UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2016

PLAN DE MEJORAMIENTO DE DISPONIBILIDAD EN PLANTA DE REFINERIA DE COBRE, DIVISIÓN CODELCO NORTE

LOMBARDO CORTÉS, CONSTANZA CECILIA

http://hdl.handle.net/11673/23520

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

PLAN DE MEJORAMIENTO DE DISPONIBILIDAD EN PLANTA DE REFINERIA DE COBRE, DIVISIÓN CODELCO NORTE.

AUTOR

CONSTANZA CECILIA LOMBARDO CORTÉS

PROFESOR GUÍA

FREDY KRISTJANPOLLER RODRÍGUEZ

PROFESORA CORREFERENTE

MÓNICA LÓPEZ CAMPOS

VALPARAÍSO, SEPTIEMBRE 2016

A mis padres Jacqueline y Luis y a mi abuelita "La ita",

por acompañarme en todo este proceso

de sacrificio y dedicación.

CONTENIDO

RESUMEN 5
1. PROBLEMÁTICA 7
2. OBJETIVOS 9
2.1 OBJETIVO GENERAL 9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 9
3. METODOLOGÍA 10
4. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA 12
4.1 ANTECENTES GENERALES DE CODELCO CHILE 12
4.2 EXPLICACIÓN GENERAL DEL PROCESO PRODUCTIVO DEL COBRE 12
5. DESCRIPCIÓN PLANTA DE REFINERÍA DE COBRE 14
5.1 FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA 14
5.2 DESCRIPCIÓN DE MÁQUINAS UTILIZADAS EN EL PROCESO 17
5.2.1 MÁQUINA PREPARADORA DE ÁNODOS 18
5.2.2 MÁQUINAS DESPEGADORAS-LAVADORAS DE CÁTODOS 19
5.2.3 MÁQUINAS LAVADORAS DE RESTO DE ÁNODOS (SCRAP) 19
6. DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS INGIENERILES 20
6.1 INGENIERÍA EN CONFIABILIDAD (IC) 20
6.2 TEORÍA DE CONFIABILIDAD 26
6.2.1 CONFIABILIDAD 26
6.2.2 MANTENIBILIDAD 26
6.2.3 DISTRIBUCIÓN DE FALLAS ACUMULADA 27
6.2.4 INDICADORES PROBABILÍSTICOS PARA ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD 27
6.2.5 CONFIABILIDAD DE SISTEMAS 28
6.3 SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANTENCIÓN 32
6.3.1 COSTOS GLOBALES 32
6.4 RMES 34

7. REPRESENTACIÓN DE CONFIGURACIÓN LÓGICA FUNCIONAL DE PLANTA DE REFINERÍA DE COBRE (Software RMES®) 37
7.1 SUPUESTOS UTILIZADOS EN LA DIAGRAMACIÓN LÓGICO FUNCIONAL 37
7.2 DIAGRAMA LÓGICO FUNCIONAL PROPUESTO 38
7.2.1 MÁQUINAS DE LAVADO Y PREPARACIÓN 38
7.2.2 LÍNEAS DE TRANSFERENCIA Y GRÚAS 40
7.2.3 CIRCUITOS DE ELECTROREFINACIÓN 42
7.2.4 PLANTA COMPLETA 43
8. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD, CONFIABILIDAD Y MANTENIBILIDAD. 44
8.1 DISPONIBILIDAD PLANTA COMPLETA 44
8.1.1 DISPONIBILIDAD MÁQUINAS DESPEGADORAS DE CÁTODOS .. 47
8.2 MTBF Y MTTR 51
8.2.1 MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS N°1 52
8.2.2 MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS N°2 53
8.2.3 MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS N°3 55
8.2.4 MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS N°4 56
9. COSTO DE LA FALTA 57
10. DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS DE MEJORA 60
10.1 MEJORA EN EL AMBITO DE PROYECTO 62
10.2 MEJORA EN EL AMBITO DE GESTIÓN 64
11. CONCLUSIONES 66
12. REFERENCIAS 68
ANEXOS 69
ANEXO 1. DIAGRAMA PLANTA COMPLETA 70

RESUMEN

El tema a tratar en el presente trabajo es la propuesta de un plan de mejoramiento para lograr un aumento en la disponibilidad de Planta de Refinería de cobre, utilizando como caso aplicado la Refinería de Chuquicamata.

Para poder realizar dicho estudio se tomó como base la información histórica de las detenciones de los equipos que componen la planta, comprendida entre el período Enero-Marzo del 2016.

Primero que todo se modeló la planta de Refinería empleando el Software R-MES, para ello se establecieron los equipos, sistemas y subsistemas necesarios con el fin de representar la planta lo más realista posible además de las relaciones existentes entre ellos, elaborando los diagramas lógico-funcional según la metodología RBD.

Terminando lo anterior, se pudo obtener indicadores de disponibilidad para la planta completa y la de sus principales líneas las cuales son sala de máquinas, circuitos de electrorefinación y líneas de transferencia y grúas, dando como resultado que la sala de máquinas es la que presenta menor disponibilidad con un 93%. Debido a esto se estudió las diferentes máquinas que componen la sala de máquinas, obteniéndose que las máquinas despegadoras de cátodos son las más indisponibles con una disponibilidad de 93,21%. Continuando con el desarrollo se realizó un análisis de los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad de dichas máquinas, obteniendo los MTTR y MTBF para cada máquina despegadora de cátodos. Para corroborar lo anterior se analizó el costo de la falta para tener un resultado más completo.

Luego de tener claro que la MDC1 es el equipo más crítico, se procedió a analizar la disponibilidad y MTTR de los componentes que pertenecen a esta máquina, dando como resultado que la estación de enzunchado es el componente crítico que afecta a la MDC1 con una disponibilidad de 91,62% y un MTTR de 1,98 horas.

Con los resultados obtenidos se proponen dos mejoras aplicables a la estación de enzunchado, la primera en términos de proyecto con el fin de mejorar el diseño actual de la estación; para esto se propone la utilización de redundancia, es decir, agregar un máquina enzunchadora que esté en redundancia activa 2:1 con la actual. La segunda propuesta corresponde a la mejora del tiempo medio de reparación, mejor dicho a la disminución de este tiempo, con el objeto de que la máquina no se encuentre demasiado tiempo indisponible, siendo reparada, por lo que se propone realizar capacitaciones a los operarios de mantención, mejorando el conocimiento que ya poseen. Ambas propuestas permitirán aumentar la disponibilidad de la planta total y con esto lograr un aumento en la producción,+ pero cabe mencionar que solo son analizadas de forma cualitativa, la parte económica queda a cargo de la empresa respectiva.

1. PROBLEMÁTICA

Chile es uno de los principales productores de cobre a nivel mundial, por lo que la economía del país depende fuertemente de dicha actividad.

Dentro de la gran cantidad de minas que se encuentran en nuestro país, una de las más importantes debido a su gran producción corresponde a la División Codelco Norte, conocida como Chuquicamata, con una producción aproximada de 308.625 [1] toneladas métricas de cobre fino.

Para poder ser procesado dicho mineral, debe pasar por un serie de etapas, las cuales corresponden en primer lugar a chancado y molienda, luego por mecanismos de clasificación hasta obtener un concentrado de cobre que contiene 30% del metal. Su purificación posterior se realiza en hornos que permiten obtener ánodos con alrededor de 99% de pureza y finalmente la electrorefinación, la cual tiene por objetivo transformar los ánodos en cátodos con 99,99% de pureza.

Como bien se sabe hoy en día, el mercado del cobre es bien exigente con el porcentaje de pureza con la que el mineral es vendido, es por esto que el proceso correspondiente a la electrorefinación debe funcionar de manera correcta minimizando las fallas, en consecuencia para lograr un producción deseada se debe recurrir a la ingeniería de mantenimiento y gestión de activos, que es una rama fundamental que permite esclarecer las problemáticas que ocurren en la planta, a fin de tomar las decisiones correctas en términos de si se ejecutan acciones que corrijan los problemas tanto a nivel de equipo y sistemas disponibles como la adquisición de nuevos equipos, debido a una esperanza de funcionamiento que reflejan costos de oportunidad altos.

Dentro de este contexto se encuentra la confiabilidad, que permite predecir de manera aproximada el correcto funcionamiento de máquinas, mejor dicho permite obtener la probabilidad de que el equipo o sistema no falle, además de medir otros indicadores importantes que permitan tomar decisiones tanto táctico-operativas como estratégicas.

Por lo tanto de acuerdo a lo descrito cabe plantearse: ¿Es posible mejorar los indicadores de la planta de refinería a través de un enfoque de confiabilidad? ¿Cuáles serán las mejores alternativas para lograr un aumento en la producción de cátodos de cobre? Estos cuestionamientos son los que el presente trabajo buscará resolver.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un plan de mejoramiento de la disponibilidad para lograr aumento en la producción de planta de Refinería de Cobre en División Codelco Norte a través de enfoque RMES.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudio del proceso e impacto en planta de refinería de cobre.
- Estudio y análisis de información del período en evaluación de los equipos que componen la planta de Refinería.
- Utilización de software RMES con el fin de obtener indicadores que guíen la toma de decisión.
- Aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad RCM (Reliability Centred Maintenance) con el fin de proponer alternativas de mejoras.
- Proponer un plan de mejoramiento, evaluando su rentabilidad a través de análisis técnico.

3. METODOLOGÍA

El presente trabajo será abordado de la siguiente manera, primero, definición de la planta en estudio, la cual corresponde a una Refinería de cobre, específicamente de la División Codelco Norte y las principales tecnologías utilizadas en el proceso.

Debido a que se realizará un estudio en términos de confiabilidad, se continuará con la definición de ingeniería en confiabilidad, centrándose específicamente en los indicadores probabilísticos de dicha área como lo son MTBF (Mean Time Between Failures), MTTR (Mean Time to Repair), disponibilidad, por lo que se espera encontrar el mejor plan de mejoramiento, a través de un análisis técnico de cada mejora a incorporar, la evaluación económica quedará a cargo de la empresa, en este caso Codelco.

Cabe mencionar que para poder realizar dicho estudio a los indicadores mencionados se empleará el Software RMES (Reliability – Maintenance Engineering System), por lo tanto se explicará a grandes rasgos las funcionalidades que se pueden realizar en el software.

Luego de definir las herramientas de análisis, se procederá a explicar la diagramación lógico funcional que tendrá la planta mencionada, además de evaluar la disponibilidad, equipos críticos y a partir de estos los MTBF y MTTR. Hay que mencionar que para poder evaluar dichos indicadores se requiere de un repositorio de detenciones (fallas), para esto se utilizará una muestra de tres meses entre Enero y Marzo del 2016, debido a que las condiciones de operación durante el año son similares, sin presentar estacionalidad en la producción, por lo que el uso continuo y constante del equipo afecta de igual forma en cualquier período del año.

A partir de los datos obtenidos, principalmente de los equipos más críticos, se analizará las alternativas pertinentes para mejorar la disponibilidad del sistema lo cual se traduce en un aumento de la producción.

Estas alternativas se enfocarán específicamente en la operación en si, como disminución del MTTR o aumento del MTBF o bien en la reingeniería del diseño de la planta.

Como conclusión se presentarán alternativas de mejoras de la disponibilidad evaluadas en términos técnicos, debido que no se puede realizar una evaluación económica por falta de datos que no pudieron ser facilitados.

4. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

4.1 ANTECENTES GENERALES DE CODELCO CHILE

La corporación nacional del cobre de chile (CODELCO) [2] es una empresa estatal dedicada a la explotación minera, siendo la principal productora de cobre en el mundo. La compañía cuenta con cinco divisiones mineras, dentro de las cuales encontramos la División Codelco Norte, compuesta por los yacimientos Chuquicamata y Radomiro Tomic.

Dentro del proceso productivo de esta división principalmente para minerales sulfurados se encuentran los siguientes procesos Molienda, Flotación, Fundición y Refinería.

4.2 EXPLICACIÓN GENERAL DEL PROCESO PRODUCTIVO DEL COBRE

El mineral extraído en el rajo de Chuquicamata, es sometido a un proceso de chancado, específicamente a varias etapas de chancados, donde grandes máquinas (Chancadoras) reducen la rocas a un tamaño uniforme de no más de 1,5 cm. Luego se continúa con el proceso de molienda, a través de grandes molinos que continúan reduciendo el material hasta obtener un tamaño máximo de 180 micrones, a dicho material se le agrega agua y reactivos y es llevado a la siguiente etapa de flotación para obtener un concentrado de cobre seco. Para seguir con el proceso el concentrado pasa a la etapa de fundición, la cual tiene como objetivo separar el cobre de otros minerales e impurezas. El concentrado seco se trata a grandes temperaturas en hornos especiales, en esta etapa es donde se generan los llamados ánodos de cobre que son enviados a la planta de electrorefinación.

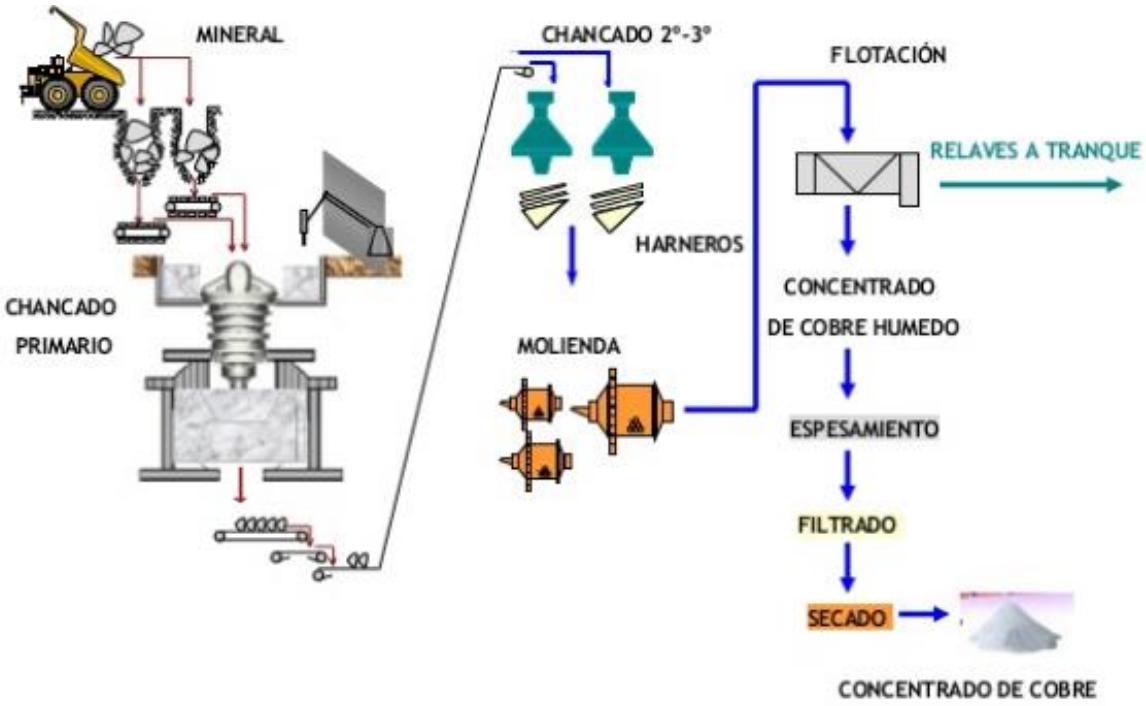


Figura 1. Proceso Productivo hasta Flotación.

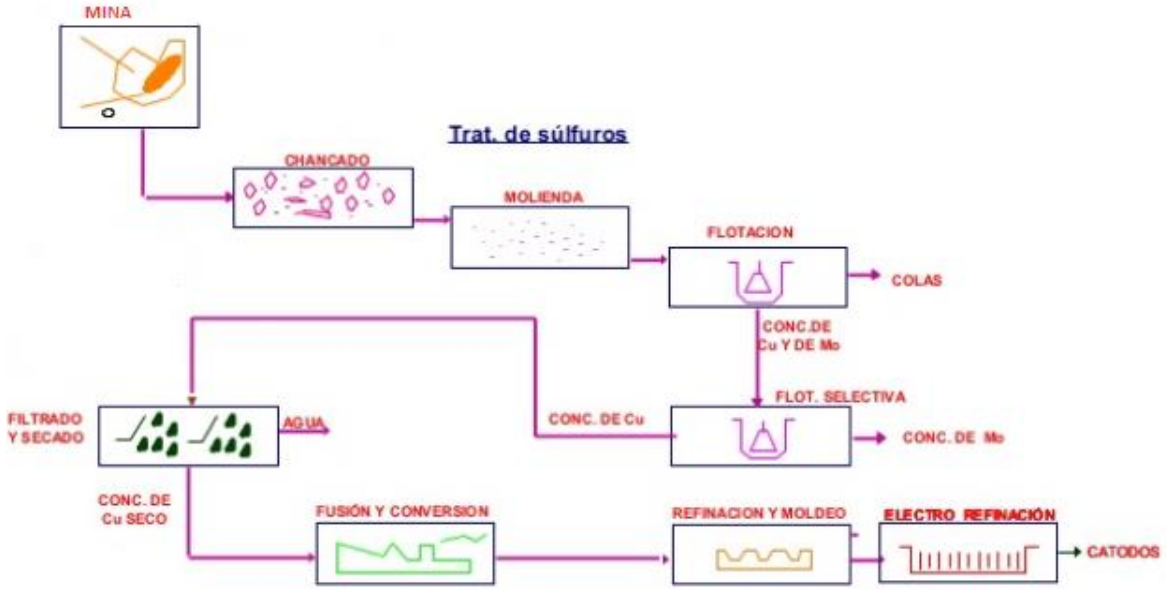


Figura 2. Diagrama general proceso de producción de cobre.

5. DESCRIPCIÓN PLANTA DE REFINERÍA DE COBRE

5.1 FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

La refinación es una etapa que consiste básicamente en la purificación de un material impuro. A modo de reseña más del 95% del total de cobre refinado en el mundo, es producido mediante el proceso electrolítico, consistente en la disolución electroquímica del cobre.

En el proceso de refinación electrolítica del cobre [3], los ánodos recibidos desde la fundición se alimentan a la máquina preparadora de ánodos, donde individualmente se obtiene su peso, espesor de cuerpo; además se enderezan en cuerpo y orejas para darles una verticalidad aceptable para las celdas, y se les cepilla la parte inferior de las orejas para tener un buen contacto eléctrico. Un carro de transferencia los conduce hacia el interior de la nave electrolítica donde son tomados por una grúa viajera y colocados en las celdas de electrólisis. Adicionalmente en las celdas se cargan también los cátodos y se hace recircular electrolito, el cual contiene, nominalmente, 200 gramos por litro de ácido sulfúrico y 40 gramos por litro de cobre. Los ánodos se disuelven electro-químicamente y se depositan en los cátodos efectuándose de esta manera la refinación del cobre.

Los ánodos permanecen en las celdas por un determinado periodo de tiempo (ciclo anódico) y comúnmente los cátodos lo hacen por la mitad de este tiempo (ciclo catódico). Por lo tanto generalmente se tienen dos ciclos catódicos por cada ciclo anódico. Después de finalizado el ciclo catódico, se retiran los cátodos de las celdas correspondientes y se colocan en la máquina lavadora-despegadora de cátodos, donde son pesados, lavados y etiquetados con su identificación de producción.

En el caso de la producción de cátodos de cobre, éstos alcanzan una pureza generalmente mayor a 99,99% de cobre, a partir de ánodos con un contenido de cobre típico de 99,5% hasta de 98%. (Carlos Cuadra, Jane Standen, 2005)

La electrorefinación tiene dos objetivos:

- Eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre. La pureza del cobre electro refinado debe ser mayor que 99,99 %, con menos de 0,004% de impurezas metálicas, lo cual es apropiado para todos los usos industriales, incluyendo las aplicaciones en Ingeniería Eléctrica. Esta pureza se obtiene sólo mediante la técnica de refinación electrolítica.

- La electrorefinación separa las impurezas valiosas del cobre, que pueden ser recuperadas luego como subproductos metálicos.

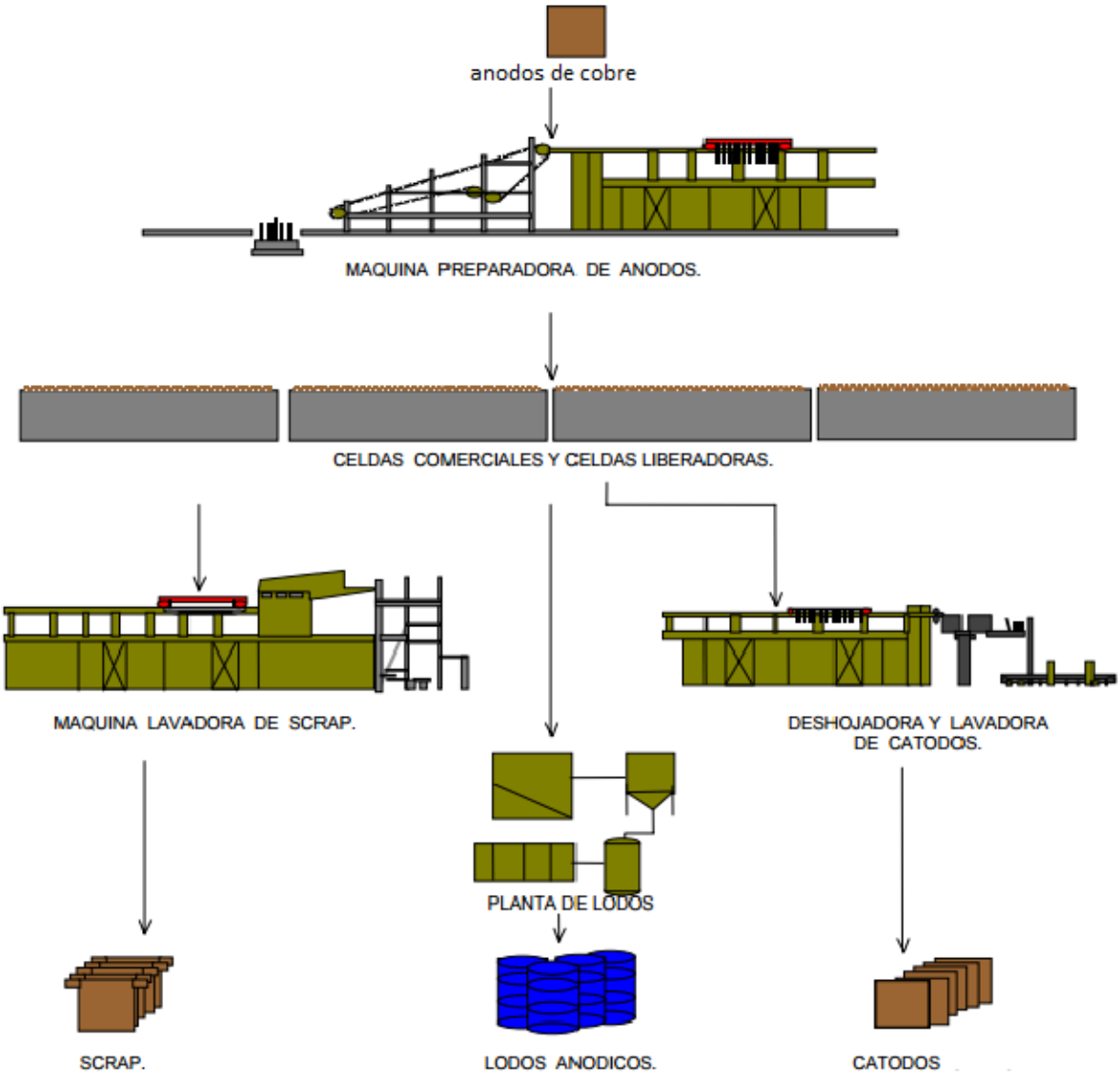


Figura 3. Diagrama general de proceso de Refinería de Cobre

Referencia. www.codelco.com

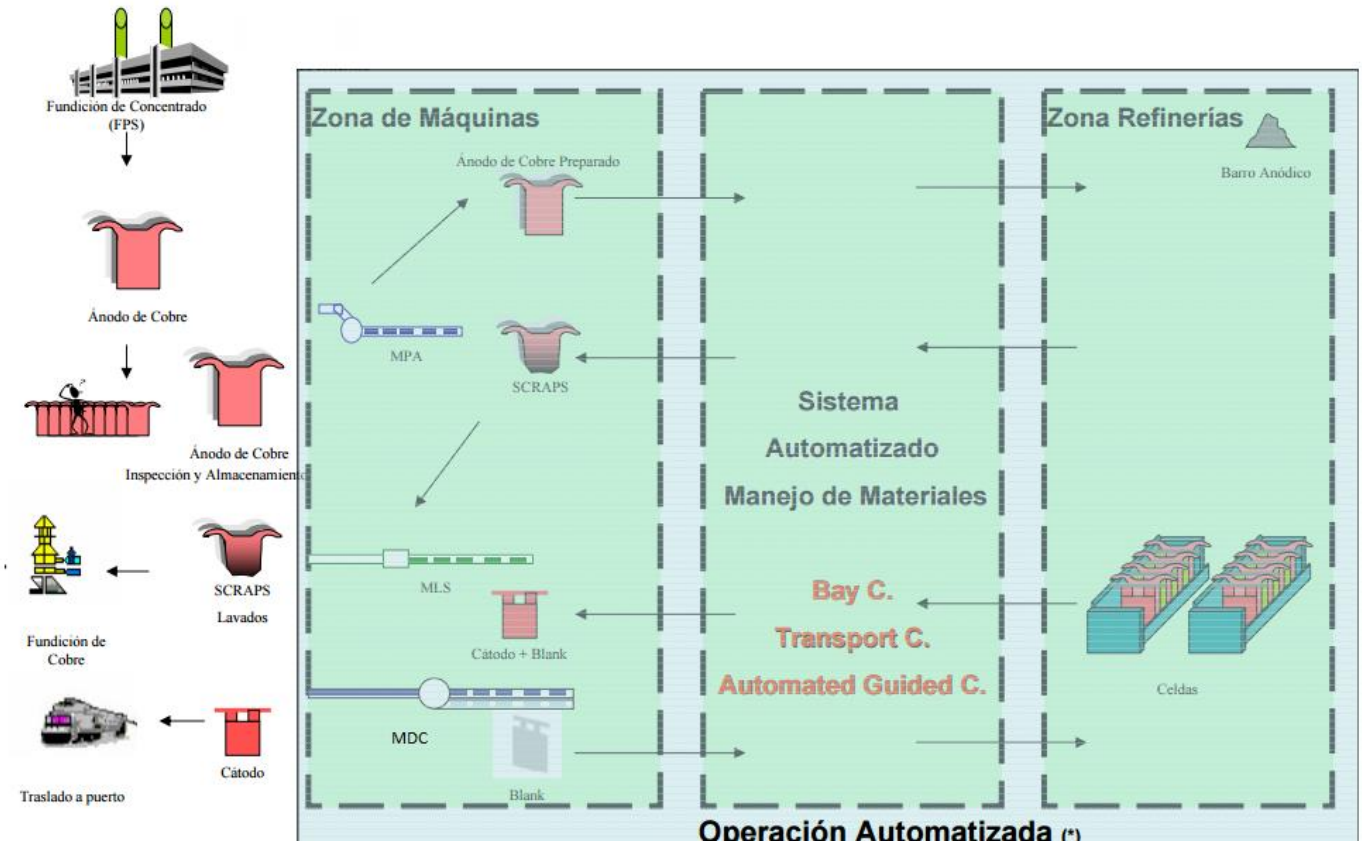


Figura 4. Proceso de Refinería del Cobre.

Referencia. www.codelco.com

5.2 DESCRIPCIÓN DE MÁQUINAS UTILIZADAS EN EL PROCESO

En el proceso de refinería las tecnologías principalmente desarrollas [4] corresponden a: máquinas preparadoras de ánodos, máquinas lavadoras-despegadoras de cátodos y máquinas lavadoras de restos de ánodos.

5.2.1 MÁQUINA PREPARADORA DE ÁNODOS

Dicha máquina posee los siguientes subsistemas

- Manipulación de lingadas
- Carga y pesaje
- Estación de preparación y transmisión
- Prensa de cuerpo
- Rechazo y muestreo
- Prensado de orejas
- Fresado de orejas
- Descarga
- Estación de verticalidad
- Transportadora espaciadora
- Carro de transferencia
- Rieles de almacenamiento de lingadas de ánodos

Las máquinas preparadoras de ánodos pueden tener una capacidad de 500 unidades por hora y tienen por objetivo mejorar la geometría de los ánodos, para así entregar ánodos de geometría y peso uniforme.

5.2.2 MÁQUINAS DESPEGADORAS-LAVADORAS DE CÁTODOS

Su propósito principal es lavar los cátodos para retirar restos de electrolito y de barro anódico, luego separar las láminas de cátodos de cobre del cátodo permanente, además de inspeccionar y rechazar las que estén fuera de estándar, apilar y empaquetar los cátodos. Por otro lado prepara los cátodos permanentes para retornarlos al proceso.

Una máquina de estas, cuenta con los siguientes subsistemas

- Rieles y Racks de almacenamiento y carro de transferencia
- Transportadora de lavado y cámara de lavado
- Estructura en donde se ubican las estaciones de despegado y pesado
- Apilamiento de cobre, enzunchado, etiquetado y manipulación de paquetes
- Sistema hidráulico/neumático
- Sistema de control eléctrico

El rango de capacidad está entre 60 y 650 unidades por hora.

5.2.3 MÁQUINAS LAVADORAS DE RESTO DE ÁNODOS (SCRAP)

Estas máquinas lavadoras tienen como funcionalidad recibir los ánodos para recuperar el barro anódico, lavándolos y generar un paquete para ser retirado por una grúa horquilla.

Los restos de ánodos pasan por una cámara de lavado en contracorriente.

Dicha máquina tiene una capacidad para 700 unidades por hora e incluye los siguientes grupos de equipos

- Rieles de almacenamiento de restos de ánodos
- Carro de transferencia
- Transportadora de carga
- Cámara de lavado
- Clarificador
- Estación de descarga
- Rueda de transferencia
- Estación de apilamiento
- Transportadora de paquetes
- Unidad de potencia hidráulica
- Sistema de control eléctrico

6. DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS INGIENERILES

6.1 INGENIERÍA EN CONFIABILIDAD (IC)

En los inicios, la gestión de activos estaba enfocada a responder a las detenciones imprevistas, acotando su accionar a solo actividades correctivas [5]. Continuando con sus etapas de desarrollo se orientó hacia la prevención desde la forma más básica del tipo cíclico hasta alcanzar formas más evolucionadas como la predictiva.

Más recientemente surge un concepto más proactivo de gestionar los activos, incorporando lo que es denominado mejora continua de equipos y sistemas, con la finalidad de aumentar la seguridad de funcionamiento de las instalaciones, este mejoramiento no implica aumento en el valor patrimonial de los activos, sino de su performance asociada al aumento de la confiabilidad y mantenibilidad de los sistemas y equipos.

La ingeniería de confiabilidad representa la expresión organizacional cuya tensión está orientada hacia la solución de los problemas del diseño, de la gestión y del mantenimiento de los activos a través de un enfoque rigurosamente científico y racional. (Arata, 2009)

El concepto de IC contempla principios, modelos, procedimientos y herramientas que tienen relación con la confiabilidad operacional en el ámbito del diseño, del proyecto y de la gestión que permite afrontar el tema de activos físicos para lograr importantes mejoras de eficiencia, eficacia y efectividad, buscando la competitividad sustentable de empresas intensivas en equipos.

Las funciones fundamentales de la Ingeniería de la Confiabilidad, que actúan de forma integrada, son:

- Proyectar la gestión de los activos a través de la definición del mix de políticas, el establecimiento de las condiciones técnico-económicas óptimas y la estandarización de los ciclos de trabajo, lo que se manifiesta, de manera concreta, en la dinamización permanente de los planes productivos de mantenimiento.

- Controlar técnica y económicamente el sistema relacionado con la gestión de los activos a través de KPIs, que permitan seguir la evolución histórica y la proyección de comportamiento de los equipos y de los sistemas a través del análisis de los propios resultados, como también por medio del *benchmarking* con realidades de referencia.

- Mejorar continuamente la gestión de los activos a través de la búsqueda permanente de oportunidades de mejoras, considerando de manera integrada el comportamiento de los KPIs relacionados con la confiabilidad, la mantenibilidad y la logística correspondiente, de los equipos y su impacto sobre el negocio. Las oportunidades de mejora, evaluadas técnica y económicamente, al ser implementadas cumplen con la dinamización del plan productivo de mantenimiento.

Por otro lado cabe mencionar que la IC permite relacionar costos directos y de capital con los beneficios asociados al mejoramiento de la confiabilidad operacional.

En consecuencia, corresponde a aquella área que logra transformar el mantenimiento como un gasto para la gestión de activos como resultado, con el propósito de alcanzar un rol táctico-estratégico de mediano-largo plazo, queriendo contribuir en la eficiencia con el objeto de mejorar la competitividad.

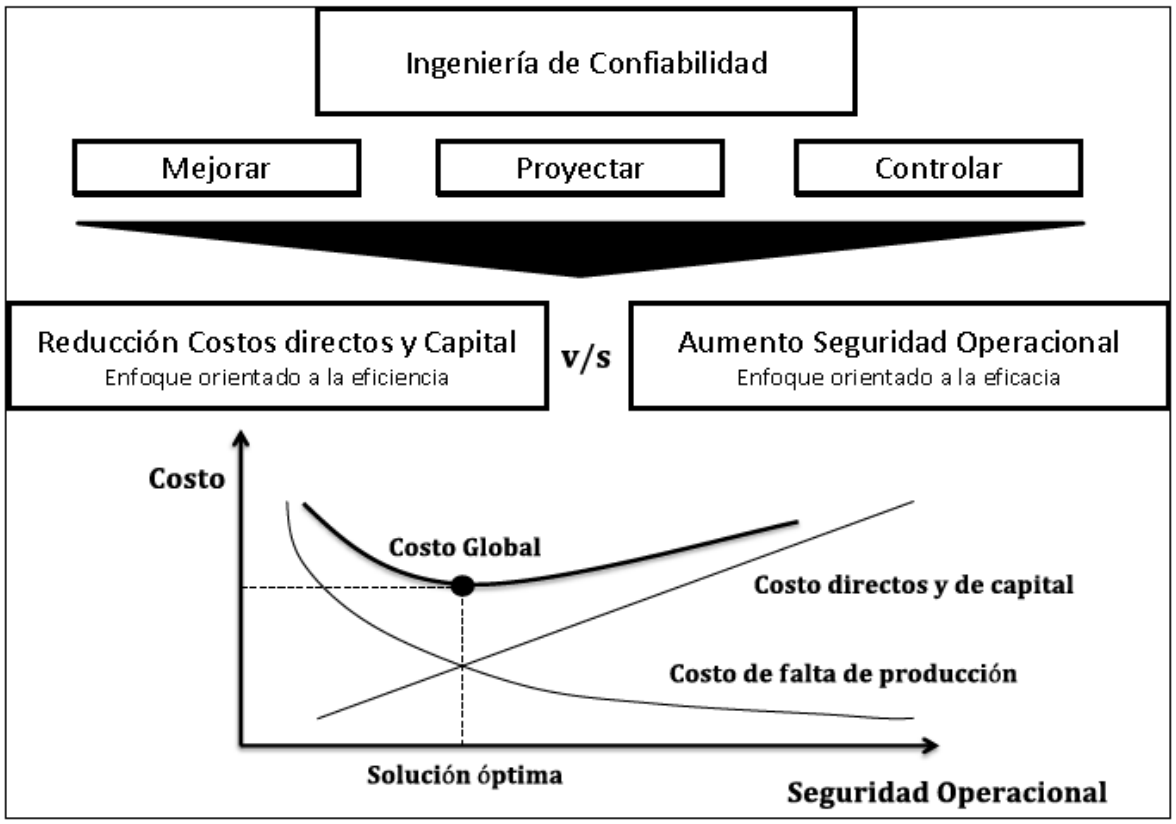


Figura 5. Costos directos y de capital vs seguridad operacional
Referencia. Ingeniería de la confiabilidad.

Para poder cumplir con esta tarea la IC requiere de herramientas que le permitan obtener indicadores para identificar oportunidades de mejora.

Uno de los indicadores básicos corresponde al costo de ineficiencia cuya ocurrencia se debe a la falta de producción, a causa de la no disponibilidad de los equipos que lo componen. El costo de ineficiencia no es un flujo real de dinero, sino que representa un ingreso que se deja de recibir cuyo valor depende de la detención no programada de los equipos; producto de la confiabilidad, mantenibilidad y utilizabilidad; y de su impacto económico sobre el sistema de acuerdo al nivel de redundancia de las configuraciones de los diagramas del proceso que representa la planta o flota de equipos. (Arata, 2009).

Si bien los costos de ineficiencia se generan a nivel de sistema, su origen se encuentra en los elementos críticos que lo establecen, sobre los cuales hay que aplicar políticas de inspección, control, reemplazo o reparación.

Un indicador que permite desagregar de manera clara el origen del costo de ineficiencia es el OEE (Overall Equipment Effectiveness). Este presenta el porcentaje de tiempo que un equipo produce realmente, considerando las condiciones de cantidad y calidad establecidas en el período planeado para hacerlo.

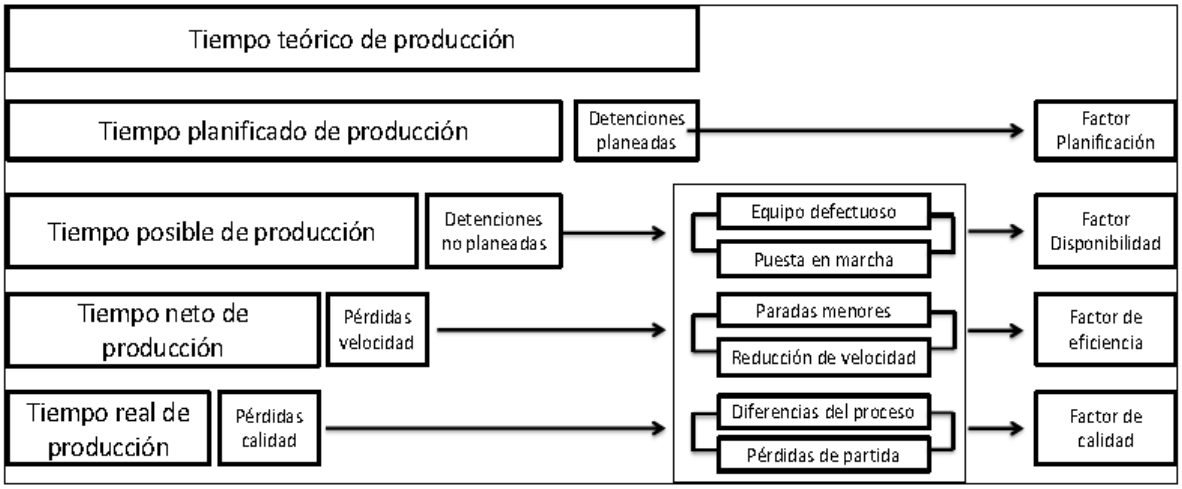


Figura 6. Eficiencia global de los equipos (OEE)
Referencia. Ingeniería de la confiabilidad.

El OEE es un buen indicador para la ingeniería de confiabilidad, dado que permite determinar la eficiencia de las instalaciones y de los equipos identificando con claridad el origen de ella a través de la búsqueda de las seis grandes pérdidas que resultan de las detenciones no planificadas (de operaciones y mantenimiento), de la velocidad y de la calidad (Arata, 2009).

Sin embargo, el aporte que genera la ingeniería en confiabilidad al negocio solo se da cuando al partir del comportamiento histórico de los equipos, se identifican, evalúan y, finalmente se implementan las oportunidades de mejoras, quedando plasmadas en el Plan Productivo de Mantenimiento.

Estas oportunidades de mejoras pueden ser tanto en el ámbito de la gestión como del proyecto, dentro de la gestión podemos encontrar mejoras relacionadas con la definición de estrategias de producción, determinación de mix de políticas de mantenimiento, gestión de repuestos críticos, programas de capacitación, etc. Por su parte en proyecto se pueden nombrar las siguientes alternativas como el aumento de las redundancias, políticas de reemplazo de equipos, fraccionamiento de instalaciones, la determinación de stock pile, etc.

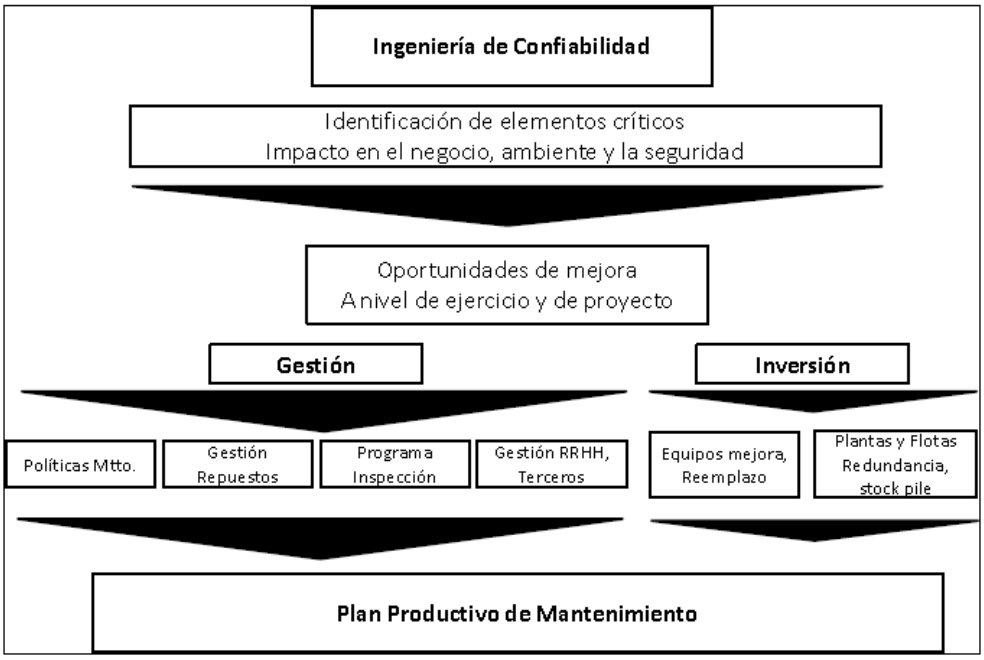


Figura 7. Materialización de la Ingeniería de la Confiabilidad.
Referencia. Ingeniería de la confiabilidad.

6.2 TEORÍA DE CONFIABILIDAD

Para el diseño eficiente de un plan de mantenimiento hay que tener en cuenta y comprender los fenómenos de falla de los equipos [6]. Es por esto que el estudio se enfocará en la confiabilidad de sistemas y/o componentes de éste, dado que la confiabilidad de un sistema o planta está determinada por la confiabilidad de los equipos que lo componen.

6.2.1 CONFIABILIDAD

La confiabilidad de un componente en un instante de tiempo t, R(t), corresponde a la probabilidad de que dicho ítem no falle en un intervalo de tiempo (0, t).

A los equipos se le pueden asignar dos estados en todo instante de su vida; estos son buen funcionamiento y funcionamiento defectuoso. Por lo que a dicho equipo se le puede considerar la probabilidad de encontrarse en un estado u otro.

6.2.2 MANTENIBILIDAD

Es el concepto que se relaciona con el desarrollo de una intervención de mantenimiento o reparación, es decir, la capacidad de un equipo o componente de ser reparado.

La mayoría de las veces se asocia, en forma errónea, con el tiempo promedio de intervención MTTR, sin considerar la variabilidad presente en los tiempos de ejecución en todo procedimiento de reparación.

6.2.3 DISTRIBUCIÓN DE FALLAS ACUMULADA

La distribución acumulada de fallas F(t) se define como la probabilidad que un equipo o sistema falle en un intervalo de tiempo (0, t). Entonces:

$$\mathbf{R(t) + F(t) = 1}$$

6.2.4 INDICADORES PROBABILÍSTICOS PARA ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

6.2.4.1 MTBF

Es un indicador bastante útil que corresponde al tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures), es decir es el promedio de tiempo transcurrido entre una falla y la siguiente. Expresado de manera más matemática, corresponde a la esperanza de vida de un elemento.

$$\boxed{MTBF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt}$$

Referencia. Manual de Mantenimiento Instalaciones Industriales.

6.2.4.2 MTTR

Es la estimación del tiempo de reparación promedio, MTTR (Mean Time to Repair), permite al equipo o componente pasar del estado de falla a estar disponible para la operación.

6.2.4.3 DISPONIBILIDAD

Indicador muy utilizado y de fácil comprensión es la disponibilidad, corresponde al estado de un equipo para cumplir una función requerida.

La disponibilidad se define, matemáticamente, como la razón que se establece entre el tiempo en que el sistema está, realmente disponible para el funcionamiento y el tiempo total.

$$D = \frac{Td}{Td + Ti}$$

Referencia. Manual de Mantenimiento Instalaciones Industriales

Donde:

D: Disponibilidad
Td: Tiempo que se encuentra técnicamente disponible para ser utilizado en labores de producción.
Ti: Tiempo que el sistema no se encuentra disponible, ya sea por mantención preventiva o por falla.

6.2.5 CONFIABILIDAD DE SISTEMAS

La confiabilidad es función de la complejidad del sistema, por lo que es de suma importancia establecer la relación que existe entre los equipos que componen al sistema, en otras palabras se trata de definir la forma en que cada componente individual afecta el correcto funcionamiento del sistema.

$$Rs\ (t) = f(Ri(t))$$

Donde Rs(t) representa la confiabilidad del sistema y Ri(t) la de cada uno de los "n" componentes del sistema "S".

La importancia de la confiabilidad del conjunto viene dada por lo siguiente:

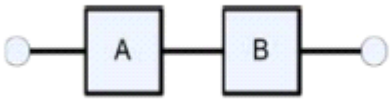
- Si se sabe sobre el comportamiento de cada componente, se puede deducir el comportamiento del sistema.
- Es posible jerarquizar sobre la base de componentes críticos.
- Evaluar el efecto del mantenimiento de un componente sobre el sistema.
- Orientar las estrategias de mantenimiento para el sistema.

Dado lo anterior es posible encontrar las siguientes configuraciones que pueden adoptar los equipos y se denominarán configuraciones lógicas.

6.2.5.1 CONFIGURACIÓN EN SERIE

Este tipo de configuración implica que la falla de cualquier equipo o subsistema bajo este modelo provoca una detención total del sistema al que pertenecen.

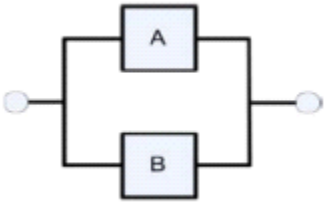
La confiabilidad de un sistema en serie corresponde a la probabilidad que todos los elementos no fallen en un tiempo determinado.



$$Rs(t) = R1(t)R2(t).....Rn(t) = \prod_{i=1}^{n} Ri(t)$$

6.2.5.2 CONFIGURACIÓN EN PARALELO

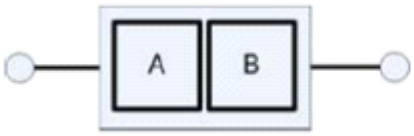
La configuración en paralelo relaciona a dos o más equipos siendo cada uno de ellos capaz de soportar la carga total de la etapa del proceso. Un sistema paralelo se encuentra indisponible solamente el tiempo en que coinciden en detención todos los elementos que lo conforman.



$$Rs(t) = 1 - Qs(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} Qi(t)$$

6.2.5.3 CONFIGURACIÓN EN FRACCIONAMIENTO

En la configuración en fraccionamiento los 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.

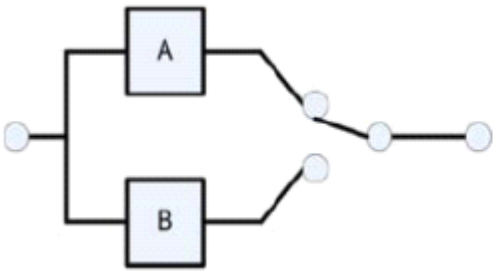


$$R_S = 1 - \left[\sum_{1}^{n} (1 - R_i) \times I_i \right]$$

6.2.5.4 CONFIGURACIÓN EN 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.

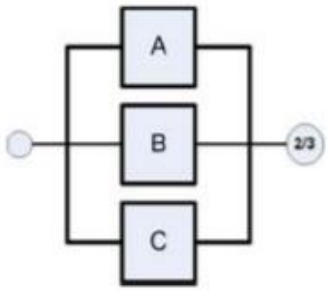


$$R_S(t) = R_A(t) + \int_0^t f_A(\tau) R_S(t - \tau) d\tau$$

6.2.5.5 CONFIGURACIÓN EN REDUNDANCIA

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

En el caso del ejemplo se tiene 3 equipos de los cuales se requiere al menos 2 disponibles para que el sistema se encuentre en esta condición



$$Rs = P(r \leq j \leq n) = \sum_{j=r}^{n} \binom{n}{j} p^{j} (1-p)^{n-j}$$

6.3 SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANTENCIÓN

6.3.1 COSTOS GLOBALES

Como bien se explicó anteriormente todo sistema tiene un indicador de disponibilidad condicionado por la confiabilidad y la mantenibilidad del mismo.

Por lo que al haber indisponibilidad del sistema (o equipos) se incurre en costos de ineficiencia por no producción o por falta de servicio.

Para poder lograr un aumento en la confiabilidad y reducir los costos de ineficiencia se pueden lograr por una inversión a nivel de:

- Proyecto: Por un aumento del nivel de redundancia, sobredimensionamiento de la instalación o por mejoras de diseño.
- Operación: Por mejores estrategias de mantenimiento.

Por lo tanto los costos globales cuantifican todos los costos incurridos durante el ciclo de vida de un proyecto o instalación y se puede describir según la siguiente relación:

Costo global = Costo capital fijo + Costo operacional + Costo de ineficiencia

El costo de capital fijo (o de inversión) queda determinado por el costo de los equipos e instalaciones asociados al proyecto. Además puede considerarse el capital de trabajo requerido para la operación.

El costo operacional queda definido por la cuantificación de todos los elementos propios de la operación de un sistema, tales como: insumos, energía, repuestos, etc.

El costo de ineficiencia está dado por el costo asociado a la indisponibilidad de la instalación durante el período de evaluación.

Una vez que ya se definieron dichos costos, se puede analizar distintas alternativas de equipo y de configuraciones del sistema, ya que cualquier modificación que se haga para aumentar la confiabilidad implicará un aumento en la disponibilidad, por lo que los costos de ineficiencia disminuirán. Pero, sumado a lo anterior, los costos de inversión aumentarán.

En consecuencia para poder concluir acerca de la conveniencia del aumento de la confiabilidad se deben analizar los costos globales y obviamente que la mejor alternativa será la que tiene el mínimo costo global.

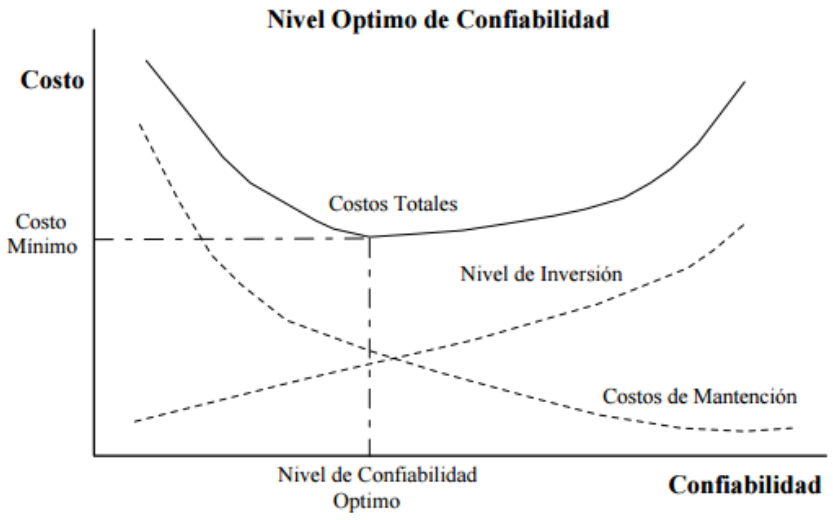


Figura 8. Curva de costos globales

Referencia. Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad en Plantas Industriales.

6.4 RMES

Es un desarrollo en el área de las tecnologías de la información que busca, a través de la ingeniería de confiabilidad, aumentar la competitividad operacional de una empresa. Esto se puede lograr mediante la automatización de procesos, que permitan la mejora continua a través de soluciones sustentables en el tiempo.

El objetivo de este software es entregar conocimiento y herramientas necesarias para que la empresa pueda desarrollar por sí sola, un proceso que la lleve a alcanzar un mantenimiento de clase mundial.

La implementación de R-MES [7] en plantas industriales permite generar gran valor de forma integrada y sustentable en el tiempo, tanto a nivel táctico operativo como estratégico, en aplicaciones que van desde el mejoramiento en la gestión hasta la identificación de oportunidades de mejora.

Un proceso de ingeniería de confiabilidad (IC), en plantas industriales, sin la ayuda de un sistema informático es inviable, no sólo porque éste posibilita registrar e importar datos sino también por su importante capacidad de cálculo, obteniendo KPIs de forma continua para analizar, optimizar, mejorar y decidir debidamente las acciones que maximizarán la competitividad de la función mantenimiento.

La plataforma R-MES es una herramienta rigurosa, flexible y personalizable, que se adapta a los requerimientos de cada empresa, permitiendo obtener beneficios reales de una IC científicamente sustentada. Por otro lado es posible determinar la real criticidad de los equipos dentro de un sistema complejo a través del conocimiento de su configuración lógico-funcional y de su disponibilidad.

Esta aplicación realiza análisis tanto históricos como probabilísticos, permitiendo determinar el real impacto de un equipo en el sistema además de identificar si corresponden a componentes agudos (altos tiempos de intervención (MTTR)) o crónicos (alta frecuencia de falla (MTBF)) con las respectivas acciones de mejoras para cada caso, más aún si son equipos críticos. Cabe mencionar que R-MES es capaz de determinar a través de un ajuste histórico de curva la probabilidad de falla, que sumado con los tiempos de intervención, proporcionarán la disponibilidad esperada del equipo y en consecuencia el impacto económico de una falla que ocurra dentro del sistema.

Dentro de los módulos que componen el software encontramos:

- Diagramación lógica de sistemas complejos.
- Importación de datos históricos mediante archivos .csv.
- Modelamiento de datos históricos y ajuste a distribución probabilística más adecuada.
- Análisis de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, utilización y costos de ineficiencia para equipos, subsistemas y sistemas.
- Análisis de inversiones.
- LCC.
- Reemplazo de equipos y subsistemas (análisis de redundancia).
- Definición de políticas de mantenimiento.
- Indicadores de gestión.
- Análisis de modo de falla de componentes críticos.
- Gestión de repuestos para componentes
- Exportación de reportes (html) y archivos .csv.

7. REPRESENTACIÓN DE CONFIGURACIÓN LÓGICA FUNCIONAL DE PLANTA DE REFINERÍA DE COBRE (Software RMES®)

El software RMES® [8] permite modelar instalaciones industriales y flotas de equipos, a través de diagramas de bloques de confiabilidad (RBD por su sigla en inglés) que representan de manera fiel la seguridad del funcionamiento de los subsistemas productivos.

Se incluyen configuraciones predeterminadas para equipos en serie, paralelo, stand-by, fraccionamiento y redundancia parcial que permiten diagramar de manera lógica-funcional todo proceso productivo en sus distintos niveles (equipos, subsistemas y componentes).

7.1 SUPUESTOS UTILIZADOS EN LA DIAGRAMACIÓN LÓGICO FUNCIONAL

Para diagramar la planta, se define que el límite de batería a considerar; inicia en las máquinas preparadoras de ánodos y finaliza con los circuitos de electrorefinación. Al analizar la planta, se determina que esta se compone por 3 subsistemas, expuestos a continuación:

- Máquinas de lavado y preparación
- Líneas de transferencia y grúas
- Circuitos de electrorefinación

7.2 DIAGRAMA LÓGICO FUNCIONAL PROPUESTO

7.2.1 MÁQUINAS DE LAVADO Y PREPARACIÓN

El conjunto de maquinarias de preparación y lavado se divide en tres grupos. El primer grupo es la de cuatro máquinas de lavado y desprendimiento de cátodos, las que tienen la capacidad de soportar el 33,33% de la carga cada una y se encuentran fraccionadas.

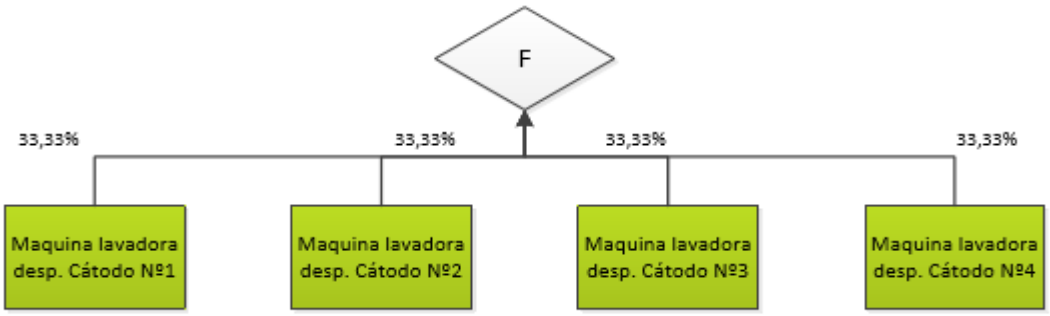


Figura 9. Configuración lógica – funcional Máquinas de lavado despegadora cátodos.

El segundo grupo está constituido por 3 máquinas preparadoras de ánodos fraccionadas donde cada una puede hacerse responsable del 50% de la carga.

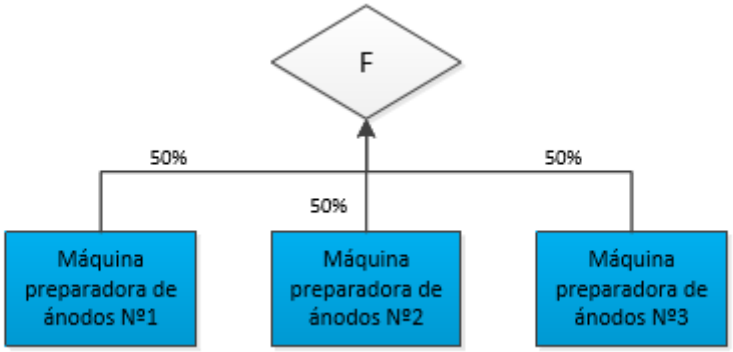


Figura 10. Configuración lógica-funcional Máquinas preparadoras de ánodos.

Finalmente el tercer grupo es conformado por dos máquinas lavadoras de SCRAP. Estas lavadoras tienen la capacidad de llevar el 70% de la carga y en caso de falla de una, el sistema se limita en un 30%.

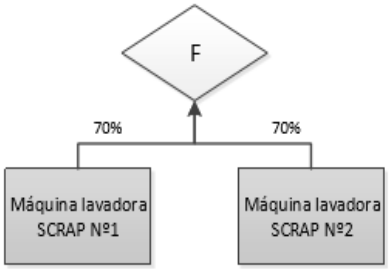


Figura 11. Configuración lógica-funcional Máquinas lavadoras Scrap.

Cabe mencionar que en caso de que fallen las máquinas preparadoras de ánodos, existe un tiempo en el cual el sistema puede funcionar sin verse afectado, esta misma situación ocurre con las máquinas lavadoras de SCRAP. Para representar este comportamiento se utiliza una configuración en Stockpile ficticia que apoya a estos equipos, de manera de generar un buffer de tiempo, este buffer corresponde a dos horas de funcionamiento, durante este tiempo el sistema no se ve afectado. Adicionalmente es importante mencionar que las preparadoras de ánodos y las lavadoras de SCRAP se encuentran en línea, y a su vez dicho sistema está diagramado en fraccionamiento con el buffer mencionado quedando cada uno con 100% de la carga, quedando demostrado que si falla la línea de máquinas el buffer puede sopesarlo, lo anterior se puede apreciar de mejor manera en el Anexo 1.

7.2.2 LÍNEAS DE TRANSFERENCIA Y GRÚAS

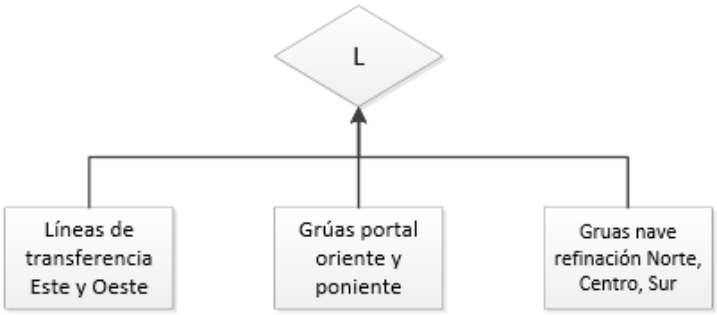


Figura 12. Configuración lógica-funcional Líneas de transferencias y grúas.

Al igual que la sección anterior se constituyen tres grupos de activos físicos en línea. El primero refiere a las líneas de transferencia este y oeste. Esta línea contiene seis carros autónomos los cuales en caso de falla de uno de ellos se pierde un 16,67% de la capacidad. Junto a estos se poseen dos líneas de transporte fraccionadas entre sí con un 50% de la responsabilidad cada una. Estas líneas poseen carros de transferencia simples y dobles que como su nombre indica, los carros dobles poseen el doble de capacidad y están compuestos por un carro maestro y uno esclavo. En la configuración propuesta no se consideran los carros simples debido a que su funcionamiento no aporta en una mayor producción de la refinería y no sirven como reemplazo de los dobles.

En caso de falla de un carro maestro, este puede ser reemplazado por el carro maestro simple de manera que no se pierda funcionalidad, este cambio no puede ser representado como una redundancia o un equipo en reserva debido al tiempo que involucra el reemplazo es considerable. Para este caso ante cambios se propone una modificación del DLF actual según requerimientos.

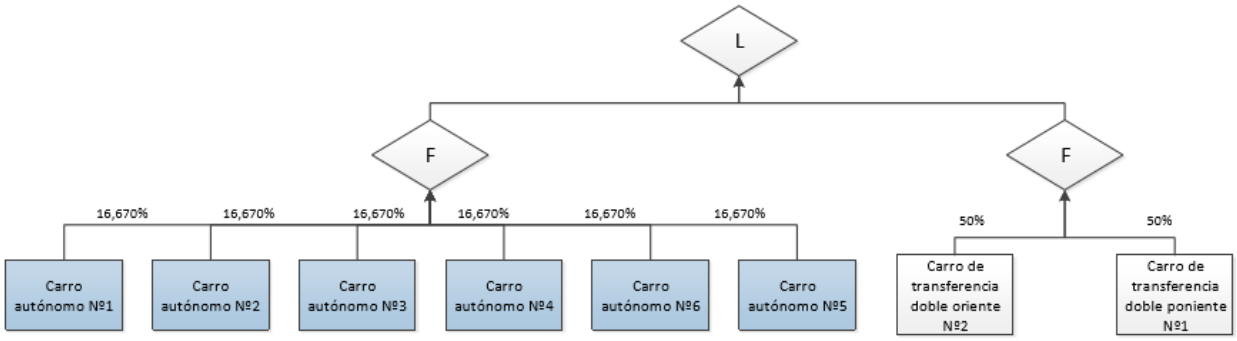


Figura 13. Configuración lógica-funcional Líneas de transferencias Este y Oeste.

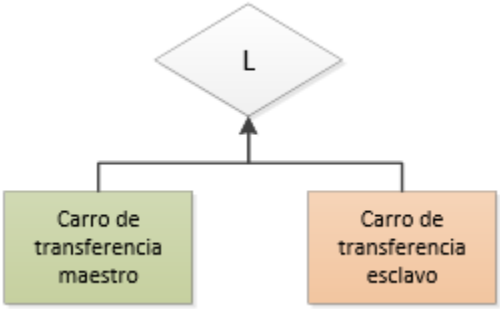


Figura 14. Configuración lógica-funcional Carros de transferencia dobles.

Respecto a las grúas, existen dos tipos: las grúas portal y grúas nave. Las grúas portal actúan en paralelo, dado que cada una es suficiente para asegurar el funcionamiento del sistema, además que corresponden a dos equipos de igual característica.

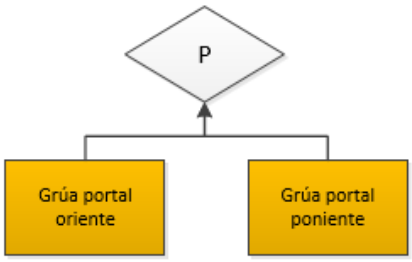


Figura 16. Configuración lógica-funcional Grúas portal Oriente y Poniente.

En cambio las grúas nave poseen distintas capacidades. Las grúas norte y centro pueden sostener el 50% de la carga, mientras que la sur solo el 16%.

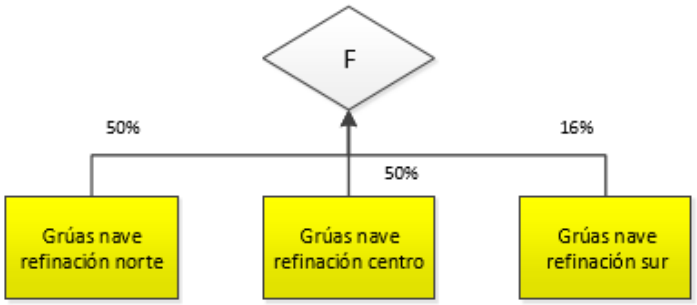


Figura 15. Configuración lógica-funcional Grúas nave refinación Norte, Centro, Sur.

7.2.3 CIRCUITOS DE ELECTROREFINACIÓN

En este grupo se contiene a los circuitos de electrorefinación 11, 12, 13, 14 y 19 y son una de las fases importante de la planta de refinación. Donde el circuito 19 está en reserva y se utiliza en caso de falla de uno de los anteriores. Esto conforma un sistema fraccionado donde los circuitos 12 a 14 tienen mayor capacidad y pueden aguantar hasta un 28% de la carga, en cambio los circuitos 19 y 11 solo mantiene un 16% cada una.

Cabe destacar que existe un proyecto interno que aumentará la capacidad productiva de la planta, en este caso el fraccionamiento debe cambiar de manera que la suma total sea de un 100%. En el diagrama adjunto se representa esta situación.

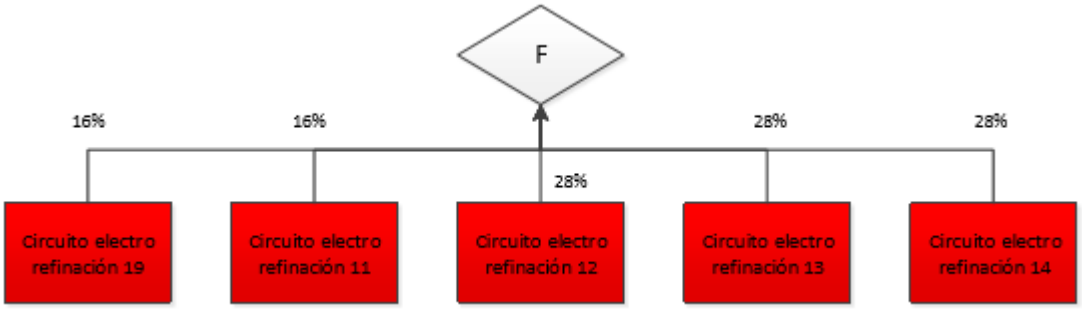


Figura 17. Configuración lógica-funcional Circuitos de electrorefinación.

7.2.4 PLANTA COMPLETA

Finalmente, la planta completa de refinería se define por los tres conjuntos descritos, el funcionamiento de cada uno de ellos es dependiente entre sí, de manera que la falla de cualquiera de los grupos implica la detención de la planta. En resumen el área se constituye de la siguiente forma.

Figura 18. Configuración lógica-funcional general Planta de Refinería.

Se destaca que para cada uno de los equipos diagramados, se agregó un nivel adicional de información, integrando los componentes de cada equipo en línea.

Estos componentes no se muestran en los diagramas, pero se encuentran en los archivos RMES. Por otro lado el diagrama de la planta completa de halla en el Anexo 1.

8. ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD, CONFIABILIDAD Y MANTENIBILIDAD.

A partir de los registros históricos de detenciones de la Planta de Refinería correspondiente a Chuquicamata, para el período Enero-Marzo 2016, se obtienen los siguientes resultados.

8.1 DISPONIBILIDAD PLANTA COMPLETA

Al evaluar la planta de refinería en el software mencionado, se obtienen los siguientes resultados. Cabe mencionar que la métrica de evaluación será semanal debido a que solo se considerará un período de tres meses.

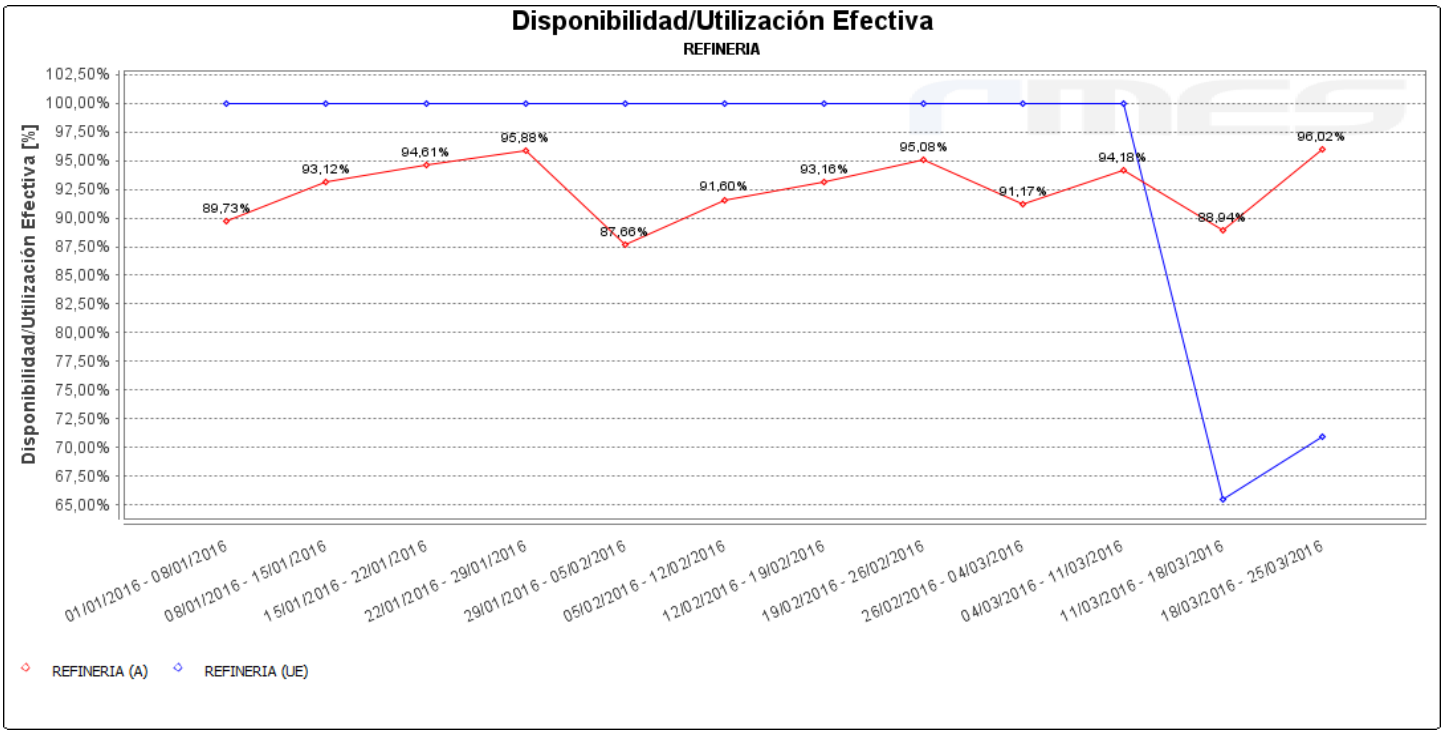


Figura 19. Disponibilidad de Refinería

Como se observa en la figura 19, la disponibilidad de la planta en bastante uniforme durante el período que se está evaluando, a excepción de ciertas semanas que baja a un porcentaje menor del 90%, debido a esto se estudiarán los equipos o componentes que más afectan la disponibilidad de la planta total.

Para poder obtener el resultado anterior se calcula la disponibilidad acumulada a las principales líneas que corresponden a salas de máquinas, líneas de transferencia y grúas y circuitos de electrorefinación.

REFINERIA	93%
GRUAS PORTAL y CANCHAS COBRE	100%
SALA MÁQUINAS	93%
CARRIERS	99%
LINEA NORTE	97%
CIRCUITOS LADO NORTE	99%
LINEA CENTRO	99%
CIRCUITOS LADO CENTRO	100%
LINEA SUR	98%
CIRCUITO N°19	99%

Tabla 1. Disponibilidad Acumulada.

Al analizar la tabla 1, se observar que la sección "sala de máquinas" es la que incide más sobre la disponibilidad total de la planta, por lo que se centrará en encontrar cuál o cuáles son las máquinas que más afectan dicho indicador.

SALA MÁQUINAS	93%
MÁQUINAS LAVADORAS SCRAP	96%
MÁQUINAS PREPARADORAS DE ÁNODOS	97%
MÁQUINAS DESPEGADORAS DE CÁTODOS	93%

Tabla 2. Disponibilidad Acumulada Máquinas.

La tabla 2 muestra la disponibilidad acumulada de las principales máquinas del proceso, se puede visualizar que las máquinas despegadoras de cátodos son las que más afectan la disponibilidad de la sección “sala de máquinas”, Además como se conoce el diagrama lógico funcional de la planta, al estar en fraccionamiento la línea de máquinas compuesta por las máquinas lavadoras de Scrap y las máquinas preparadora de ánodos con el buffer, no influyen de una manera tan notoria como lo causan las máquinas despegadoras de cátodos que se encuentran en línea directamente con el subsistema anterior. En consecuencia las máquinas despegadoras de cátodos son las más críticas en términos de la disponibilidad que poseen, por lo que los siguientes incisos se centrarán en el estudio de éstas máquinas.

8.1.1 DISPONIBILIDAD MÁQUINAS DESPEGADORAS DE CÁTODOS

Dado lo anteriormente mencionado se realizará un estudio más detallado para éstas máquinas, comenzando por su disponibilidad, la que se presenta en la siguiente tabla, dejando en claro la influencia que tienen sobre la planta completa.

MÁQUINAS DESPEGADORAS DE CÁTODOS	93,21%
MDC1	79,92%
MDC2	80,21%
MDC3	82,24%
MDC4	85,66%

Tabla 3. Disponibilidad Acumulada Máquinas Despegadoras de Cátodos.

Para un mejor análisis se mostrarán las disponibilidades durante los períodos a evaluar para cada una de las máquinas mencionadas. Los períodos son los siguientes.

Periodo 1: 01/01/2016 - 08/01/2016

Periodo 2: 08/01/2016 - 15/01/2016

Período 3: 15/01/2016 – 22/01/2016

Período 4: 22/01/2016 – 29/01/2016

Período 5: 29/01/2016 – 05/02/2016

Período 6: 05/02/2016 – 12/02/2016

Período 7: 12/02/2016 – 19/02/2016

Período 8: 19/02/2016 – 26/02/2016

Período 9: 26/02/2016 – 04/03/2016

Período 10: 04/03/2016 – 11/03/2016

Período 11: 11/03/2016 – 18/03/2016

Período 12: 18/03/2016 – 25/03/2016

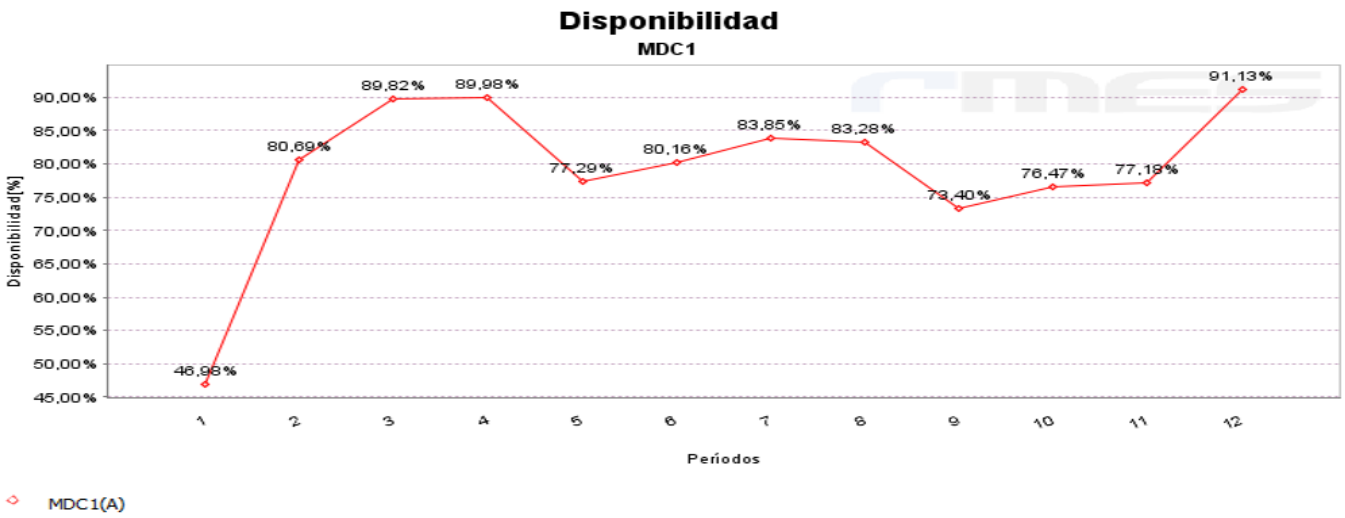


Figura 20. Gráfico Disponibilidad Máquina Despegadora de Cátodos N°1.

Se observa una disponibilidad bastante baja durante el período 1 de 46,98%, además durante los períodos 5, 9, 10 y 11 existe una disponibilidad menor de 80%. Cabe mencionar que las máquinas despegadoras son de suma importancia debido a que de éstas se obtiene el producto final correspondiente a los cátodos de cobre, por lo que se espera que la disponibilidad sea bastante alta. Una baja disponibilidad se traduce en costos de no producción que se explicarán en capítulos posteriores.

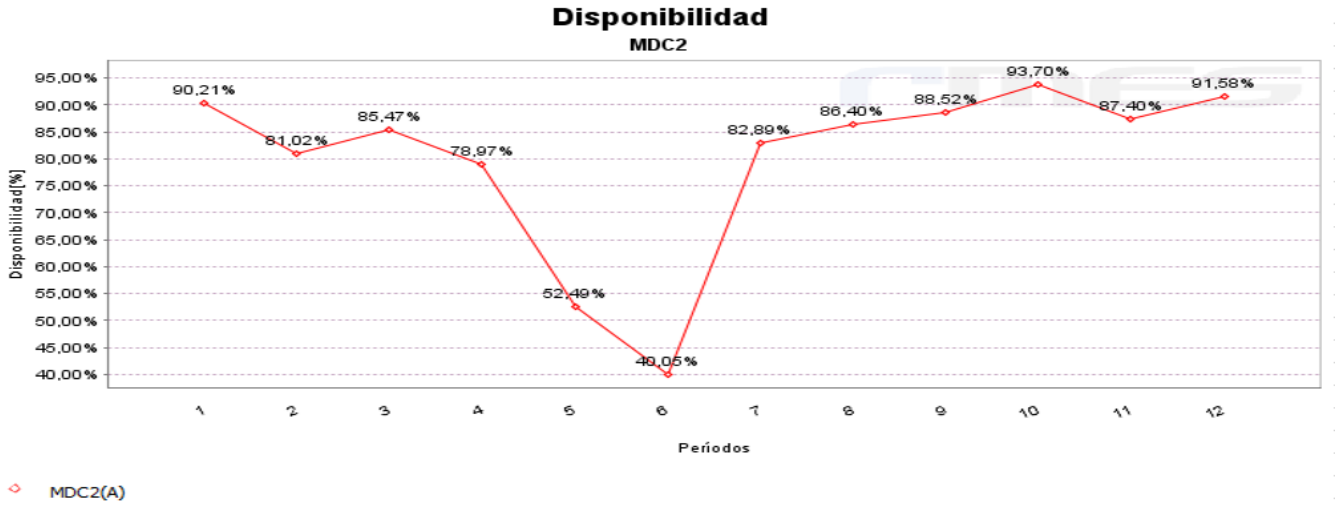


Figura 21. Gráfico Disponibilidad Máquina Despegadora de Cátodos N°2.

Al igual que la despegadora anterior se visualiza una disponibilidad bastante baja como se puede observar en la figura 21, específicamente en el período 6 con 40,05%.

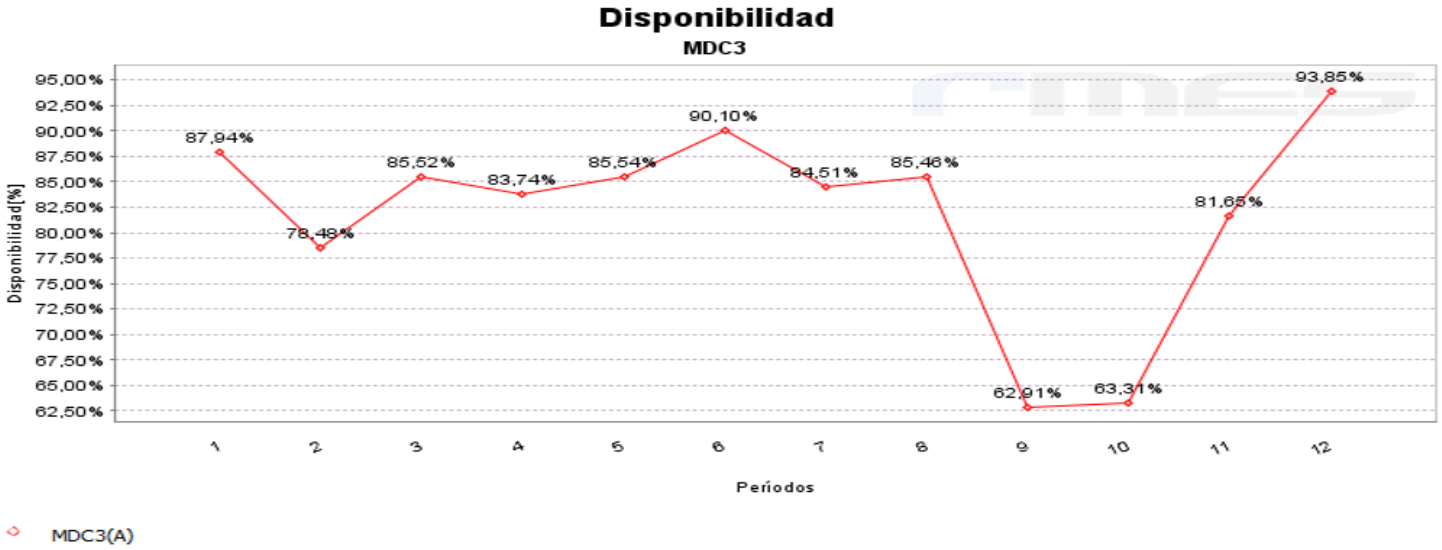


Figura 22. Gráfico Disponibilidad Máquina Despegadora de Cátodos N°3.

En la figura 22, se ve un leve mejoramiento en la disponibilidad, pero a pesar de esto sigue siendo baja para los estándares que se desean.

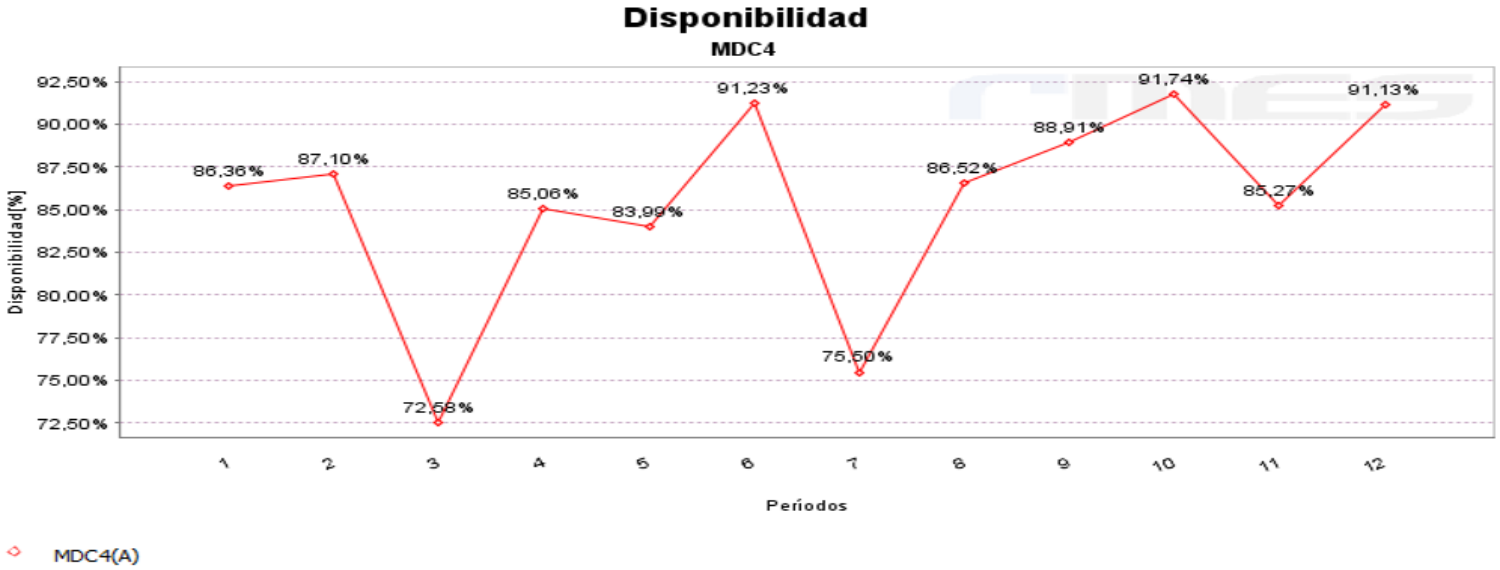


Figura 23. Gráfico Disponibilidad Máquina Despegadora de Cátodos N°4.

La última máquina despegadora de cátodos presenta una disponibilidad mejor que las otras tres presentadas, pero igual amerita de estudio dado que en algunos períodos presenta porcentajes menores al 80%.

8.2 MTBF Y MTTR

Primero que todo hay que mencionar que son dos KPI importantes en el mantenimiento de una planta industrial.

Es por ello que para analizar la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos, se estudiarán el tiempo medio entre falla y el tiempo medio de reparación, ya que entregan resultados bastante cercanos a los esperados.

Para estudiar dichos indicadores se presentará para cada máquina despegadora de cátodos una tabla con los valores de cada indicador, haciendo hincapié en el MTTR, que se espera que sea el indicador a mejorar.

Por otro lado cabe mencionar que un MTBF bajo se considera negativo, ya que significa que el equipo falla constantemente y un MTTR alto también, por lo que se debe considerar para estudio, debido a que indica que el equipo tarda mucho tiempo en ser reparado, lo que se traduce en que no se encuentra disponible para la producción

8.2.1 MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS N°1

	MDC1_MTBF	MDC1_MTTR
Total	7,06	1,21
Periodo 1	26,31	2,80
Periodo 2	6,46	0,93
Periodo 3	15,09	1,51
Periodo 4	10,79	0,92
Periodo 5	3,93	0,82
Periodo 6	6,12	0,94
Periodo 7	4,86	0,87
Periodo 8	5,38	0,91
Periodo 9	5,87	1,87
Periodo 10	7,56	2,27
Periodo 11	5,66	1,86
Periodo 12	9,34	0,95

Tabla 4. MTBF y MTTR de la Máquina Despegadora de Cátodos N°1.

Como se puede apreciar en la tabla 4, durante los períodos 5 y 7 el tiempo medio entre falla es menor a 5 horas, esto quiere decir que el equipo fallará recurrentemente. Al analizar los tiempos medios de reparación (MTTR) son bastante bajos pero durante los períodos 1 y 10 el tiempo de reparación es mayor a 2,5.

Debido a que el equipo presenta diferentes valores para ambos indicadores durante los períodos, se considerará para el estudio un valor único calculado a lo largo de todo el período, llamado “Total”, para ambos indicadores.

Para calcular el tiempo total que la máquina está indisponible, lo que significa tiempo no disponible del equipo, se multiplica la cantidad de fallas por el tiempo que toma reparar una falla.

	n	MTTR	MTTR x n
MDC1	223	1,2049	268,6927

Tabla 5. Cantidad de horas en reparación MDC1.

Donde;

n: Cantidad de fallas

MTTR: Tiempo medio de reparación

MTTR x n: Cantidad de horas que estuvo la máquina siendo reparada.

8.2.2 MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS N°2

	MDC2_MTBF	MDC2_MTTR
Acumulado	7,25	1,06
Periodo 1	8,42	0,57
Periodo 2	6,18	0,93
Periodo 3	7,17	1
Periodo 4	5,76	1,25
Periodo 5	7,34	1,63
Periodo 6	3,73	2,52
Periodo 7	4,64	0,94
Periodo 8	6,04	0,73
Periodo 9	8,74	0,78
Periodo 10	15,74	0,68
Periodo 11	14,01	0,67
Periodo 12	12,86	0,91

Tabla 6. MTBF y MTTR de la Máquina Despegadora de Cátodos N°2.

Se puede ver una mejora en comparación con la MDC1 en ambos indicadores, ya que se aprecia un aumento de MTBF y una disminución del MTTR. Pero a pesar de disminuir el MTTR, éste se puede mejorar un cierto porcentaje más para que sea menor a una hora.

	n	MTTR	MTTR x n
MDC2	221	1,0551	233,1661

Tabla 7. Cantidad de horas en reparación MDC2.

La máquina despegadora 2 sigue teniendo un gran número de fallas dentro del período en evaluación, un total 22, por lo que al multiplicar dicho número por el MTTR se obtiene el total de horas que la máquina no se encuentra disponible, en este caso corresponde a aproximadamente 233 horas.

8.2.3 MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS N°3

	MDC3_MTBF	MDC3_MTTR
Acumulado	6,15	0,80
Periodo 1	7,03	0,77
Periodo 2	5,27	0,74
Periodo 3	6,24	0,74
Periodo 4	5,62	0,90
Periodo 5	6,24	0,76
Periodo 6	7,20	0,63
Periodo 7	4,05	0,62
Periodo 8	4,78	0,71
Periodo 9	7,54	0,73
Periodo 10	5,90	1,48
Periodo 11	8,38	0,80
Periodo 12	17,67	1,13

Tabla 8. MTBF y MTTR de la Máquina Despegadora de Cátodos N°3.

Al tomar en cuenta los datos que se obtuvieron de la máquina despegadora de cátodos número 3, hay una mejora en el MTTR bajando dicho tiempo a 0,8 horas.

	n	MTTR	MTTR x n
MDC3	250	0,7994	199,8525

Tabla 9. Cantidad de horas en reparación MDC3.

A pesar de que el MTBF disminuye (como se muestre en la tabla 8), lo que implica que la MDC3 presenta más fallas que las dos máquinas anteriores, el tiempo que se encuentra fuera

de producción es menor, esto debido a que su MTTR es considerablemente menor que las máquinas anteriores.

8.2.4 MÁQUINA DESPEGADORA DE CÁTODOS N°4

	MDC4_MTBF	MDC4_MTTR
Acumulado	6,45	0,79
Periodo 1	5,57	0,68
Periodo 2	9,14	1,23
Periodo 3	4,87	0,85
Periodo 4	4,46	0,60
Periodo 5	6,71	1,06
Periodo 6	6,96	0,53
Periodo 7	6,67	0,85
Periodo 8	5,01	0,55
Periodo 9	8,29	0,75
Periodo 10	11,85	0,69
Periodo 11	5,47	1,40
Periodo 12	7,45	0,85

Tabla 10. MTBF y MTTR de la Máquina Despegadora de Cátodos N°4.

	n	MTTR	MTTR x n
MDC4	253	0,7986	202,0531

Tabla 11. Cantidad de horas en reparación MDC4.

La situación que ocurre en la máquina despegadora de cátodos número 4 es similar a la número 3, solo que dicha máquina tiene más fallas, dado que su MTBF es un poco menor por lo que se encuentra fuera de producción más horas que la máquina 3 pero menos que las dos anteriores.

9. COSTO DE LA FALTA

Se estimó una facturación anual de 34.400.000 US$, un Impacto de los Costos Variables igual a 30% y un total de 8.760 horas de operación anual, ya que se opera las 24 horas del día los 365 días del año. Con estos datos se determina el Costo de la Falta horario, que asciende a los 2.748[US$/Hr]. Cabe mencionar que el costo de la falta se calcula de la siguiente manera.

$$Cf = \frac{(1 - \%\mathrm{Cv}) * \mathrm{FA}}{\text{Horas de Operación}}$$

Donde;

Cf: Costo de la falta
Cv: Costos variables
FA: Facturación anual

A continuación se presentan un gráfico que resumen la información del análisis de Costo de la Falta para la planta en estudio.

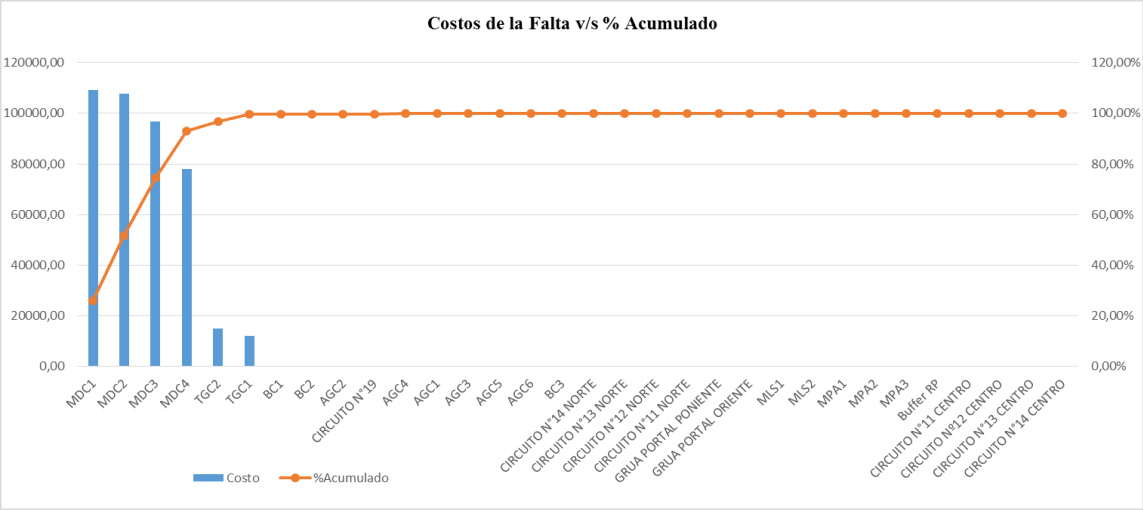


Figura 24. Gráfico Costo de la Falta vs %Acumulado.

De la figura 24, se puede apreciar que los tres primeros equipos explican el 80% de los Costos de la Falta de la Planta, siendo la máquina despegadora de cátodos 1 (MDC1) la que presenta el mayor porcentaje (26%).

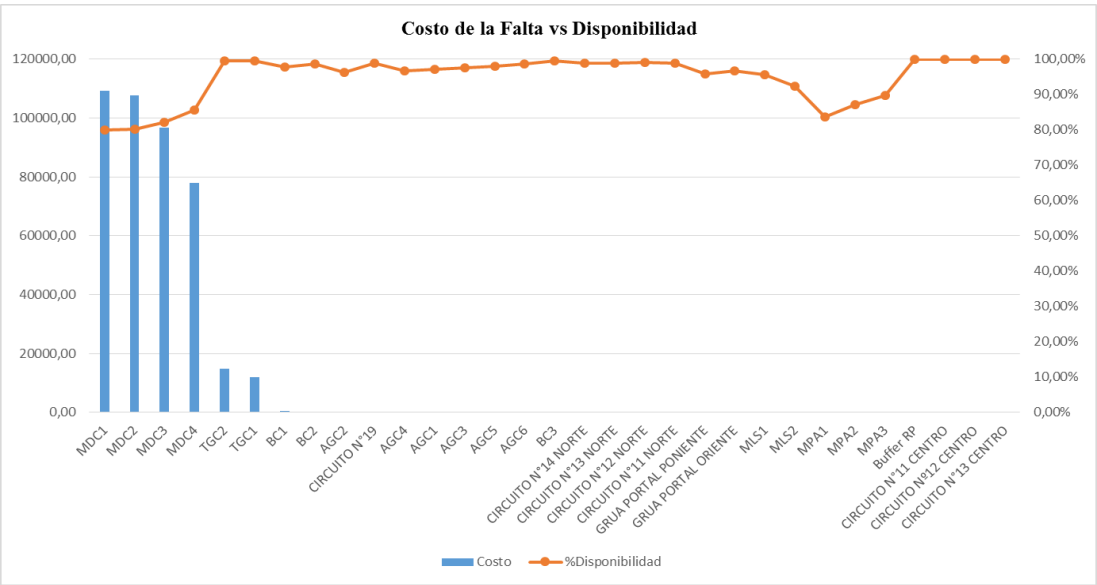


Figura 25. Gráfico Costo de la Falta vs Disponibilidad.

Del gráfico es posible observar, el comportamiento de los equipos de la planta en función de los Costos de la Falta y la Disponibilidad. Tomando como ejemplo la situación de las máquinas despegadora de cátodos 1 (MDC1) y la máquina despegadora de cátodos 2 (MDC2), se puede decir que para el período Enero-Marzo de 2016, la máquina despegadora de cátodos 1 generó Costos de la Falta por 109.322 US$ y tuvo una disponibilidad del 79,92%. Por su parte la máquina despegadora de cátodos 2 generó Costos de la Falta por 107.727 US$ y tuvo una disponibilidad del 80,21%.

Al revisar la configuración lógico-funcional de los equipos, es posible percatarse que ambas máquinas son parte de un sistema Fraccionado de cuatro máquinas cada una con una carga de 33.33% por cuanto toda detención del equipo representa una detención parcial del 33,33%.

10. DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS DE MEJORA

Para definir algunas estrategias que mejoren la disponibilidad de la planta de Refinería, se considerará solamente la máquina despegadora de cátodos 1 (MDC1), debido a que es la más crítica dentro de las máquinas estudiadas. Para ello se analizarán ciertos indicadores de los componentes que pertenecen a la MDC1, a continuación se presenta una tabla con los valores de disponibilidad y MTTR de los componentes.

COMPONENTE	DISPONIBILIDAD	MTTR
ESTACIÓN DE ENZUNCHADO MDC1	91,62%	1,98
RACK Y RIELES ALMACENAMIENTO DE BLANKS MDC1	99,70%	0,25
ESTACIÓN RECHAZO DE BLANK MDC1	99,58%	0,62
TRANSPORTADOR ESPACIADOR DE BLANK MDC1	100,00%	0,00
TRANSFERENCIA DE 45° MDC1	99,05%	1,14
CARRO TRANSFERENCIA DE BLANK MDC1	100,00%	0,00
APILADO DE TRES PAQUETES MDC1	99,99%	0,08
APILADO DE CÁTODOS MDC1	99,81%	0,45
CARRUSEL MDC1	98,90%	0,79
CATODOSCOPIO MDC1	99,99%	0,17
CARGADOR DE CARRUSEL MDC1	97,20%	1,22
CÁMARA DE LAVADO DE CÁTODOS MDC1	99,55%	1,06
ESTACION DE DESPEGUE MDC1	99,43%	0,80
ESTACIÓN DE PLIEGUE Y DESCARGA MDC1	96,69%	1,10
PRENSA DE REMACHADO DE CÁTODOS MDC1	100,00%	0,00
ESTACION DE SEPARACION MDC1	99,72%	0,75
ESTACIÓN DE ETIQUETADO MDC1	99,41%	0,40
MESA GIRATORIA ENZUNCHADO MDC1	100,00%	0,00
PRENSA DE CORRUGADO MDC1	99,97%	0,50
RACK Y RIELES ALMACENAMIENTO DE CÁTODOS MDC1	100,00%	0,00
ESTACIÓN RECHAZO DE CÁTODOS MDC1	100,00%	0,00
TRANSPORTADOR DE LAVADO DE CÁTODOS MDC1	99,94%	0,25
TRANSPORTADOR ALMACENAMIENTO DE PAQUETES MDC1	99,98%	0,25
TRANSPORTADOR ELEVADOR DE CÁTODOS MDC1	99,95%	0,45
CARRO TRANSFERENCIA DE CÁTODOS MDC1	99,45%	0,96

ESTACION MUESTREO MDC1	99,57%	0,44
INTERCAMBIADOR MDC1	99,93%	0,66
MESA MULTIUSO MDC1	99,64%	0,00
COMUNICACION MDC1	100,00%	0,00
CONTROL MDC1	97,73%	0,21
ELECTRICO MDC1	99,26%	1,00
SISTEMA REFRIGERACIÓN DE ACEITE MDC1	100,00%	0,00
TRANSPORTADOR SALIDA DE PAQUETES MDC1	99,96%	0,25
UNIDAD DE POTENCIA HIDRAULICA MDC1	98,03%	0,50

Tabla 12. Disponibilidad y MTTR componentes de MDC1.

De la tabla 12, se puede apreciar que el componente más crítico corresponde a la estación de enzunchado con una disponibilidad del 91,62% y un MTTR de 1,98 horas.

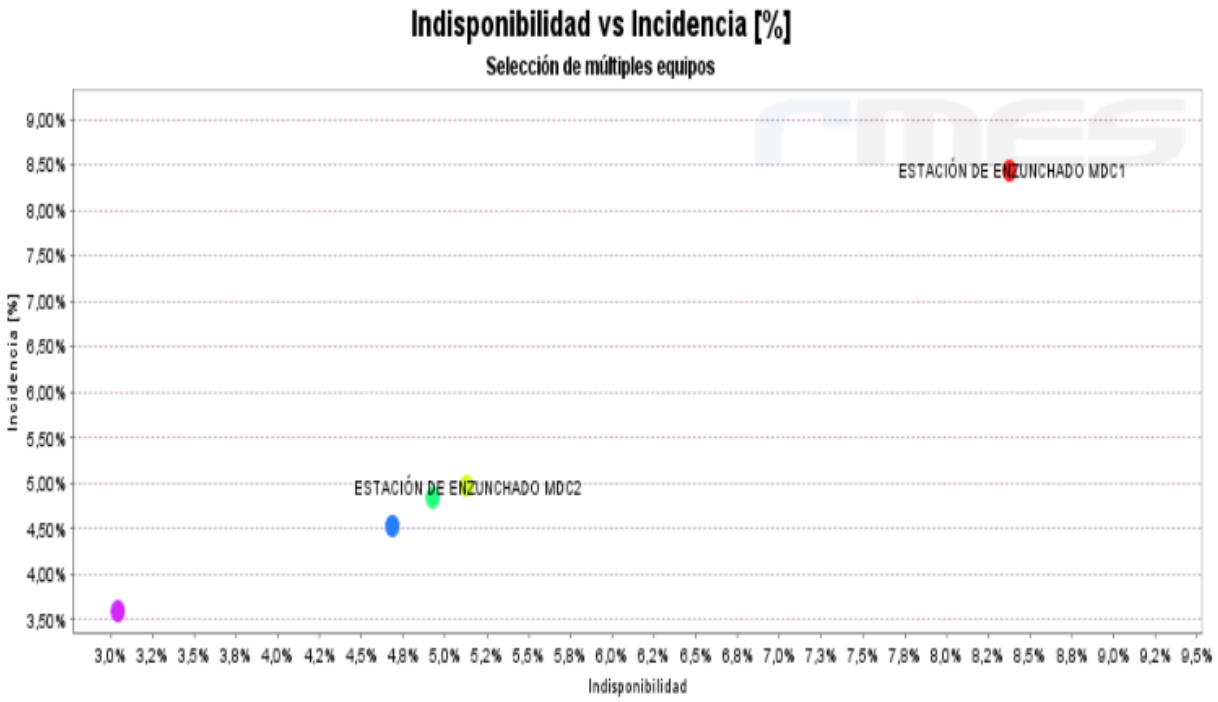


Figura 26. Gráfico Indisponibilidad vs Incidencia

Lo anterior se puede corroborar en la Figura 26, ya que como se explica en el gráfico el componente más crítico corresponde a la estación de enzunchado MDC1, esto se debe a que su indisponibilidad, es decir que el componente no está funcionando, tiene un alto porcentaje de incidencia sobre la planta completa.

10.1 MEJORA EN TÉRMINOS DE PROYECTO

Dentro de las alternativas existentes en el ámbito de proyecto, la redundancia es el principal método para aumentar la confiabilidad y se define como la existencia de más de un medio para realizar una determinada función [9].

La redundancia puede implicar el uso de dos o más componentes, de forma que cuando uno falla hay otros que realizan la función.

Existen dos tipos de estrategias de redundancia [10].

- Redundancia Activa
- Stand by

Muchos sistemas usan este tipo de estrategias para lograr un aumento en su confiabilidad.

En el caso de Refinería, al estudiar el proceso, específicamente él que se lleva a cabo en las máquinas despegadora de cátodos. Se sabe que luego de despegar los cátodos de los cátodos permanentes estos son trasladados hacia el apilamiento de cátodos, proceso que continúa hasta que se ha acumulado una pila completa de cobre catódico; formando un paquete, siendo éste trasladado hasta la correa transportadora de almacenamiento de paquetes, así hasta que

se va acumulando una cierta cantidad de paquetes que luego pasan por la máquina enzunchadora que va ubicada en la misma correa.

Una vez que ha terminado el enzunchado, que corresponde al aseguramiento y reforzado de los paquetes de cátodos, éste se hace descender de vuelta sobre la correa transportadora de almacenamiento de paquetes y se traslada hacia la estación de pesaje [11]. Como bien se mencionó la estación de enzunchado es la más crítica dentro de los componentes de la máquina despegadora, es por esto que se propone realizar una mejora en términos de redundancia, colocando una estación enzunchadora que funcione en conjunto con la existente con el fin de sopesar las fallas actuales.

Este nuevo subsistema de componentes tendrá una configuración lógica de redundancia activa 2:1, es decir que se requiere de una o dos máquina para que funcione el sistema.

Para poder realizar esta acción se debe agregar una correa paralela a la correa transportadora de almacenamiento, en la cual también serán depositados los paquetes de cátodos provenientes de la estación de apilamiento. Ambas enzunchadoras se conectarán a la correa que alimentará la estación de pesaje. A continuación se muestra el diagrama del caso actual y el caso propuesto de mejora.

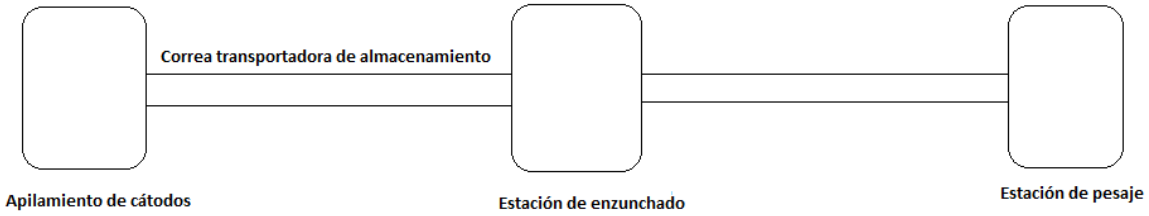


Figura 27. Caso actual de funcionamiento.

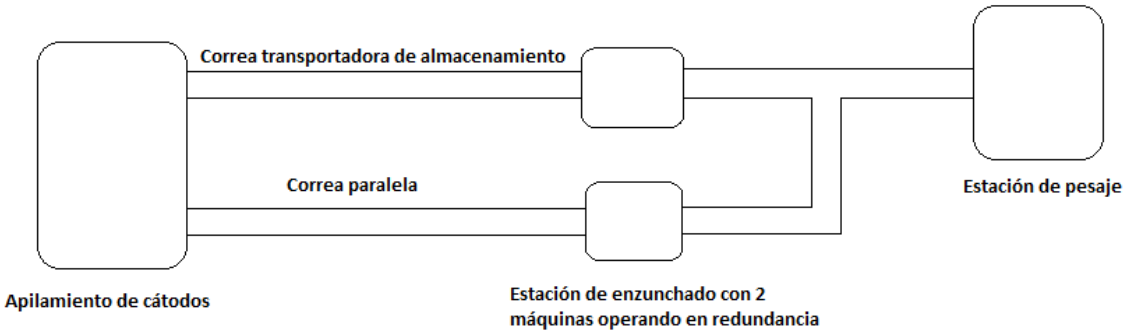


Figura 28. Caso propuesto de mejora.

Con este tipo de mejora se evita que al fallar la estación de enzunchado se deba parar la producción, dado que existirá otra máquina que pueda operar cuando la actual falle o viceversa logrando así que disminuya el porcentaje de indisponibilidad. Por otro lado es importante recalcar que es solo un análisis cualitativo.

10.2 MEJORA EN TÉRMINOS DE GESTIÓN

Al decir mejora en términos de la gestión se refiere a realizar acciones que mejoren la operación actual de la máquina como por ejemplo aumentar el tiempo medio de falla o disminuir el tiempo medio de reparación. En este caso, como bien se sabe la estación de enzunchado es la más crítica dado que su indisponibilidad incide de manera evidente sobre la Planta de Refinería en estudio, esto se debe a que cuando no está disponible se deja de producir los paquetes de cátodos, ya que es una de las últimas etapas antes del producto final.

Dado lo anterior es que se propone disminuir los tiempos medios de reparación de la estación de enzunchado de la máquina despegadora de cátodos 1 en un 40% en otros términos, disminuir el tiempo medio de reparación de 1,98 a 1,19.

Cabe mencionar que esto es posible, dado que al analizar el repositorio de detenciones, la duración de las detenciones ocurridas en la estación de enzunchando son bastante largas.

Todo esto a razón que los costos de ineficiencia, es decir, los costos de no producir de dicha máquina son los más alto; en consecuencia lo que se desea lograr con esta mejora es disminuir los tiempos de indisponibilidad del equipo crítico para lograr un aumento en la producción, lo que se traducirá en una disminución de los costos de ineficiencia.

Para poder lograr lo mencionado, se capacitará a los operarios encargados de reparar estas máquinas, con el fin de tener nuevos conocimientos y reducir los tiempos de respuesta.

Ambas propuestas deben ser evaluadas económicamente para saber cuál es la más convenientes en términos de costo globales, como se mencionó esto quedará a manos de la empresa bajo estudio.

Por otro lado se debe realizar seguimiento a la inversión elegida y analizar si se está consiguiendo los resultados previstos o no.

11. CONCLUSIONES

Como conclusión general al estudio realizado a la Planta de Refinería en torno a la confiabilidad operacional, cabe mencionar que es relevante realizar una buena gestión de activos y análisis de los equipos involucrados con el fin de maximizar la producción, disminuyendo los tiempo muertos y así lograr disminuir los costos de ineficiencia. Además es de suma importancia para poder realizar un buen análisis contar con información de calidad, relativa a las detenciones de los equipos con el objeto de tener datos confiables para realizar correctas propuestas de mejoras.

Por otro lado los resultados obtenidos a partir de los parámetros de confiabilidad y mantenibilidad sirven para dar a conocer los equipos críticos que afectan la operatividad de la instalación, en este caso es relevante señalar que los equipos críticos de la Planta de Refinería corresponden a las máquinas despegadoras de cátodos, siendo los factores esenciales de este resultado la indisponibilidad presentada por ella (MDC1= 20,08% y MDC2=19,79%) y el impacto de una detención de éstas a nivel de sistema, lo cual se traduce en altos costos de ineficiencia (MDC1= 109.322 US$ y MDC2= 107.727 US$).

Dado lo anterior se realizó un análisis de los componentes con los que cuenta la MDC1, dando como resultado que la estación de enzunchado es la más crítica, debido a que ésta se encuentra en línea con los demás componentes, al fallar afecta directamente el funcionamiento de la MDC1.

Respecto al componente crítico identificado, se proponen dos mejoras, las cuales pudieron ser evaluadas en términos técnicos, no obstante se puede deducir que ambas propuestas son útiles para lograr un aumento en la disponibilidad lográndose de esta manera el objetivo principal de este trabajo. La primera propuesta estudiada corresponde a mejorar la fiabilidad, a través de la evaluación de la configuración lógica funcional del equipo para que el impacto de la falla no afecte de forma directa al sistema y pueda ser sopesada por la presencia de un equipo de características iguales; para esto se utiliza la redundancia quedando demostrado que es una buena manera de aumentar la disponibilidad. En cambio la segunda alternativa se centró en mejorar la mantenibilidad, influenciando el conocimiento que posee el personal de mantenimiento, con el fin de mejorar los tiempos medios de reparación, disminuyendo así la indisponibilidad.

La justificación de este análisis es principalmente la de obtener un punto de partida para conocer, de una manera más o menos aproximada, el posible comportamiento de los elementos que componen una planta industrial como es en este caso, una planta de refinería de cobre. Sin embargo, es obvio que a mayor precisión y conocimiento detallado de los sistemas, más pulidos serán los valores considerados en el análisis y más adecuado a la realidad serán los resultados, dando por consiguiente conclusiones más confiables.

12. REFERENCIAS

[1] CODELCO-CHILE, “Memoria Anual 2015”.

[2] www.codelco.com/division-chuquicamata

[3] C. Vargas, G. Cifuentes, J. Simpson, C. Herrera y M. Cifuentes. “*Refinación electrolítica de Scrap anódico particulado*”. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile.

[4] Carlos Cuadra, Jane Standen. (2005) “*Tendencias en la tecnología de electrorefinación del cobre”*.

[5] Arata A. *“Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales”*, 2009.

[6] Asturio Baldin, Luiciano Furlanetto, Antonio Roversi, Francesco Turco. *“Manual de Mantenimiento de Instalaciones Industriales”.*

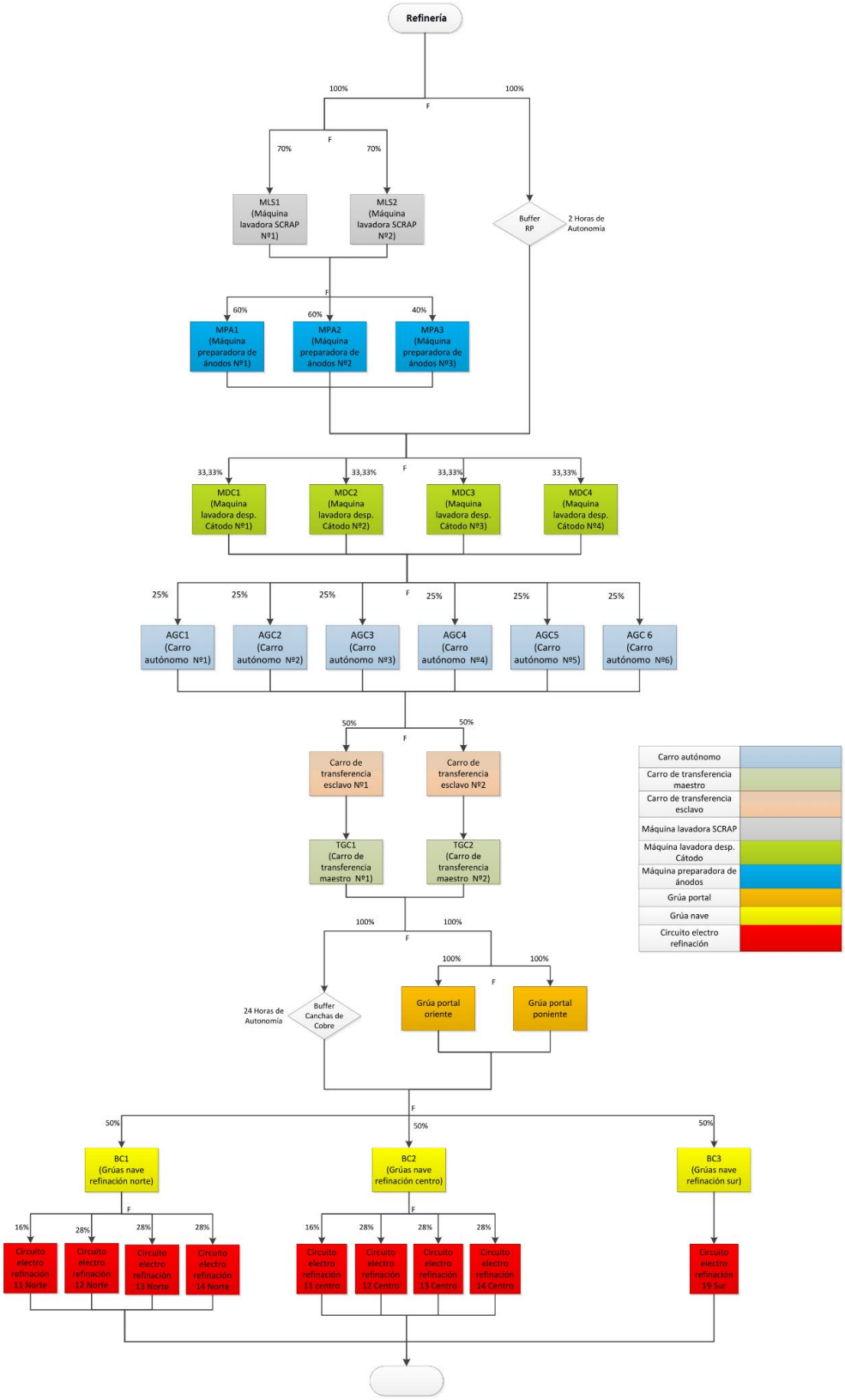
[7] Arata A. *“Ingeniería de la confiabilidad”*, 2013.

[8] www.rmes.cl

[9] Eulalia Griful Ponsati. *“Fiabilidad Industrial”*. 2001.

[10] Jalal Safari. (2012). *“Multi-objective reliability optimization of series-parallel systems with a choice of redundancy strategies”*.

[11] Codelco División Chiquicamata. (2012). “*Fundamentos de control de calidad de cosecha de cátodos”.* Módulo de aprendizaje para el participante.

ANEXOS

ANEXO 1. DIAGRAMA PLANTA COMPLETA