de colada continua de palanquillas, conlleva tener detenida la producción por 40 horas para poder repararla y por ende las máquinas que le siguen a continuación en la serie tampoco puede producir. Obteniendo un total de 6845 [ton] que se deja de producir por la detención de la máquina.

Ahora según (Gerdau, 2017) el volumen de acero laminado que recibió Latinoamérica el año 2017 desde China corresponde a un valor de US\$ 1.117 millones, lo que equivale a un precio promedio de US\$ 580 por tonelada de acero (laminado y derivados) obteniendo un costo total por pérdidas por fallas detallado a continuación:

Equipos	Costo total	Categoría
Maq. Colada Continua Planchones	\$ 3.424.561	2
Maq. Colada Continua Palanquillas	\$ 3.970.216	2
Horno de recalentamiento PL	\$ 2.682.471	2
Horno de recalentamiento PA	\$ 2.978.010	2
Laminador Trio Reversible	\$ 1.188.227	2
Laminador de barras	\$ 794.136	2
Laminador de planos calientes	\$ 994.918	2
Decapadora	\$ 597.951	2
Laminador de planos en frío	\$ 279.328	1
Maq. Corrugadora	\$ 99.760	1
Limpiador electrolítico	\$ 74.820	1
Laminador de temple	\$ 119.712	1
Estañador electrolítico	\$ 29.928	1
Total	\$17.234.038	

Tabla 7 Pérdidas monetarias por detención de la producción medida en dólares

De los resultados obtenidos se puede observar que los equipos con mayor impacto en la producción son los que poseen mayores pérdidas monetarias en caso de fallas, acorde a los resultados, los equipos con mayor impacto monetario son los equipos de colada continua, hornos de recalentamiento y el laminador trío reversible. Los equipos con mayores costos involucrado son los que se encuentran al inicio de la configuración lógica, dado que, si estos fallan, todo el proceso productivo se ve perjudicado.

Los impactos asociados a **Daños de las instalaciones DI** se evaluarán considerando los siguientes factores:

- Costos de Reparación
- Costos de Reposición de Equipos

$$DI = (\text{Costos de Reparación} + \text{Costos de Reposición de Equipos})$$

Acorde a los datos obtenidos de los precios de reposición de los equipos, se evaluó el costo de reparación de cada uno, variando el precio desde un 15% a un 40% del total del costo de reposición. Obteniendo los siguientes resultados:

Equipos	CR 15%	CR20%	CR25%	CR30%	CR35%	CR40%	Costo adquisición	Total 15%	Total 40%	Categoría
Maq. Colada Continua Planchones	\$ 225.000	\$ 300.000	\$ 375.000	\$ 450.000	\$ 525.000	\$ 600.000	\$ 1.500.000	\$ 1.725.000	\$ 2.100.000	2
Maq. Colada Continua Palanquillas	\$ 225.000	\$ 300.000	\$ 375.000	\$ 450.000	\$ 525.000	\$ 600.000	\$ 1.500.000	\$ 1.725.000	\$ 2.100.000	2
Horno de recalentamiento PL	\$ 375.000	\$ 500.000	\$ 625.000	\$ 750.000	\$ 875.000	\$ 1.000.000	\$ 2.500.000	\$ 2.875.000	\$ 3.500.000	2
Horno de recalentamiento PA	\$ 375.000	\$ 500.000	\$ 625.000	\$ 750.000	\$ 875.000	\$ 1.000.000	\$ 2.500.000	\$ 2.875.000	\$ 3.500.000	2
Laminador Trio Reversible	\$ 900.000	\$ 1.200.000	\$ 1.500.000	\$ 1.800.000	\$ 2.100.000	\$ 2.400.000	\$ 6.000.000	\$ 6.900.000	\$ 8.400.000	3
Laminador de barras	\$ 900.000	\$ 1.200.000	\$ 1.500.000	\$ 1.800.000	\$ 2.100.000	\$ 2.400.000	\$ 6.000.000	\$ 6.900.000	\$ 8.400.000	3
Laminador de planos calientes	\$ 900.000	\$ 1.200.000	\$ 1.500.000	\$ 1.800.000	\$ 2.100.000	\$ 2.400.000	\$ 6.000.000	\$ 6.900.000	\$ 8.400.000	3
Decapadora	\$ 150.000	\$ 200.000	\$ 250.000	\$ 300.000	\$ 350.000	\$ 400.000	\$ 1.000.000	\$ 1.150.000	\$ 1.400.000	2
Laminador de planos en frío	\$ 900.000	\$ 1.200.000	\$ 1.500.000	\$ 1.800.000	\$ 2.100.000	\$ 2.400.000	\$ 6.000.000	\$ 6.900.000	\$ 8.400.000	3
Maq. Corrugadora	\$ 225.000	\$ 300.000	\$ 375.000	\$ 450.000	\$ 525.000	\$ 600.000	\$ 1.500.000	\$ 1.725.000	\$ 2.100.000	2
Limpiador electrolítico	\$ 150.000	\$ 200.000	\$ 250.000	\$ 300.000	\$ 350.000	\$ 400.000	\$ 1.000.000	\$ 1.150.000	\$ 1.400.000	2
Laminador de temple	\$ 900.000	\$ 1.200.000	\$ 1.500.000	\$ 1.800.000	\$ 2.100.000	\$ 2.400.000	\$ 6.000.000	\$ 6.900.000	\$ 8.400.000	3
Estañador electrolítico	\$ 150.000	\$ 200.000	\$ 250.000	\$ 300.000	\$ 350.000	\$ 400.000	\$ 1.000.000	\$ 1.150.000	\$ 1.400.000	2

Tabla 8 Impacto asociado al daño en las instalaciones

De la tabla 8 se puede observar que 5 de 13 equipos son de categoría 3. Lo que genera costos por daños a las instalaciones entre US\$5.000.000 y US\$15.000.000. Los equipos más críticos en este aspecto son el laminador trio reversible, laminador de barras, laminador de planos calientes y planos fríos.

Los impactos por daño al personal, impacto ambiental y efecto a la población se establecieron por suposición acorde la tabla 5 mencionada con anterioridad.

4° Cálculo nivel de criticidad

Para determinar el nivel de criticidad, se empleó la siguiente formula:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \sum_{1}^5 \text{Impacto}$$

Y se obtuvieron los siguientes resultados:

N°	Equipo	Frecuencia	DI	IP	Impacto			Criticidad	
					Dpers	Epob	Iamb		
1	Maq. Colada Continua Planchones	1		2	2	5	1	3	13
2	Maq. Colada Continua Palanquillas	1		2	2	5	1	3	13
3	Horno de recalentamiento PL	2		2	2	5	1	3	26
4	Horno de recalentamiento PA	2		2	2	5	1	3	26
5	Laminador Trio Reversible	4		3	2	5	1	1	48
6	Laminador de barras	3		3	2	5	1	1	36
7	Laminador de planos calientes	5		3	2	5	1	1	60
8	Decapadora	3		2	2	4	1	2	33
9	Laminador de planos en frío	5		3	1	3	1	1	45
10	Maq. Corrugadora	5		2	1	3	1	1	40
11	Limpiador electrolítico	5		2	1	4	1	2	50
12	Laminador de temple	2		3	1	5	1	1	22
13	Estañador electrolítico	5		2	1	4	1	2	50

Tabla 98 Criticidad equipos planta siderúrgica

De los resultados obtenidos en la tabla 9, se establecieron como más críticos los equipos señalados en color rojo y naranja. Los equipos críticos según los resultados son: el laminador trio reversible, de planos calientes, planos en frío, maquina corrugadora, limpiador electrolítico y el estañador electrolítico.

5.5. ETAPA 5 Simulación

Se realizó simulación con el complemento para Excel, Crystall Ball. Para lo cual se definieron los siguientes supuestos y predicciones:

- **Definición de supuestos**

Se define como supuesto una distribución triangular con parámetro asimétricos para cada “alfa” y “MTTR”, los cuales quedan de color verde.

- **Definición de predicción**

Se define como predicción, la disponibilidad de cada sub sistema el cual queda de color celeste.

Subsistema	Equipos	Configuración	Alfa	Beta	MTTR	MTBF	Aeq	(1-Aeq)	MTBF sub	MTTR sub	Asub
Colada Continua Planchones		Fraccionamiento									99,21%
	Maq.Colada Continua	33%	5000	1	40	5000	99,21%	0,79%			
	Maq.Colada Continua	33%	5000	1	40	5000	99,21%	0,79%			
	Maq.Colada Continua	33%	5000	1	40	5000	99,21%	0,79%			
Colada Continua Palanquillas		Fraccionamiento									99,21%
	Maq.Colada Continua	33%	5000	1	40	5000	99,21%	0,79%			
	Maq.Colada Continua	33%	5000	1	40	5000	99,21%	0,79%			
	Maq.Colada Continua	33%	5000	1	40	5000	99,21%	0,79%			
Recalentamiento Planchones		Stand By									99,4%
	Horno 1		2500	1	30	2500	98,81%	1%	5000	30	
	Horno 2		2500	1	30	2500	98,81%	1%			
Recalentamiento Palanquillas		Stand By									99,4%
	Horno 1		2500	1	30	2500	98,81%	1%	5000	30	
	Horno 2		2500	1	30	2500	98,81%	1%			
Laminado trio reversible		Redundancia									99,98%
	Laminador trio rev	3 sobre 2	2200	1	20	2200	99,10%	0,90%			
	Laminador trio rev		2200	1	20	2200	99,10%	0,90%			
	Laminador trio rev		2200	1	20	2200	99,10%	0,90%			
Laminado de barras		Redundancia									99,97%

Tabla 90 Simulación Crystall Ball planta siderúrgica

De los cuales, el error estándar de las pruebas no superó el 0,03%, obteniendo una disponibilidad total del sistema de un 89,53% y con respecto a los subsistemas, se obtienen los siguientes resultados:

	Disponibilidad
Colada Continua Planchones	99,21%
Colada Continua Palanquillas	99,21%
Recalentamiento Planchones	99,40%
Recalentamiento Palanquillas	99,40%
Laminado trio reversible	99,98%
Laminado de barras	99,97%
Laminado de planos en caliente	98,63%
Decapado	98,52%
Laminado de planos en frío	99,08%
Corrugado	97,56%
Limpieza y Estañado	98,07%

Tabla 101 Disponibilidad subsistemas

De los resultados obtenidos, se puede apreciar que los subsistemas con peor disponibilidad con respecto a los con mejor disponibilidad son los de laminado de planos en caliente, decapado, corrugado, limpieza y estañado. Por el contrario, el subsistema de laminado trio reversible, de barras y los hornos de recalentamiento, son los subsistemas que poseen mejor disponibilidad. Cabe mencionar que, a nivel general, todos los subsistemas de la planta propuesta poseen una buena disponibilidad, mayor a un 95%.

5.6. ETAPA 6 Análisis de resultados

Para poder analizar los datos, es necesario determinar la criticidad de cada subsistema. Se calculó un promedio de la criticidad de los equipos asociados al subsistema de limpieza y estañado. Obteniendo los siguientes resultados:

N°	Equipo	Criticidad Subsistema
1	Maq. Colada Continua Planchones	13
2	Maq. Colada Continua Palanquillas	13
3	Horno de recalentamiento PL	26
4	Horno de recalentamiento PA	26
5	Laminador Trio Reversible	48
6	Laminador de barras	36
7	Laminador de planos calientes	60
8	Decapadora	33
9	Laminador de planos en frío	45
10	Maq. Corrugadora	40
11	Limpiador electrolítico	41
12	Laminador de temple	
13	Estañador electrolítico	

Tabla 12 Criticidad subsistemas de planta siderúrgica

De la tabla se puede apreciar que, los subsistemas más críticos son los de **laminado de planos caliente, laminado trio reversible, laminado de planos en frío, corrugado y limpieza & estañado**. Luego realizando una comparativa se obtiene:

N°	Equipo	Criticidad Subsistema	Indisponibilidad
1	Maq. Colada Continua Planchones	13	0,79%
2	Maq. Colada Continua Palanquillas	13	0,79%
3	Horno de recalentamiento PL	26	0,60%
4	Horno de recalentamiento PA	26	0,60%
5	Laminador Trio Reversible	48	0,02%
6	Laminador de barras	36	0,03%
7	Laminador de planos calientes	60	1,37%
8	Decapadora	33	1,48%
9	Laminador de planos en frío	45	0,92%
10	Maq. Corrugadora	40	2,44%
11	Limpiador electrolítico	41	1,93%
12	Laminador de temple		
13	Estañador electrolítico		

Tabla 13 Criticidad vs Indisponibilidad subsistema

Y graficando los datos se obtiene:

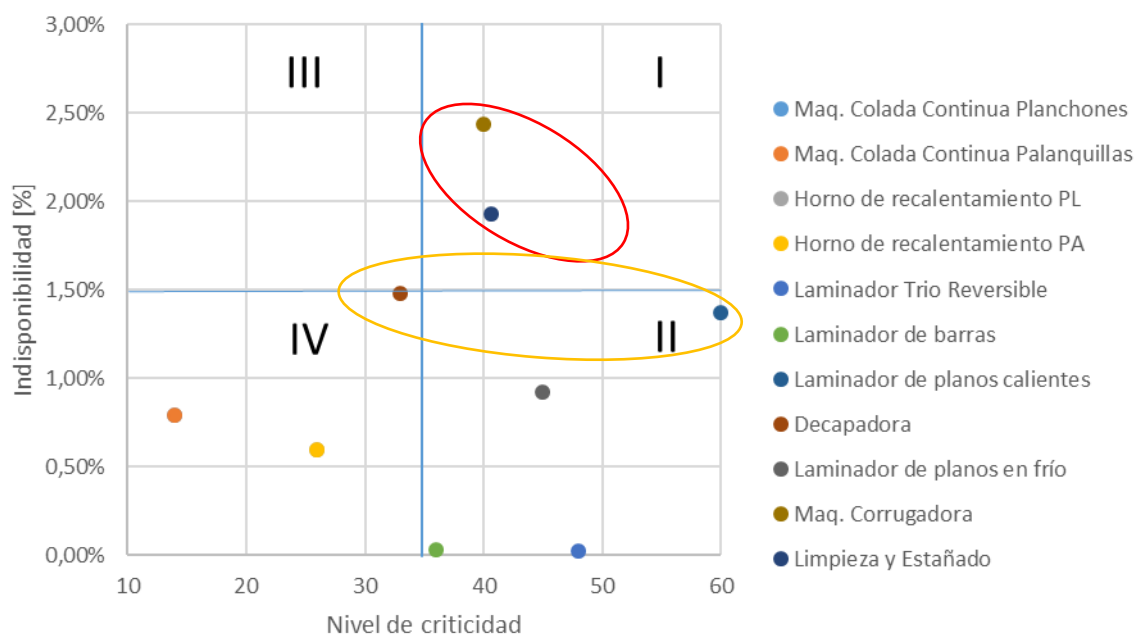


Figura 17 Gráfica indisponibilidad vs criticidad

Según los resultados, la gráfica presenta 4 sectores, los cuales fueron ordenados del peor al mejor caso. Siendo el peor de los casos el número I y el mejor el número IV.

De la gráfica podemos observar que en el cuadrante I se encuentra el subsistema de corrugado y el subsistema de limpieza & estañado, presentando una alta criticidad y una alta indisponibilidad, destacados en rojo. Esto se debe principalmente a su alta frecuencia de falla e impacto que tiene sobre el ambiente y sobre el daño que puede producir en el personal de la planta debido al uso de ácidos, baños de estañado y electrólisis, desprendiendo gases nocivos para la salud del personal y nocivos para el ambiente. Del cuadrante número II, podemos observar que el subsistema de laminado de planos calientes se encuentra en las cercanías del cuadrante I, teniendo un nivel alto de criticidad y un porcentaje medio de indisponibilidad. Finalmente el último subsistema preocupante es el de decapado, dado que se encuentra en un punto medio entre indisponibilidad y nivel de criticidad, destacados en amarillo.

Dados los resultados de criticidad e indisponibilidad, hemos identificado los equipos más críticos para la planta siderúrgica y en los cuales enfocaremos nuestro plan de mejora.

- Máquina corrugadora
- Limpiador electrolítico
- Laminador de temple
- Estañador electrolítico

5.7. ETAPA 7 Plan de Mejoras

5.7.1 Objetivos

El objetivo del Mantenimiento es conservar todos los bienes que componen los activos de la empresa, en las mejores condiciones de funcionamiento, con un muy buen nivel de confiabilidad, calidad y al menor costo posible.

- Garantizar la seguridad del personal, las instalaciones y la conservación del medio ambiente.
- Optimizar el tiempo y el costo de ejecución de las actividades de mantenimiento.
- Respalidar las operaciones, asegurando la máxima disponibilidad de los equipos.
- Prolongar la vida útil de los equipos, cuando se justifique económicamente.

Etapas del mantenimiento:

1. Planificación y programación del mantenimiento: El objetivo de este proceso será elaborar la planificación anual y el trabajo programado diario de mantenimiento.
2. Ejecución del mantenimiento: El objetivo de este proceso será el de ejecutar el mantenimiento preventivo en el equipo.
3. Estudio de averías y mejoramiento del mantenimiento: El objetivo será determinar las causas de falla y proponer condiciones de mejora.

Para el proceso de la ejecución de la mantención se utilizarán dos indicadores:

- Disponibilidad
- Tiempo medio de reparación

Además, se evalúa el ciclo de cada equipo para determinar su confiabilidad y tiempo medio entre fallas para estadísticas futuras.

5.7.2 Modelo de mantenimiento

Dado que en la industria siderúrgica una parada no programada de los equipos implica grandes pérdidas monetarias, por lo que los equipos bajo ningún concepto pueden sufrir una avería o un mal funcionamiento. es necesario definir el modelo de mantenimiento adecuado que se aplicará a los equipos.

Según (García, 2003) para industrias en la cual la disponibilidad de sus equipos debe ser mayor al 90%, es necesario elegir un modelo de alta disponibilidad. 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 parada del equipo (correctivo, preventivo sistemático). Para mantener estos equipos es necesario emplear técnicas de mantenimiento predictivo, que nos permitan conocer el estado del equipo con él en marcha, y a paradas programadas, que supondrán una revisión general completa, con una frecuencia generalmente anual o superior.

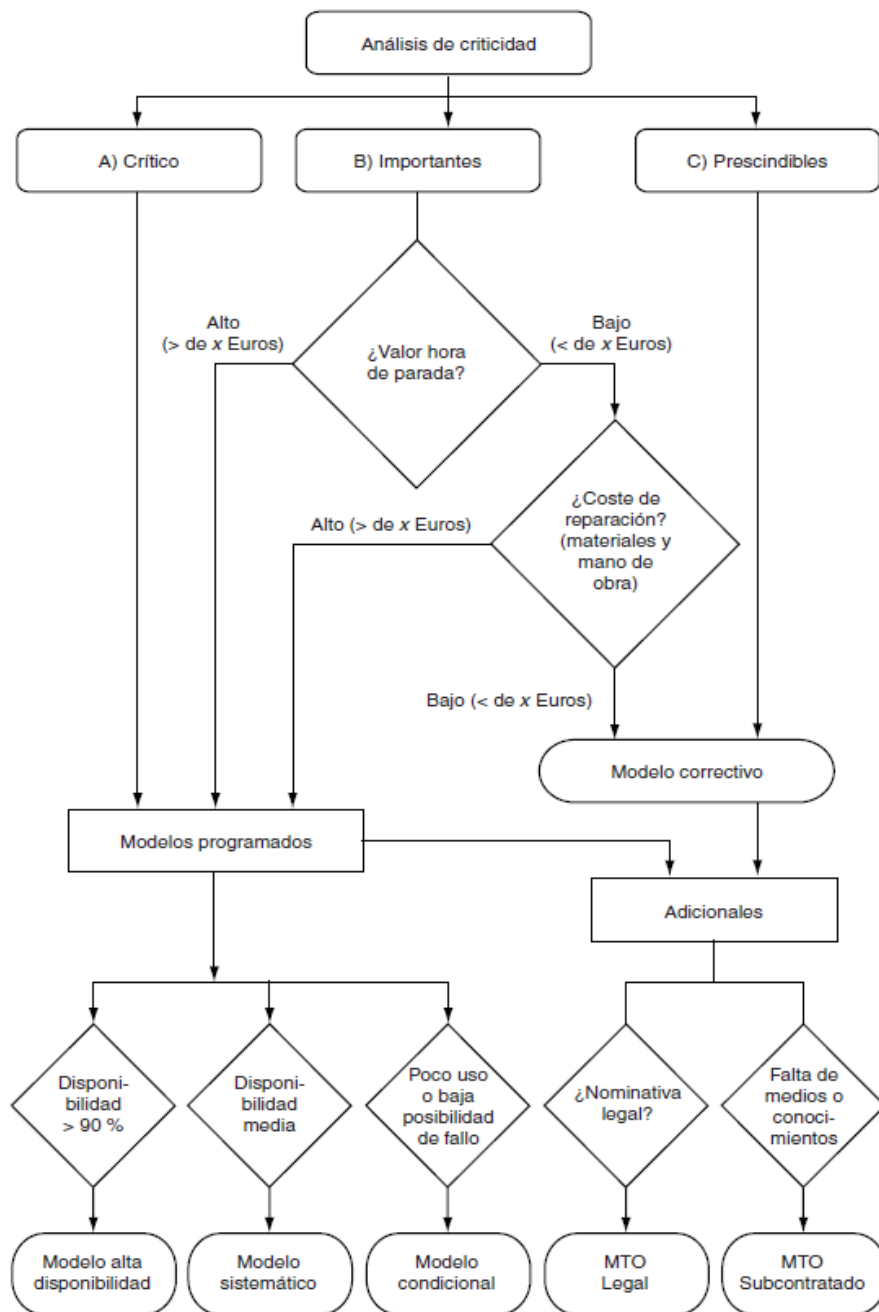


Figura 7 Modelos de mantenimiento según (García, 2003)

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 año tras año. El objetivo que se busca en este equipo es cero averías, dado que en

general no hay tiempo para subsanar convenientemente las incidencias que ocurren, siendo conveniente en muchos casos realizar reparaciones rápidas provisionales que permitan mantener el equipo en marcha hasta la próxima revisión general.

5.7.3 Tareas de mantenimiento

Tareas de mantenimiento a realizar en un modelo de alta disponibilidad:

1. **Inspecciones visuales:** Sea cual sea el modelo de mantenimiento aplicable, las inspecciones visuales suponen un coste muy bajo,
2. **Tareas de lubricación:** Igual que en el caso anterior, las tareas de lubricación, por su bajo coste, siempre son rentables.
3. **Verificaciones on-line:** Este tipo de tareas consiste en la toma de datos de una serie de parámetros de funcionamiento utilizando los propios medios de los que dispone el equipo. Son, por ejemplo, la verificación de alarmas, la toma de datos de presión, temperatura, vibraciones, etc.
4. **Verificaciones off-line:** Se pretende, con este tipo de tareas, determinar si el equipo cumple con unas especificaciones prefijadas, pero para cuya determinación es necesario desplazar determinados instrumentos o herramientas especiales, que pueden ser usadas por varios equipos simultáneamente y que, por tanto, no están permanentemente conectadas a un equipo, como en el caso anterior. Podemos dividir estas verificaciones en dos categorías:
 - Las realizadas con instrumentos sencillos, como pinzas amperométricas, termómetros por infrarrojos, tacómetros, vibrómetros, etc.
 - Las realizadas con instrumentos complejos, como analizador de vibraciones, detección de fugas por ultrasonidos, termografías, análisis de la curva de arranque de motores, etc.

5. **Limpiezas según condición:** dependen del estado en que se encuentre el equipo.
6. **Ajustes condicionales:** dependen de que el equipo haya dado síntomas de estar desajustado.
7. **Limpiezas sistemáticas:** realizadas cada cierta hora de funcionamiento, o cada cierto tiempo, sin importar cómo se encuentre el equipo.
8. **Ajustes sistemáticos:** sin considerar si el equipo ha dado síntomas de estar desajustado.
9. **Sustitución sistemática de piezas:** por horas de servicio o por fecha de calendario, sin comprobar su estado.
10. **Sustitución de todos los elementos sometidos a desgaste**

Según (García, 2003), si no disponemos de una data histórica de frecuencia de fallo o modelos matemáticos de predicción, la determinación de la frecuencia con la que deben realizarse las tareas de mantenimiento propuestas puede hacerse en base a la opinión de expertos. Es la más subjetiva, la menos precisa de las formas de determinar la frecuencia de intervención y, sin embargo, la más utilizada.

5.7.4 Plan de mantenimiento

Para la planta de siderúrgica, se requieren revisar todos los sistemas que cumplen una función determinada dentro de un equipo. Los cuales pueden ser:

- Sistema de seguridad
- Sistema de lubricación
- Sistema eléctrico
- Sistema mecánico
- Sistema neumático
- Sistema hidráulico

- Sistema de control

Además, es importante identificar si la falla es funcional o técnica.

Se debe definir el tipo de frecuencia que tendrá cada tarea de mantenimiento asociada al modelo de alta disponibilidad, el cual se presenta a continuación:

- **Frecuencia Diaria:** realizar las tareas de inspección, lubricación y verificación on-line y off-line.
- **Frecuencia Mensual:** realizar las tareas de limpieza y ajuste sistemático, además de la sustitución sistemática de piezas.
- **Frecuencia Anual:** realizar las tareas de sustitución de elementos sometidos a desgaste.

Estas tareas deben ser ejecutadas por el personal encargado del mantenimiento y durante turnos normales de trabajo, las tareas deben ser programadas y asignadas con anticipación.

Para el caso práctico de la planta siderúrgica, es necesario definir establecer una mayor frecuencia para las tareas asociadas a los equipos críticos.

5.7.5 Personal de mantenimiento

Se considera para el proyecto:

- **1 Jefe de Mantenimiento:** Gestiona el mantenimiento del punto de vista técnico y económico, resuelve los problemas que surgen, comprueba que la programación se cumpla y se encarga de asignar recursos necesarios para la realización de cada tarea.
- **1 Encargado de bodega de repuestos y herramienta**

- 1 **Administrativo:** Encargado de realizar tareas de documentación y encargado de ejecutar los pedidos de repuestos y herramientas a los proveedores.
- 4 **Jefes de equipo:** Se encargan de que se cumpla la planificación de las mantenciones de su equipo.
- 4 **Encargados:** El cual resuelve las incidencias que puedan ocurrir día a día y ejecuta las reparaciones.

Los equipos son:

- Equipo 1: Colada continua y hornos
- Equipo 2: Laminados
- Equipo 3: Limpieza y estañado
- Equipo 4: Decapado y Corrugado

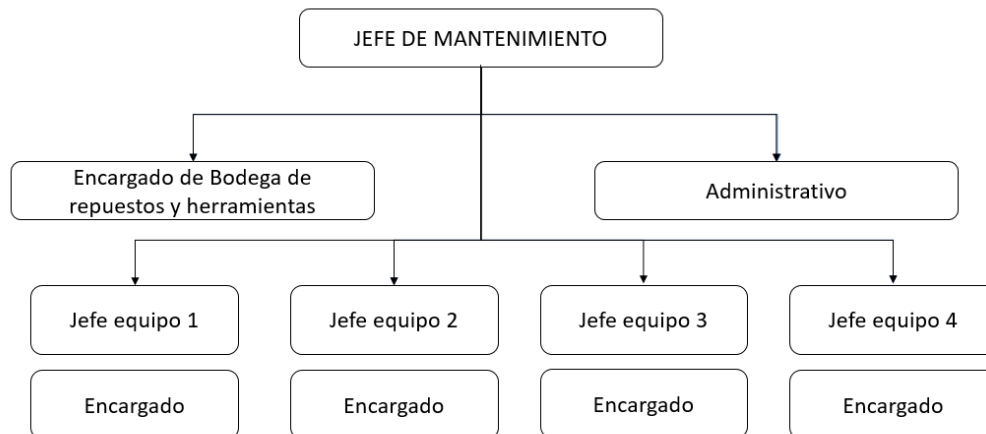


Figura 8 Organigrama equipo mantención

5.7.6 Importancia de la disponibilidad de repuestos

Se considera para el proyecto, tener una bodega exclusiva de repuestos con un intenso control de inventario, dado que la falta de repuesto genera paralizaciones en la producción y demoras excesivas.

Según (García, 2003) es necesario clasificar los repuestos en tres categorías:

1. **REPUESTO A:** Piezas que es necesario mantener en stock en planta, sobre todo para equipos críticos.
2. **REPUESTO B:** Piezas que es necesario tener localizadas, con proveedor, teléfono y plazo de entrega.
3. **REPUESTO C:** Piezas que no es necesario prever, pues un fallo en ellas no afecta a la operatividad de la planta (como mucho supondrán ligeros inconvenientes).

Hay cinco aspectos que debemos tener en cuenta a la hora de seleccionar el stock de repuesto:

- La criticidad de los equipos
- Consumo
- Coste de la pieza
- Coste producción perdida en caso de fallo
- Plazo de aprovisionamiento.

Ya hemos evaluado con anterioridad como influye la **criticidad de un equipo** en el stock de repuestos. Con respecto al **consumo** se puede decir que todos aquellos elementos que se consuman habitualmente y que sean de bajo coste deben considerarse como firmes candidatos a pertenecer a la lista de repuesto mínimo. Así, los elementos de bombas que no son críticas pero que frecuentemente se averían y también, aquellos consumibles de

cambio frecuente, tales como aceites y filtros. Además, es relevante tener en consideración el **plazo de aprovisionamiento**, dado que hay algunas piezas se encuentran en stock permanente en proveedores cercanos a la planta y otras, en cambio, se fabrican bajo pedido, por lo que su disponibilidad no es inmediata, e incluso, su entrega puede demorarse meses. Puesto que se trata de tener un almacén con el menos coste posible, el **precio de las piezas** formará parte de la decisión sobre el stock de las mismas. Finalmente, si el **coste de producción perdida** en caso de fallo es alto, es posible que sea interesante estudiar cada fallo que pueda tener el equipo y prever qué piezas pueden ser necesarias para acometer cualquier posible contingencia.

Para el caso práctico, sería necesario tener repuestos en stock asociados a los equipos críticos encontrados tales como máquina corrugadora, limpiador electrolítico, laminador de temple y estañador electrolítico. Además, tener repuestos para los equipos que presentan altos costos de producción perdida como lo son las máquinas de colada continua y los hornos de recalentamiento.

5.7.7 Control sobre las mantenciones correctivas

La presencia de un aumento de las mantenciones correctivas de los equipos implica un grave problema de mala manipulación de los mismos. Es por esto que se recomienda como buena práctica, siempre realizar capacitaciones a los operarios para un correcto uso de los equipos y reducir así su probabilidad de falla.

Otra razón para el aumento de las mantenciones correctivas es que los equipos adquiridos para la planta sean de segunda mano. Es por esto que se recomienda una buena planificación de las mantenciones preventivas según el tipo de equipo y vida útil para evitar paradas no programadas.

6. CONCLUSIONES

Finalmente, de los resultados obtenidos se puede concluir que, mediante simulación es posible establecer si la planta productiva diseñada tendrá la disponibilidad que se requiere para reducir los costos al mínimo, permitiendo establecer planes adecuados de mantenimiento. Para complementar el uso de la simulación, se pueden utilizar los métodos de análisis de criticidad y Reliability Block Diagram (RBD) para obtener un mejor entendimiento de las fallas que se pueden producir en la planta, lo cual permite tomar decisiones adecuadas sobre el diseño del plan de mantenimiento en base al historial de fallas encontradas y los posibles riesgos e impactos que pueden aparecer.

Para poder llevar a cabo la simulación, será necesario tener acceso a una buena fuente de información técnica sobre los equipos que se requieren para el correcto funcionamiento de la planta, dado que se requieren datos tales como su capacidad productiva, mean time between failure, mean time to repair, posibles costos de producción, impactos ambientales, impactos al personal, etc. Con el fin de realizar un análisis de la planta y poder decidir a tiempo si invertir o no en ciertos equipos, definiendo además que configuración lógica funcional será idónea para su funcionamiento.

Si bien, realizar la simulación no lo es todo, ya que el diseño de una planta y su disponibilidad productiva depende directamente del cómo se gestione la operación de esta. Cabe mencionar que, sin una buena definición del plan de mantenimiento, los costos por fallas no programadas no se verán reducidas, lo que conlleva costos de reparación superiores al 30% del costo del equipo, lo cual en plantas de mediana y gran magnitud no es un costo despreciable.

Para poder planificar y ejecutar un buen plan de mantenimiento, hay que tener en consideración los siguientes puntos; el modelo de mantenimiento a utilizar, la definición

de las tareas a realizar y la frecuencia de estas, establecer el personal de mantenimiento que se tendrá a cargo de los equipos, generar un plan de provisionamiento y uso de repuestos, y finalmente mantener un adecuado control sobre las mantenciones programadas.

Acorde a lo mencionado anteriormente, para el caso práctico de la planta siderúrgica, se eligió un modelo de mantenimiento de alta disponibilidad, es decir mayor al 90%. La razón de un nivel tan alto de disponibilidad es, en general, el alto coste en producción que tiene una avería dentro de la planta, según el caso práctico realizado en una planta siderúrgica, si falla una máquina de colada continua, se pueden generar pérdidas de producción superiores a los US\$ 3.000.000 sin considerar los costos de reparación de US\$600.000 o el costo de adquirir una nueva máquina que puede alcanzar US\$1.500.000.

Es por esto que es tan importante definir desde la fase de diseño del proyecto los equipos que se van a utilizar, teniendo claro sus características, costos, desempeño en operación e historiales de falla, además de evaluar todas las configuraciones lógicas posibles, para poder simular todos los escenarios existentes con el fin de tomar a tiempo la decisión de elegir un equipo más barato pero con mayores tasas de fallas que pueden controlarse mediante un buen plan de mantenimiento o decidir invertir en un equipo un poco más caro pero con tasas de falla muy bajas lo que requiere planes de mantenimiento menos intensivos.

De este modo se pueden anticipar los costos y riesgos de un proyecto industrial y te permite poder evaluar con tiempo si el objetivo es generar un aumento de los CAPEX con el fin de disminuir a largo plazo los OPEX, o viceversa.

7. REFERENCIAS

- Ahmed, N. U. (1995). A design and implementation model for life cycle cost management system. *Information & Management*, 28, 261–269.
- Almanza, A., & Milena, A. (2008). *Diagnostico Del Sector Siderúrgico Y Metalúrgico En Colombia Y Evaluación De Alternativas Tecnológicas Para Dar*. Retrieved from <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14288/T41.08A62d.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Amendola, L. (2006). *Gestión de Proyectos de Activos Industriales, Asset Management*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Americana, N. N. (2004). *Dirección de Proyectos* (Tercera Ed). Pennsylvania: Project Management Institute, Inc.
- Andrés, J. De, Landajo, M., & Lorca, P. (2009). Expert Systems with Applications Flexible quantile-based modeling of bivariate financial relationships : The case of ROA ratio. *Expert Systems With Applications*, 36(5), 8955–8966. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.021>
- Ar, G. R., Sof, M., Alberola, C., Martorell, S., & Curso, A. (2014). Mejora de la disponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar de un reactor de agua a presión.
- Arata, A. (2008). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales*. Santiago: RiL editores.
- Arata, A., & Villalon, R. Determinación de equipos críticos en una planta de Chancado a través de la plataforma R-MES (2008).
- Barberá, L., González, V., Crespo, A., & Moreu, P. (2010). Revisión de herramientas software para el análisis de la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS) de equipos industriales. *Journal of Ingeniería Y Gestión de Mantenimiento*, 68.
- Diez, C. (1999). Consideración del riesgo en la evaluación de proyectos de inversión. In *Apuntes de Evaluación de Proyectos* (pp. 1–33). Universidad de Chile.
- El Análisis de Criticidad, una Metodología para mejorar la Confiabilidad Operacional. (n.d.). Retrieved from <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/el-analisis-de-criticidad-una-metodologia-para-mejorar-la-confiabilidad-ope>
- Fallis, A. ., & Harry, G. (2007). Reliability Block Diagram (RBD). *System*, 53(9), 1–6. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Fondo de Crédito Industrial. (2000). *Manual para la formulación y evaluacion de proyectos* (3ra Edició). Caracas.
- Fuller, S. (2016). LIFE-CYCLE COST ANALYSIS. Retrieved from <https://www.wbdg.org/resources/life-cycle-cost-analysis-lcca>
- García, S. (2003). *Organización y Gestión Integral de Mantenimiento*.

- Gerda. (2017). Importaciones de acero aumentan 8% entre enero y marzo. Retrieved from <http://www.gerdau.cl/acero/importaciones-de-acero-aumentan-8-entre-enero-y-marzo/>
- Huerta, R. (2010). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional, 12–16.
- Kardec, A., & Nascif, J. (2002). *Mantenimiento: Función Estratégica*. Qualitymark Editora Ltda.
- Kristjanpoller, F., Crespo, A., López-Campos, M., & Viveros, P. (2017). Propuesta metodológica para la evaluación del impacto esperado de fallos en equipos complejos. Caso aplicado a una planta de trituración de mineral de cobre. *Dyna Management*.
- Kristjanpoller, F., & Viveros, P. (2015). RAM-C : A novel methodology for evaluating the impact and the criticality of assets over systems with complex logical configurations, (Welte), 1619–1625. <https://doi.org/10.1201/b19094-211>
- Lafraia, J. R. B. (2001). *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Qualitymark Editora.
- Medina, C. (1998). La tecnología y proyectos de inversión. Retrieved from <http://www.azc.uam.mx/publicaciones/enlinea2/3-1tec.htm#1>
- Mesa, D. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia Et Technica*, XII(30), 155–160.
- Mideplan. (1998). Preparación y presentación de proyectos de inversión, 128.
- Oracle. (2017). Oracle Crystal Ball. Retrieved from <http://www.oracle.com/us/products/applications/crystalball/overview/index.html>
- Pinto, A. K. (1995). *Gerenciamento moderno de Manutenção*.
- Pistarelli, A. (2010). Mantenibilidad.
- Rey Sacristán, F. (2008). Inversión en equipos y sistemas de producción. Retrieved from <http://www.tecnicaindustrial.es/tifrontal/a-290-inversion-equipos-sistemas-produccion.aspx>
- Rivero, L. (2008). *Jerarquización de los elementos de un sistema mediante la fusión de medidas de importancia*. Universidad Central de Venezuela.
- Romero Carranza, J. L. P. (2016). *Análisis de criticidad y estudio RCM del equipo de máxima criticidad de una planta desmotadora de algodón*. Universidad de Sevilla.
- Santos, T. (2008). “Estudio de factibilidad de un proyecto de inversión: etapas en su estudio.” *Contribuciones a La Economía*. Retrieved from <http://www.eumed.net/ce/2008b/>
- Tavares, L. (2000). Administración Moderna de Mantenimiento Lourival Augusto Tavares, 119–132.
- Viveros, P., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013). Propuesta de un

modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo
Proposal of a maintenance management model and its main support tools, 21, 125–
138.