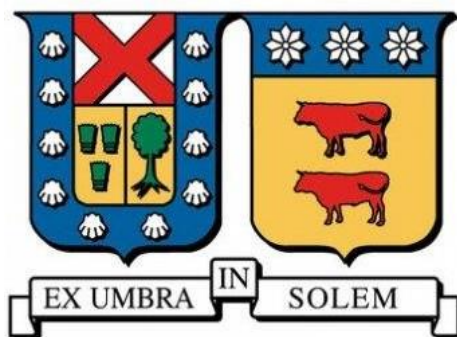




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL MANTENIMIENTO PARA EL
HORNO ROTATORIO N°9 DE CEMENTOS MELÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE
MODO DE FALLA, CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD PARA IMPULSAR LA
PRODUCTIVIDAD ANUAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR
NELSON ANDRÉS GALDAMES MUÑOZ

PROFESOR GUÍA
SR. FREDY KRISTJANPOLLER R.

VALPARAÍSO, 01 DE NOVIEMBRE, 2023

“A Dios por acompañarme toda la vida y en este proceso de creer que se puede a pesar de las dificultades que puedan existir, a mi esposa Yesica Sanhuesa por su incondicional apoyo, a mis hijas por darme fuerzas con su infancia y empujar a darles un mejor futuro, a mis padres que me enseñaron de niño el valor de la vida ,a cada profesor que me guió por la senda del conocimiento, a mis amigos para tener un momento de distracción y compañeros que nos mantuvimos firmes con esta carrera hasta el final y también a la compañía que me entregó la oportunidad de crecer y aportar con un grano de arena a sus problemáticas actuales, solo finalizar para que el que tome esta memoria sea de ayuda en resolver y dar soluciones a los problemas del futuro. Éxito”

1 Resumen

El desarrollo de esta tesis permite proponer un plan de mejoramiento al modelo de mantenimiento de Cementos Melón Planta La Calera de la línea de producción de clinker nacional por medio de técnicas relacionadas a modos de falla, funciones de confiabilidad y disponibilidad con la finalidad de facilitar el cumplimiento del indicador de producción anual.

Este objetivo considera tres etapas las cuales permite proponer al plan de mejoramiento :

1.- Análisis de datos de tiempo de funcionamiento y reparación del Horno N°9: El análisis revela antes de la depuración bajos tiempos de funcionamiento, lo que indica reparaciones “anidadas”. Se recomienda fortalecer el área de mantenimiento estableciendo parámetros claros de entrega de equipos post mantenimiento y/o reparación, así como también ajustar la lógica del Sistema de Gestión de Paro para identificar un criterio de funcionamiento de al menos 12 horas.

Respecto del horizonte anual analizado (01 de enero del 2016 al 31 de julio del 2023) se logra identificar por medio de la metodología Pareto un total de 4 equipos que representan 5.072 horas de reparación y que se concentran en Horno, enfriadera, ciclón 54, Variador de frecuencia de ventilador principal y ventilador principal, por lo que es recomendable tener un régimen de mantenimiento especial de estos equipos tanto para el año como para la campaña a desarrollar de funcionamiento del horno.

Respecto del horizonte por campaña analizado (19 de junio del 2015 al 31 de julio del 2023) es posible identificar a través de los resultados un régimen de mantenimiento mayor cada 12 meses con la finalidad de asegurar el ciclo futuro de funcionamiento en lo que respecta a cambio de ladrillos refractarios y otros equipos que afectan a la disponibilidad de la línea de calcinación.

2.-Análisis de costos globales: Considerando los costos globales con reajuste IPC es posible observar un año 2016 óptimo en donde existe un costo por tonelada de clinker de \$11.403, posteriormente para el año 2019 puede considerarse como un año positivo, no obstante, a partir del año 2020 y hasta el año 2022 se considera el escenario más negativo en términos de costos globales, siendo el año 2022 el periodo más significativo en costo de ineficiencia.

La propuesta para el año 2024 en términos de costos globales equivale a \$3.948 mmclp en OPEX y \$3.975 mmclp en Capex comprometiendo una disponibilidad del 90,7%. El costo global sería de \$8.349 mmclp.

3.-Modelo y simulación de funcionamiento y reparación: Esta herramienta indica un nivel de capacidad de producción anual esperada para el año 2024 de 569.000 T, pero que sin embargo

al considerar minimizar las reparaciones “anidadas”, considerar planificaciones efectivas en términos de alcance, tiempo y presupuesto, mejorar la actual relación crudo/clinker y a su vez en el ciclo de funcionamiento lograr la utilización requerida es posible lograr el objetivo de 600.000 T/A.

Esta memoria se encuentra hoy aportando en la táctica del año 2024.

2 Índice

1	Resumen	3
2	Problema de Investigación	8
3	Objetivos	10
	3.1 Objetivo General.....	10
	3.2 Objetivos Específicos.....	10
4	Marco Teórico	11
	4.1 El Mantenimiento en Plantas Industriales.....	11
	4.2 Ingeniería de Mantenimiento: Modelos de Gestión.....	13
	4.3 Estructura Organizativa: Niveles de Gestión	16
	4.4 Análisis del costo del ciclo de vida: LCCA	18
	4.5 Impacto de la confiabilidad en el LCCA	19
	4.6 Alinear la Estrategia con los Objetivos Generales: CMI	21
	4.7 Descripción de las etapas del modelo	25
	4.7.1 Etapa 1 Análisis de la situación actual: definición de objetivos, estrategias y responsabilidades del mantenimiento	25
	4.7.2 Etapa 2 Clasificación de los equipos	27
	4.7.3 Etapa 3 Análisis de debilidades en proyectos de alto impacto equipos	28
	4.7.4 Etapa 4 Diseño de planes de mantenimiento y recursos requerido	31
	4.7.5 Etapa 5 Programación y optimización del mantenimiento en la asignación de recursos	34
	4.7.6 Etapa 6 Control y evaluación del mantenimiento implementación	34
	4.7.7 Etapa 7 Análisis del ciclo de vida y las posibles renovaciones de equipos ...	35
	4.8 Consideraciones del Modelo	35
	4.9 Herramientas de software avanzadas para apoyar el mantenimiento gestión	37
	4.10 Integración de herramientas y habilitación para la computadora sistema	38

4.11	Selección de Repuestos Críticos.....	38
4.11.1	Aspectos a considerar en la selección de repuestos críticos.....	38
4.12	Principios del CMI en la gestión del Mantenimiento Global.....	39
4.13	Falla Funcional	40
4.14	Efectos de la Falla.....	41
4.15	Mantenimiento Correctivo (CM).....	41
4.16	Mantenimiento Preventivo (PM).....	41
4.17	Mantenimiento según condición (CBM).....	42
4.18	Mantenimiento Predictivo (PrM).....	42
4.19	Fundamentos de Confiabilidad.....	42
4.20	Teoría de Confiabilidad	43
4.21	Confiabilidad en Sistemas.....	46
5	Caso de Estudio.....	48
5.1	La era del Cemento y su Historia	48
5.2	Un Material de Propiedades inigualables.....	48
5.3	El Proceso Productivo del Cemento Hoy.....	50
5.4	Modelo de Mantenimiento Melón	56
6	Metodología	59
6.1	Recopilación y Análisis de Datos.....	59
6.2	Recopilación y Análisis de los Costos Globales	61
6.3	Evaluación y Determinación de un Modelo y Simulación de Funcionamiento del Proceso de Producción de Clinker.....	61
7	Análisis de Disponibilidad, Mantenibilidad y Confiabilidad del Horno N°9 anual	62
7.1	Año 2016.....	62
7.2	Año 2017.....	65

7.3	Año 2018.....	68
7.4	Año 2019.....	71
7.5	Año 2020.....	74
7.6	Año 2021.....	76
7.7	Año 2022.....	80
7.8	Año 2023 (Hasta el 31 de Julio)	83
8	Análisis de Disponibilidad, Mantenibilidad y Confiabilidad del Horno N°9 por Campaña_	86
8.1	Campaña N°1 del 19 de junio del 2015 al 19 de junio del 2016.....	88
8.2	Campaña N°2 del 08 de julio del 2016 al 02 de octubre del 2017	90
8.3	Campaña N°3 del 10 de octubre del 2017 al 02 de abril del 2018	93
8.4	Campaña N°4 del 02 de mayo del 2018 al 29 de septiembre del 2019	95
8.5	Campaña N°5 del 20 de noviembre del 2019 al 28 de junio 2020	98
8.6	Campaña N°6 del 17 de julio del 2020 31 de agosto 2021	100
8.7	Campaña N°7 del 19 de septiembre del 2021 al 22 de julio 2022	104
8.8	Campaña N°8 del 04 de septiembre del 2021 al 31 de julio 2023	107
9	Análisis de los Costos Globales	111
9.1	Análisis de Costos Globales actualizados con reajuste IPC.....	112
10	Modelo y Simulación de Funcionamiento-Reparación Horno N°9	113
11	Conclusiones	120
11.1	Respecto del análisis de datos de tiempo de funcionamiento y reparación del Horno N°9	120
11.2	Respecto del Análisis de los Costos Globales.....	123
11.3	Respecto del Análisis del Modelo y Simulación de Funcionamiento-Reparación Horno N°9.....	123
12	Referencias	124

3 Problema de Investigación

“Chile fue pionero en el establecimiento de las primeras empresas cementeras en América del Sur. Desarrolló un mercado competitivo, aunque sensible a los cambios macroeconómicos no solo del país, sino también a nivel mundial” (Briones, et al., 2020, p.66).

El cemento es un producto de origen mineral compuesto por mezclas de caliza, arcilla y yeso. En Chile, estos podían ser clasificados en tres categorías de acuerdo a sus componentes: portland (compuesto por clinker y un bajo porcentaje de yeso), siderúrgicos (compuesto por Clinker más escoria y yeso) y puzolánicos (compuestos por clinker, puzolana y yeso) (Briones, et al., 2020, p.66).

“La primera empresa que dio origen a la industria del cemento en Chile fue Melón S.A., fundada en el año 1908 en La Calera, Valparaíso” (Briones, et al., 2020, p.67) en donde por 40 años se mantuvo bajo un modelo monopolístico y que en el año 1948 aparece un segundo competidor, Cementos Polpaico. Actualmente el negocio del cemento en Chile tiene un total de siete competidores en el cual el último en entrar al negocio fue la empresa de origen peruano de nombre Unión Andina de Cementos S.A. (UNACEM), que ingresó al país bajo su filial UNICON S.A. – Chile, en 2018 (Briones, et al., 2020, p.68)

Los siete competidores en la industria cementera tienen modelos de negocio diferentes, algunos mantienen el modelo tradicional, con un proceso productivo integrado de tres fases después de la extracción de minerales: calcinación, molienda y despacho y otros basaron su modelo en la importación de cemento o del clinker (el clinker representa hasta el 80% del producto final que es el cemento), reduciendo el proceso productivo a las fases de molienda y despacho (Briones, et al., 2020, p.68),

Cemento Melón actualmente posee ambos modelos de producción, con una Planta matriz que tiene un horno rotatorio para la producción de clinker en donde según Tirado “es dentro de la industria cementera un dispositivo de vital importancia, pues se constituye en un elemento esencial para la producción de cemento” (2022, p.3), y tres estaciones de molienda cercanas al borde costero para la recepción de clinker importado.

Hoy la opción de importar clinker ha sufrido alzas sostenibles en las tarifas de embarcación y además, una vez llegando a Puerto se ha generado niveles excesivos de atochamiento propio de los protocolos de salud post pandemia en cada Puerto y por lo tanto la empresa más competitiva

del mercado es aquella que pueda obtener el máximo rendimiento del modelo tradicional por medio de sus hornos rotatorios para la producción de clinker nacional o en su defecto importar clinker a un costo elevado con la incertidumbre propia del arribo y amarre de la nave para su posterior producción en las estaciones de molienda.

Esta memoria abordará la problemática actual de Cementos Melón Planta La Calera que posee un horno rotatorio con capacidad de producción de 600.000 T/A de clinker, la cual tiene como último logro de este indicador el año 2016 y que posteriormente ha presentado un deterioro significativo en los indicadores de disponibilidad y altos tiempos de reparación, indicadores que son una medida directa de la productividad de la Planta y sus costos de parada son significativos, no solo por el costo de los consumibles o partes sino por la producción perdida (Gil, 2012, p.9), afectando significativamente en el resultado financiero de la compañía ,siendo hoy su mayor ventaja comparativa y diferenciadora respecto de aquellas empresas que mantienen un modelo de importación de clinker para las estaciones de molienda y que según García “para ser competitivos, es necesaria la aplicación de herramientas que aseguren la consecución de los objetivos estratégicos de la organización”(2013,p.1).

“La alta competitividad que le exige a la industria y la actual globalización obliga a las empresas a mejorar la productividad de sus procesos para asegurar la rentabilidad y supervivencia en el negocio” (Segura et al p.5). Hoy la compañía tiene un desafío relevante que debe responder a la problemática de ¿Por qué existe un deterioro del activo principal y estratégico relacionado con la producción de clinker nacional?,¿Cuál será la estrategia de mantenimiento que permitirá un cambio de estado respecto de la producción meta anual?,¿Qué nivel de mantenimiento mayor o parada de planta es efectiva para el ciclo de funcionamiento estable del horno?, estas serán las preguntas que responderemos en el desarrollo de esta memoria.

4 Objetivos

4.1 Objetivo General

Desarrollar un plan de mejoramiento al modelo de mantenimiento de Cementos Melón Planta La Calera de la línea de producción de clinker nacional por medio de técnicas relacionadas a modos de falla, funciones de confiabilidad y disponibilidad con la finalidad de facilitar el cumplimiento del indicador de producción anual.

4.2 Objetivos Específicos

Analizar los datos de tiempo de funcionamiento y reparación del Horno N°9, almacenados en el Sistema de Gestión de Paro (SGP) de la compañía desde el año 2016 al 2022, aplicando metodologías del marco teórico que permitan identificar el modo de falla del activo en toda su línea de producción.

Realizar un análisis de los costos globales del activo en la línea de producción del Horno N°9, para establecer una herramienta de planificación de presupuesto anual tanto para el ciclo de mantenimiento mayor y régimen de mantenimiento en la campaña de funcionamiento del horno N°9, con la finalidad de minimizar el ingreso al ciclo de falla en su curva de desgaste de acuerdo a lo establecido en el estado del arte.

Proyectar en función del marco teórico un modelo y simulación de funcionamiento del proceso de producción de clinker de acuerdo a la disponibilidad proyectada para el año 2024 con la finalidad de ofrecer propuestas al plan operacional de mantenimiento del Horno N°9 y presupuesto de costo global.

5 Marco Teórico

5.1 El Mantenimiento en Plantas Industriales

El Mantenimiento para los procesos industriales permite mantener además de la continuidad operacional el aumento del ciclo de vida de los activos de una empresa. A modo general, “este concepto involucra la eficiencia y la eficacia, es decir, el logro de los resultados programados en el tiempo y con los costos más razonables posibles. Supone hacer lo correcto con gran exactitud y sin ningún desperdicio de tiempo o dinero” (Mejía, 2013).

El mantenimiento juega un rol relevante a la hora de lograr un objetivo y “La efectividad enfatiza que tan bien un departamento o función cumple con sus objetivos o necesidades de la empresa” (Crespo, 2007), por lo tanto, muchos programas están siendo conducidos para mejorar la eficiencia y eficacia de sus planes de mantenimiento.

La eficiencia es un concepto fundamental en la definición de efectividad, pero “el termino eficiencia tiene dos significados bastante diferentes. El primero mide el rendimiento, relacionado con la inversión, mientras que el segundo mide que tan bien está funcionando algo en relación con que tan bien debería estar haciéndolo” (J. Moubray, 2004). “Por lo tanto si queremos medir la eficiencia, mediremos que tan bien las diferentes actividades de mantenimiento están siendo desarrolladas, no si las actividades en sí mismas están correctas” (Crespo, 2007).

Dicho lo anterior, es que se puede identificar que el desarrollo de las actividades de mantenimiento está directamente relacionado con la efectividad del plan de mantenimiento por lo que “Todos los aspectos de la eficacia y la eficiencia del mantenimiento se ven afectados por que tan bien se planifican y controlan las actividades de mantenimiento, desde la utilización general de mano de obra, hasta la duración de las interrupciones individuales” (Moubray, 2004).

El segundo concepto fundamental que explica la efectividad, es la eficacia, la cual “puede representar la satisfacción general de la compañía con la capacidad y condición de sus activos o la reducción del costo total de la compañía obtenido dada la capacidad de producción que está disponible cuando se es necesaria” (Crespo, 2007). Por lo tanto, representa la medida del cumplimiento de los objetivos de la empresa y una medida de la obtención de resultados esperados por los clientes dado que “el seguimiento y análisis de los resultados que se van obteniendo en la instalación con la 20 implementación de un nuevo plan de mantenimiento son tareas que resultan de capital importancia para la evaluación de su eficacia” (Fernández, 2003). De este modo, dada la expectativa de resultados de un plan de mantenimiento es que la eficacia mide que tan buenos son

los resultados del plan en relación con lo planificado.

Además, la eficacia de un plan de mantenimiento permite medir el desempeño de los costos indirectos de mantenimiento, desde los más importantes como los son los costos relacionados a las pérdidas de producción hasta las últimas instancias, como los costos de insatisfacción de los clientes (A. Crespo, 2007).

El concepto básico que conduce a la ingeniería de mantenimiento, es la mejora continua del proceso de gestión del mantenimiento incorporando conocimiento, inteligencia y análisis. Apoyan la toma de decisiones en campo de mantenimiento y están diseñados para mejorar la salida de resultado económico y operativo. Debido al análisis y modelización de los resultados obtenidos en la ejecución de las operaciones de mantenimiento, la ingeniería de mantenimiento permite la renovación de un sistema continuo y estrategia justificada. Por lo tanto, las actividades de programación y planificación aseguran la producción al costo total más bajo. Además, permite la correcta selección de nuevos equipos, con costes globales mínimos en términos de su ciclo de vida y seguridad operativa (costo de la ineficiencia o pérdida de oportunidad por coste de producción). Los objetivos de cualquier modelo de La gestión del mantenimiento deben determinarse en función del plan de negocios de la organización. Las estrategias de mantenimiento siempre deben estar alineadas con los planes de negocio de la empresa, porque el logro de los objetivos de mantenimiento depende de ello, así como el plan de negocios de la organización. Por lo tanto, los objetivos comerciales y de mantenimiento deben estar fuertemente vinculados entre sí. Algunos de los principales criterios y objetivos de optimización son (Van Horenbeek et al. 2011): costes de mantenimiento (descontados), disponibilidad, calidad de mantenimiento, fiabilidad, gestión de personal, mantenibilidad, inventario de repuestos, impacto ambiental, efectividad general del equipo, seguridad/riesgo, número de intervenciones de mantenimiento, logística, capital, decisiones de reemplazo, cantidad de salida, optimización del ciclo de vida y calidad de salida.

5.2 Ingeniería de Mantenimiento: Modelos de Gestión

El concepto básico que conduce a la ingeniería de mantenimiento, es la mejora continua del proceso de gestión del mantenimiento incorporando conocimiento, inteligencia y análisis. Apoyan la toma de decisiones en el campo del mantenimiento y están diseñados para mejorar la salida de resultado económico y operativo. Debido al análisis y modelización de los resultados obtenidos en la ejecución de las operaciones de mantenimiento, la ingeniería de mantenimiento permite la renovación de un sistema continuo y estrategia justificada. Por lo tanto, las actividades de programación y planificación aseguran la producción al costo total más bajo. Además, permite la correcta selección de nuevos equipos, con costes globales mínimos en términos de su ciclo de vida y seguridad operativa (costo de la ineficiencia o pérdida de oportunidad por coste de producción).

Los objetivos de cualquier modelo de la gestión del mantenimiento deben determinarse en función del plan de negocios de la organización. Las estrategias de mantenimiento siempre deben estar alineadas con los planes de negocio de la empresa, porque el logro de los objetivos de mantenimiento depende de ello, así como el plan de negocios de la organización. Por lo tanto, los objetivos comerciales y de mantenimiento deben estar fuertemente vinculados entre sí. Algunos de los principales criterios y objetivos de optimización son (Van Horenbeek et al. 2011): costes de mantenimiento, disponibilidad, calidad de mantenimiento, fiabilidad, gestión de personal, mantenibilidad, inventario de repuestos, impacto ambiental, efectividad general del equipo, seguridad/riesgo, número de intervenciones de mantenimiento, logística, capital, decisiones de reemplazo, cantidad de salida, optimización del ciclo de vida y calidad de salida.

La gestión del mantenimiento no es un proceso aislado (Pintelon y Gelders 1992); en realidad es un sistema lineal eso depende de factores relacionados con la gestión del mantenimiento, así como de factores internos y externos de la organización. Además, la situación más deseable es la Integración completa de la gestión del mantenimiento (Vanneste y Van Wassenhove 1995).

La figura N°1 muestra el contexto actual que enmarca la gestión del mantenimiento y sus interacciones en respuesta a dos tipologías: interna y externa. Con base en ISO 9001–2008, podemos establecer una secuencia diagrama del sistema de mantenimiento desde el punto de vista de los procesos que la constituyen según la figura N°2. De esta manera, es posible distinguir todos los aspectos que se deben tomar en cuenta al desarrollar e implementar un modelo de gestión de mantenimiento. Un modelo de gestión del mantenimiento debe ser eficaz, eficiente y oportunista,

es decir, debe estar alineado con el conjunto objetivos que se basan en las necesidades del negocio (Van Horenbeek et al. 2011), y minimizar los costos indirectos de mantenimiento (Vagliasindi 1989) (asociado con pérdidas de producción).

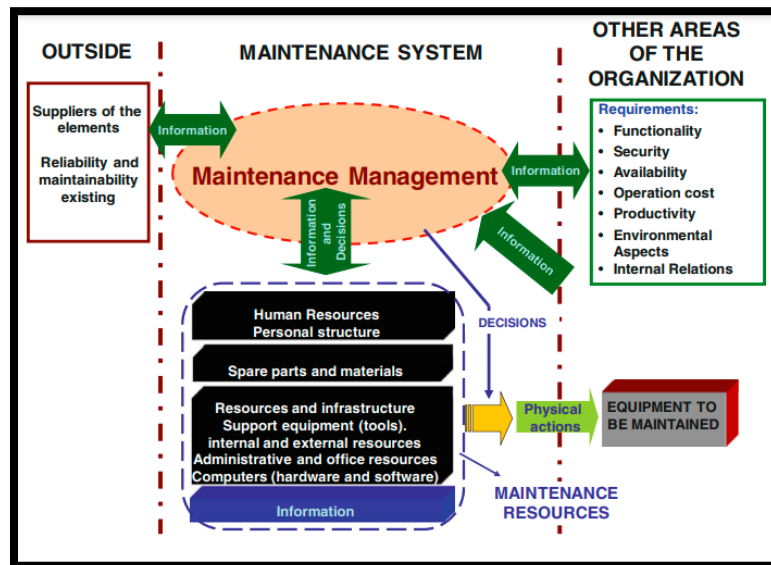


Figura 1 Sistemas de Mantenimiento (Barberá et al. 2021)

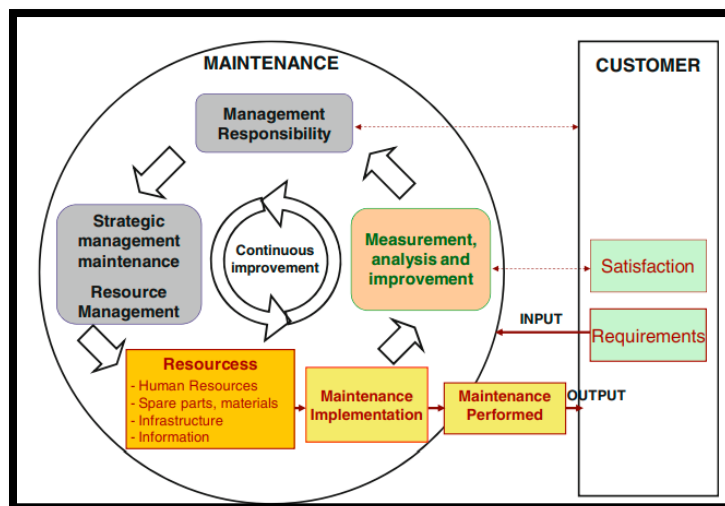


Figura 2 Sistemas de procesos de mantención (Barberá et al. 2021)

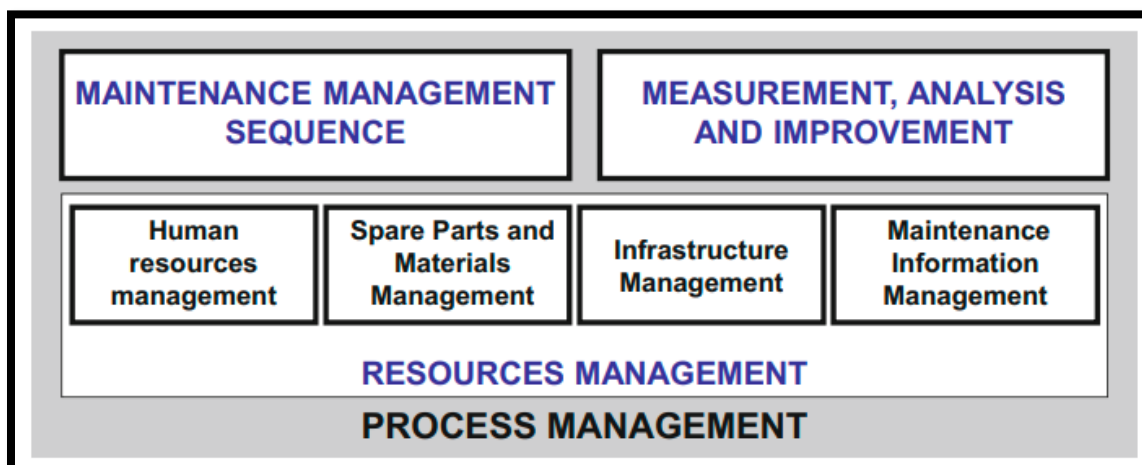


Figura 3 Sistema de recursos para la mantención (Crespo 2007)

Al mismo tiempo, debe ser capaz de operar, producir y alcanzar los objetivos con el mínimo coste (para minimizar costos directos de mantenimiento), y generar actividades para mejorar indicadores clave del proceso de mantenimiento, relacionados con la mantenibilidad y la confiabilidad. Por lo tanto, para desarrollar un sistema robusto y modelo eficaz de gestión del mantenimiento, es importante considerar todos los aspectos relacionados con la gestión de los recursos disponibles y necesarios (Crespo 2007) (Fig. 3). La gestión de estos recursos se puede clasificar en base a cuatro grupos importantes (López Campos et al. 2010a, b): recursos humanos, repuestos, información e infraestructura. Para la correcta gestión de los recursos humanos diferentes aspectos deben ser potenciados y correctamente evaluados, tales como la motivación del personal, que determinará en gran medida el nivel de implicación, su preparación y formación sobre tareas y operaciones realizadas; Evaluación del desempeño tanto individualmente como colectivamente como grupo, la correcta y fácil comunicación entre todas las partes involucradas y la aceptación colectiva del liderazgo organizacional. La gestión de repuestos y materiales incluye todos los aspectos relacionados con el almacenamiento y la disponibilidad (tiempo), es decir, inventarios y proveedores (oferta). Del mismo modo, la infraestructura, la administración se ocupa de los activos internos y externos y son necesarios para permitir la correcta ejecución del mantenimiento, por ejemplo, equipo de apoyo, verificación, administración (oficina) e informática (hardware y software). Finalmente, la correcta gestión de la información de mantenimiento incide directamente en la consecución de los objetivos marcados ya que es la base de la información a desarrollar. planificación y programación del mantenimiento. Esta información se compila usando

datos obtenidos del mantenimiento proceso en sí mismo (información del equipo respecto de su operación y mantención) y otra información o datos relevantes.

5.3 Estructura Organizativa: Niveles de Gestión

Los principales objetivos estratégicos de la mayoría de las empresas son aumentar la cuota de mercado y la rentabilidad (Porter 1985); sin embargo, la forma de lograrlo no es única. Esta es la razón por la que las metas corporativas se desglosan en objetivos y estrategias para diferentes procesos, tales como operaciones y mantenimiento. En mantenimiento, esto debe apoyar la consecución de los objetivos corporativos mediante la definición de un conjunto adecuado de políticas y recursos. La definición de objetivos en los diferentes niveles de control representa el propósito de la gestión del mantenimiento. Además, los pilares de estos objetivos son la eficiencia, eficacia y rentabilidad, así como saber que el objetivo general es contribuir a la rentabilidad y competitividad de la empresa (Parida y Chattopadhyay 2007; Kans 2008). La eficiencia, en términos simples, explica la relación entre recursos e insumos (input) y los resultados, mientras que la efectividad muestra qué tan bien los resultados contribuyen a objetivos comerciales (Anthony 1998). Además, el indicador de rentabilidad es una medida de un sistema/proceso en términos de desempeño durante su ciclo de vida (Blanchard 1998). Los objetivos de mantenimiento (SIS 2001) se pueden definir como metas asignadas y aceptadas que requieren actividades de mantenimiento. Cada uno pertenece a uno de los diferentes niveles de control, desde el nivel estratégico de mantenimiento hasta el nivel operativo de mantenimiento. En general, las estrategias abordan y definen el plan organizativo para lograr los objetivos (Anthony 1998), centrándose en el “cómo” se logrará. La dirección de la unidad de mantenimiento debe ser consistente con las metas de producción y las metas estratégicas generales de la empresa y, asimismo, debe ser coherente en la definición de estrategias, políticas, procedimientos, organización estructural y decisiones a diferentes niveles (planificación y estructurar el trabajo de mantenimiento) (Kans 2008). Haciendo hincapié en el nivel de disponibilidad se puede definir a partir de un nivel de servicio o producción esperada (objetivo/meta) que es comprometido por la alta dirección de la empresa y en línea con el presupuesto real. Por lo tanto, el nivel de disponibilidad requerido es definido en términos del conjunto de estrategias (fijo). En consecuencia, la lectura de esta pantalla se convierte en una entrada para el siguiente nivel jerárquico (táctico), donde se apuntan las competencias básicas en la asignación eficiente de los recursos disponibles (dinero, tiempo, personal, etc.) para planificar

las actividades de mantenimiento. Como resultado, el nivel operativo, alimentado con las decisiones tácticas, busca el uso eficiente de los recursos y considera los aspectos técnicos y aspectos organizacionales (Kans 2008).

En la figura 4, se muestra la jerarquía de objetivos y metas establecidas para cada nivel, y también indica otros aspectos fundamentales en el proceso de toma de decisiones. El flujo de decisión para el logro de objetivos estratégicos, tácticos y las metas y objetivos operativos siguen el formato de arriba hacia abajo, es decir, comenzando desde el nivel superior (estrategia corporativa) y continuando hasta el nivel operativo y de ejecución (SIS 2001; Antonio 1998). Sin embargo, el flujo de información que alimenta la toma de decisiones parte de la base, dando apoyo empírico a las decisiones. El uso eficiente y económicamente correcto de los activos durante su ciclo de vida permite una definición óptima del nivel de disponibilidad de activos y/o procesos, que tienen como objetivo un nivel de producción, o indicador económico financiero, el ROA (De Andrés et al. 2009).

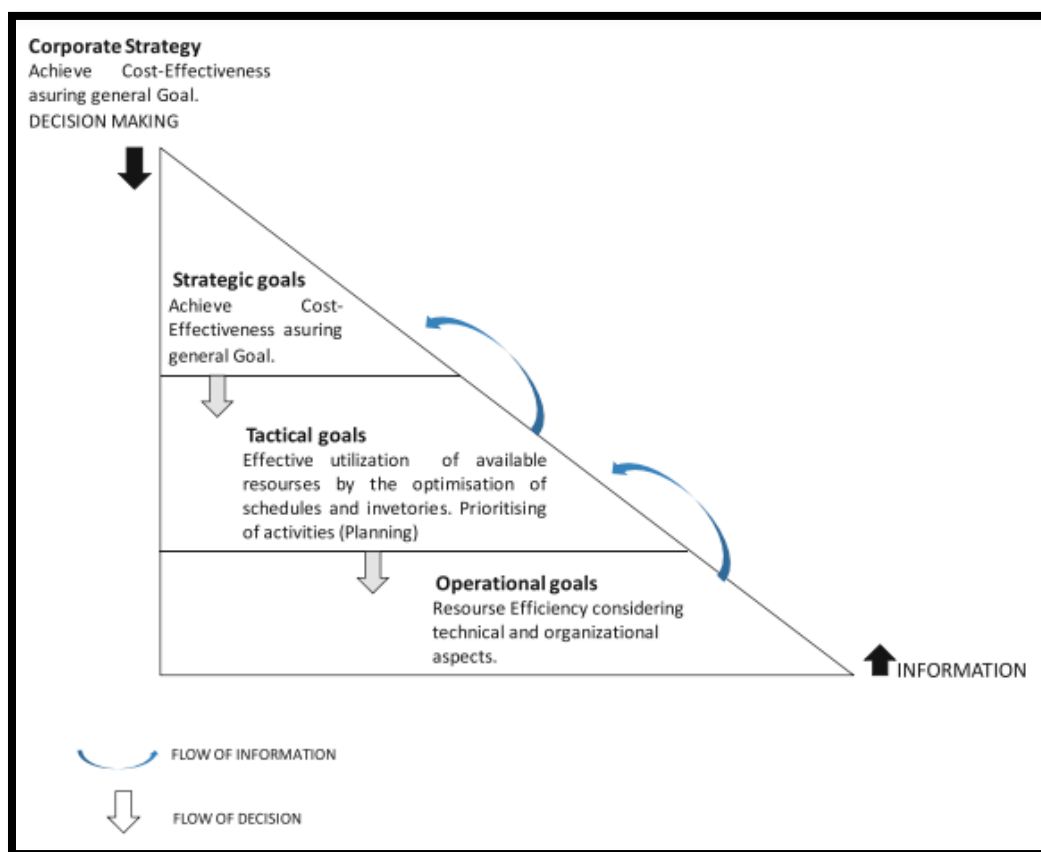


Figura 4 Niveles de jerarquía de objetivos (Barberá et al. 2021)

5.4 Análisis del costo del ciclo de vida: LCCA

Durante los últimos años, el área de investigación relacionada con el análisis del costo del ciclo de vida ha continuado su desarrollo tanto a nivel académico como a nivel industrial. Es importante mencionar la existencia de otras metodologías que han surgido en el área de LCCA, tales como: ciclo de vida, análisis de costes e impacto ambiental, análisis de costes totales de activos de producción, entre otros (Moubray 1997).

Estas metodologías tienen sus características particulares, aunque en cuanto al proceso de estimación de los costes por impacto de eventos de falla; suelen proponer fiabilidad análisis basado en tasas constantes de fallas. La implementación temprana de las técnicas de análisis de costos permite una evaluación temprana antes de posibles problemas de diseño, y para cuantificar el impacto potencial en los costes a lo largo del ciclo de vida de los activos industriales (Moubray 1997). Para ello, existen procedimientos que agrupan juntos en las denominadas: técnicas de coste del ciclo de vida análisis. LCCA se define (Kirk y Dellisola 1996) como una técnica de cálculo económico que respalda la toma de decisiones vinculadas al proceso de diseño, selección, desarrollo y sustitución de los activos en un sistema de producción. Idealmente, evalúa los costes, de forma cuantitativa, asociado al período económico de espera de vida útil y se expresa en moneda equivalente anual (dólares/año, euros/año, pesos/año). El costo de un ciclo de vida se determina identificando las funciones aplicables en cada una de sus fases calculando el coste de dichas funciones y aplicando los costes durante toda la extensión del ciclo de vida. para que este completo, el costo del ciclo de vida debe incluir todos los costos de diseño, fabricación y producción (Ahmed 1995). Desde el punto de vista financiero, los costes generados a lo largo del ciclo de vida del activo se clasifican en dos tipos de costos:

- CAPEX Costos de capital (diseño, desarrollo, adquisición, instalación, capacitación del personal, manuales, documentación, herramientas e instalaciones para mantenimiento, reemplazo piezas para aseguramiento, retiro).
- OPEX Costos operativos: (mano de obra, operaciones, mantenimiento planificado, almacenamiento, reclutamiento y mantenimiento correctivo, penalizaciones por eventos de falla/bajo fiabilidad).

5.5 Impacto de la confiabilidad en el LCCA

Woodhouse (1991) plantea que para poder diseñar un sistema productivo eficiente y competitivo en el moderno ambiente industrial, es necesario evaluar y cuantificar, de manera detallada, los dos aspectos siguientes:

- **Costos:** un aspecto que está relacionado con todos los costos asociados al ciclo de vida total esperado del sistema de producción. Incluyendo: costos de diseño, producción, logística, desarrollo, construcción, operación, mantenimiento preventivo/correctivo, retiro.
- **Confiabilidad:** un factor que permite predecir la forma en que los procesos productivos pueden perder su continuidad operativa, por eventos de fallas accidentales, y evaluar el impacto en los costos que las fallas causa en seguridad, medio ambiente, operaciones y producción.

El aspecto clave del término "confiabilidad" está relacionado con la continuidad operativa. En otras palabras, es posible establecer que un sistema de producción es "Confiable" cuando es capaz de cumplir su función de una manera segura y eficiente a lo largo de su ciclo de vida. Cuando el proceso de producción comienza a verse afectado por una gran cantidad de eventos de fallas accidentales (baja confiabilidad), este escenario genera altos costos, asociados principalmente con la recuperación de la función (costos directos) y con impacto creciente en el proceso productivo (costos de penalización).

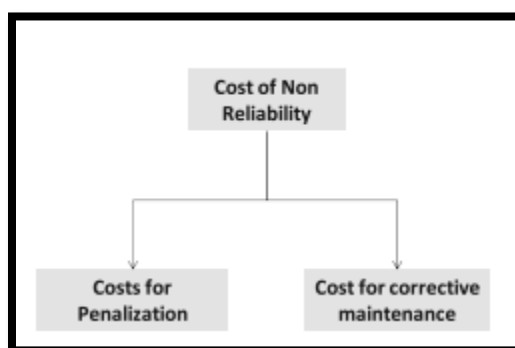


Figura 5 Impacto económico de la confiabilidad (Barbera et al 2021)

Los costos totales de la no confiabilidad se describen a continuación:

Costo por penalización, por tiempos muertos.	Pérdidas de oportunidades/Producción diferida Pérdidas de producción (falta de disponibilidad) Pérdidas operativas Impacto en la calidad Impacto en seguridad y medio ambiente
Costo por mantenimiento correctivo	Mano de obra (propia o contratada) asociada para solucionar evento no planificado Costos directos de materiales y repuestos relacionados con las piezas consumibles y los repuestos utilizados en caso de acción no planificada

Tabla 1 Costos totales de la no confiabilidad

En consecuencia, a la vista de la información anterior sobre el aspecto básico e impacto de la confiabilidad en el LCCA, el concepto de costo global se puede formular como la suma de todos los costos generados durante el ciclo de vida de un proyecto, considerando las técnicas de VAN (valor presente neto de cada costo). este modelo podría asegurar las decisiones de negocio y comportamiento.

El costo global se puede calcular usando la siguiente relación:

Costo Global=Costo Capital Fijo(P)+ Costo de no Confiabilidad(P)+Costo Operacional(P)

Donde (P) representa: valor presente de cada costo. El costo del capital fijo (o inversión) se determina por el costo de los equipos e instalaciones asociados con el proyecto. El costo operacional se define por la cuantificación de todos aquellos elementos de la operación de un sistema, tales como suministros, energía, repuestos, mano de obra, operaciones, mantenimiento planificado, etc. Finalmente, el costo de la no confiabilidad viene dado por la suma del costo por penalización, que es asociado con la indisponibilidad de la instalación durante el período de evaluación, y el costo del mantenimiento correctivo.

Por lo tanto, las partidas de costo global se pueden representar como (Woodhouse 1993; Ruff and Paasch 1993; Barlow et al. 1993):

$$FC(P): I_o + \sum_{T=1}^n [I_T * \frac{1}{(1+i)^T}] \quad (1)$$

$$CNR(P): \sum_{T=1}^n [[CP_T * H_T * (1 - A_{system,T}) + CCM_T] * \frac{1}{(1+i)^T}] \quad (2)$$

$$OC(P): \sum_{T=1}^n [OC_T * \frac{1}{(1+i)^T}] \quad (3)$$

Donde FC (P), capital fijo en valor presente; CNR (P), costo de no confiabilidad en el valor presente; OC (P), costo operativo en valor presente; OC_T (P), costo operativo en valor presente en

el período de tiempo T ; I_T , el flujo de inversión en el período de tiempo T ; I_0 , el flujo de inversión en el período de tiempo 0; CP_T , costo por penalización por unidad de tiempo en el período de tiempo T (\$/h; USD/día, etc.); CCM_T , costo del mantenimiento correctivo en el período de tiempo T (US, \$, etc.); $A_{System,T}$, disponibilidad del sistema en el momento período T ; H_T , período de evaluación dentro del proyecto horizonte (por ejemplo, 8760 h); n , número de años o períodos en el planeando el horizonte; y i , tasa de costo de capital de la empresa en periodo de tiempo t LCCA proporciona las herramientas para diseñar el mantenimiento presupuestos, costos de proyectos y escenarios de toma de decisiones actuales en una perspectiva financiera para lograr el menor costo a largo costo del término. Por lo tanto, diferentes alternativas de equipos, sistemas o proyectos podrían ser analizados de una manera donde la alternativa técnica más recomendable será la que con el mínimo coste global.

5.6 Alinear la Estrategia con los Objetivos Generales: CMI

El cuadro de mando integral (CMI) es una metodología con un enfoque multidimensional que puede integrar la estrategia la empresa en la organización con su propio funcionamiento. Esto es para determinar el logro de los objetivos organizacionales evaluando el desempeño del negocio a través de la gestión de indicadores (Kaplan y Norton 1996). Así, el CMI ayuda implementar las líneas estratégicas dictadas por los intereses de la empresa (Kaplan y Norton 2005) y, además, alinea los objetivos de los departamentos, o el operativo de las unidades, con los objetivos estratégicos generales que controlan sus desviaciones El CMI puede entenderse como un sistema de comunicación, información y formación (sobre la estrategia y la propia empresa), que no sustituye al tradicional proceso de planificación estratégica (Kaplan y Norton 2006).

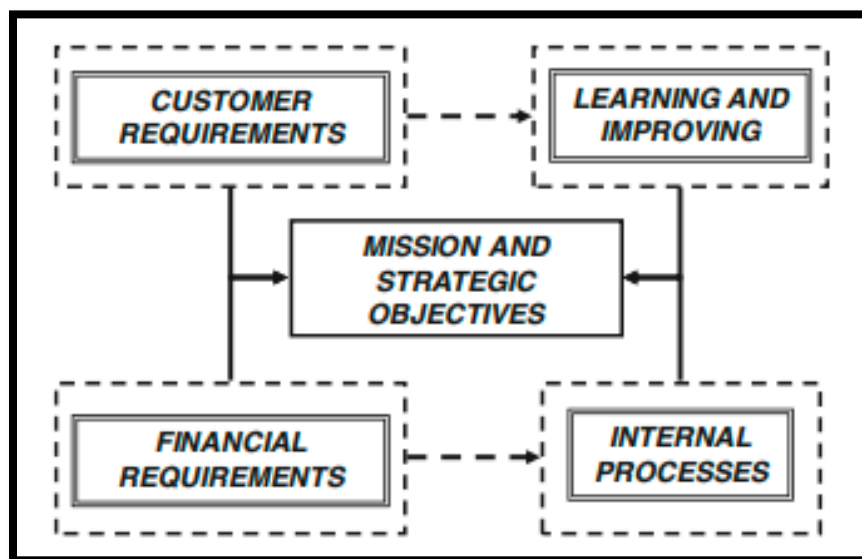


Figura 6 Perspectiva del cuadro de mando integral: CMI (Barberá et al 2021)

pero completa y ayuda a su comunicación e implementación (Abran y Blugione 2003). Esta metodología transforma la visión y la estrategia en un conjunto de objetivos e indicadores de desempeño agrupados en cuatro perspectivas centrales (dimensiones) que se consideran críticas para la gestión y control (Fleisher y Mahaffy 1997) (Fig. 6):

1. Perspectiva de aprendizaje y crecimiento: el objetivo es asegurar resiliencia y renovación a largo plazo de la empresa (en respuesta a los cambios generados por el medio ambiente) así como mantener el conocimiento en las áreas consideradas como competencias básicas.
2. Perspectiva del proceso interno: considera la calidad, productividad y costos de varios procesos de misión desarrollado por la organización, incluido el proceso de gestión del mantenimiento (número de unidades defectuosas, tiempo del ciclo de producción, capacidad ociosa del equipo, etc.).
3. Perspectiva del cliente: evaluar cómo crear valor para clientes. Busca medir el impacto y nivel de satisfacción que la organización genera para sus clientes.
4. Perspectiva financiera: busca medir la supervivencia, crecimiento y desarrollo de la organización en términos financieros y generación de valor.

El CMI conserva la medición técnica y financiera (Fleisher y Mahaffy 1997), pero también realiza un conjunto de medidas integradas más amplias que vinculan procesos, empleados y el rendimiento de los sistemas con el éxito de la empresa a largo plazo. De este modo (Michalska

2005), el CMI complementa los indicadores financieros mientras aclara, traduce y transforma la visión y estrategia para identificar, planificar y establecer iniciativas estratégicas. Por su parte, los indicadores deben definirse para medir un objetivo claro al que están asociados, permitiendo un seguimiento estratégico de los mismos y evaluando su cumplimiento por un oficial designado para tal fin. Por lo tanto, cada iniciativa, indicador y meta tendrá una persona responsable a cargo que monitoreará el nivel de logro. Posteriormente se definen acciones o iniciativas estratégicas al permitir el logro de los objetivos y metas. Se requiere el establecimiento de acciones para considerar el esfuerzo de implementación y los beneficios derivados de ellos. Finalmente, se debe establecer un sistema de monitoreo adecuado. evaluar el nivel de consecución de los objetivos estratégicos en de forma regular (Michalska 2005), y de esta manera poder para tomar decisiones y correcciones oportunas en la estrategia definido a partir de ellos. Los indicadores tomados en cuenta en la metodología del CMI deben ser relevantes, prácticos, medibles e implementables (Kaplan y Norton 1992). Hay dos tipos de indicadores en el marco CMI (Macdonald 1998): indicadores de resultados (medidas de retraso) y desempeños indicadores (medidas de predicción). El CMI debe ser un equilibrio entre ambos tipos de indicadores, ya que ambos son necesarios. Los indicadores de retraso reflejan los resultados de decisiones pasadas y dan información sobre lo que sucedió, pero no pueden cambiar el resultado. Por el contrario, los indicadores de desempeño generalmente miden el rendimiento de los procesos para detectar lo que está sucediendo y tomar las medidas apropiadas para mejorar los resultados. Por lo tanto, esto lo hace más predictivo y permite ajustes más rápidos. Una vez definidos los indicadores, es necesario integrarlos con otros sistemas de información preexistentes en la organización (Kaplan y Norton 1996). además, las fuentes de cada uno de los datos necesarios para alimentar los indicadores a nivel se deben identificar los intervalos apropiados.

El modelo propuesto surge de la necesidad de considerar la gestión del mantenimiento y los planes estratégicos y contexto operativo. Esto se logra siguiendo una serie de aspectos reales (no contemplados en otros modelos) necesarios para convertir un modelo teórico en un mantenimiento real y útil modelo de gestión. Así, el modelo tiene en cuenta la restricciones reales o genuinas que podrían limitar el diseño de planes de mantenimiento preventivo y los recursos para hacerlo. Él también considera la selección de repuestos críticos (inventario costo versus costo debido a la falta de disponibilidad de equipos críticos) y la participación positiva de las tecnologías electrónicas (e-maintenance) en la gestión moderna del mantenimiento a nivel global. A su vez, el

modelo consta de siete etapas dispuestas que seguir una secuencia lógica de jerarquía de acción y alinear objetivos de mantenimiento local con el negocio global (Figura 7).

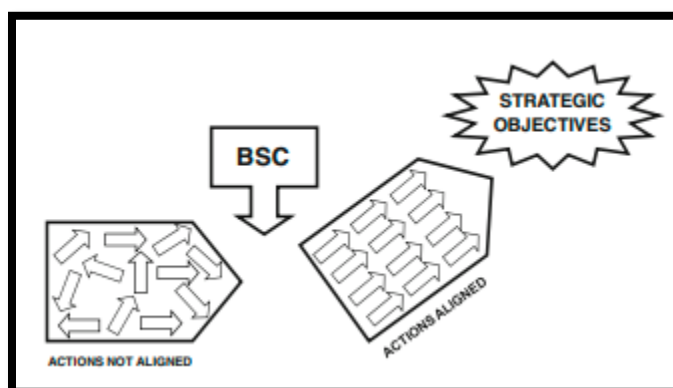


Figura 7 Alineamiento estratégico con la implementación del CMI

Todo ello en un marco de continua mejora utilizando los principios de la metodología del CMI aplicado a la gestión del mantenimiento.

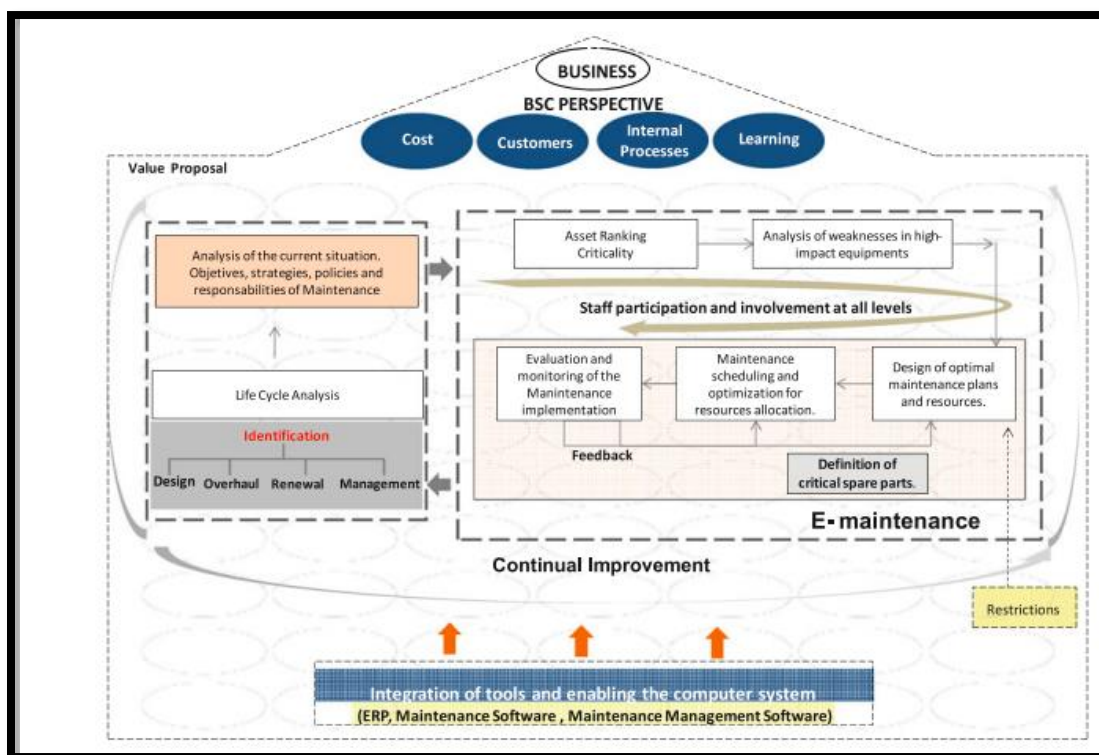


Figura 8 Propuesta de modelo de administración de la mantención (Barberá et al 2021)

Además, se tomaron dos posibles escenarios existentes en consideración para el diseño de este modelo: etapa de diseño (análisis de costo del ciclo de vida LCC), o proceso existente, y uno funcionamiento (ranking de equipos críticos), que requiere una evaluación para su optimización. Además, el modelo describe cómo gestionar y optimizar de forma continua todos los procesos que se ocupan de planificación, programación y ejecución del mantenimiento. Todo ello en un contexto operativo real, que tiene en cuenta ciertas restricciones, puede afectar la eficiencia y/o eficacia de la gestión del mantenimiento industrial. El modelo está diseñado de una forma sencilla y práctica que considera la alineación de los procesos clave de mantenimiento gestión y procesos externos que apoyan el éxito de todo el proceso. También facilita a los responsables de la gestión general del mantenimiento en una organización. Cada etapa del modelo corresponde a una acción que precede el siguiente; el orden y la dirección de estas acciones propuestas en el modelo son únicos (con dos puntos de partida dependiendo en la posición inicial o de partida) y no reversible. Cada etapa distingue y caracteriza el concreto acciones para seguir los diferentes pasos del mantenimiento proceso de gestión. El modelo es dinámico, secuencial y bucle cerrado y puede determinar con precisión el curso de acciones a realizar en el proceso de gestión, asegurando la eficiencia, la eficacia y la mejora continua de sus propios.

5.7 Descripción de las etapas del modelo

Ahora se presentarán las etapas del modelo, asumiendo que la organización ya gestiona, en mayor o menor medida el mantenimiento.

5.7.1 Etapa 1 Análisis de la situación actual: definición de objetivos, estrategias y responsabilidades del mantenimiento

En primer lugar, y como paso previo a cualquier actividad, es necesario realizar una evaluación de línea de base o existente, en relación con la gestión del mantenimiento. Este análisis debe ser completado en el caso de que la organización o planta ya tiene una gestión más o menos definida, sobre todo si hay hubo alguna metodología o procedimiento para este trabajo. Esta evaluación de la situación actual debe considerar todos aspectos relacionados con el mantenimiento de los equipos donde la información está disponible, por ejemplo, cuestiones como la planificación, programación y ejecución de tareas de mantenimiento, historial de fallas, indicadores de tiempo medio para fallas (MTTF) y tiempo medio de reparación/recuperación (MTTR), recursos financieros destinados a mantenimiento, impacto económico o en producción (falla de equipos) por

parada no programada de la planta (sistema) o subsistema, entre otros (González et al. 2010). Para lograr un rendimiento preciso en la gestión global del mantenimiento en una organización, es fundamental definir, con anterioridad, los objetivos (metas) a lograr. Esto se logra estableciendo una estrategia dirigidos a estos objetivos y determinando las responsabilidades del personal involucrado en el funcionamiento y la gestión nivel. El proceso de definición de una estrategia de mantenimiento requiere (Fig. 9):

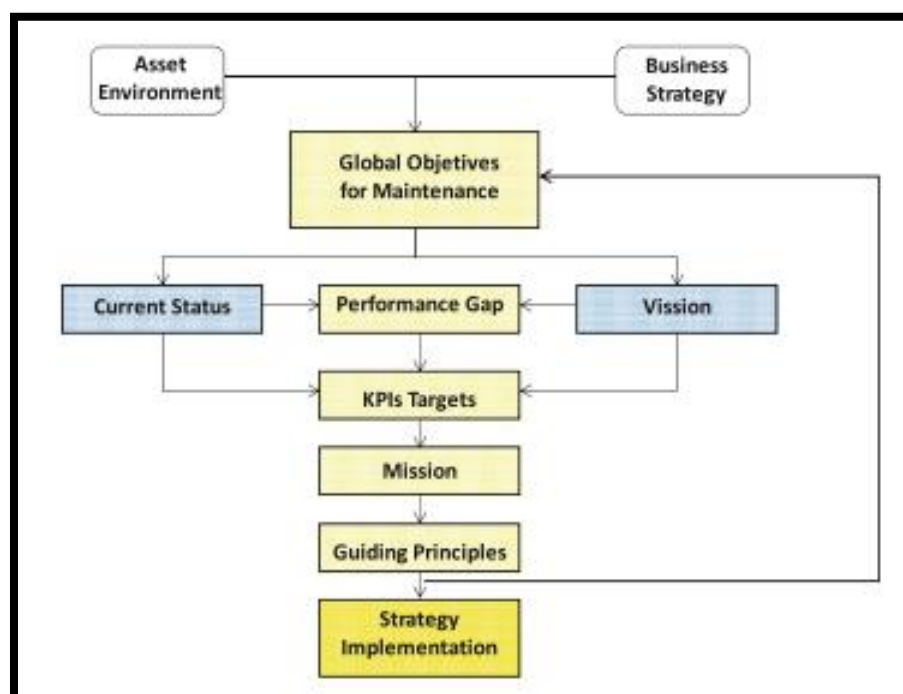


Figura 9 Modelo para la definición de la estrategia del mantenimiento (Crespo 2007)

- Determinar los objetivos de mantenimiento, en base a objetivos comerciales corporativos, por ejemplo, valores realistas estimados para los siguientes indicadores de desempeño: disponibilidad de equipos, confiabilidad, seguridad, riesgo, etc. Determinar el rendimiento o los resultados reales de las instalaciones de producción, comparándolas con su respectiva capacidad nominal (calificaciones).
- Identificar indicadores clave para la evaluación del desempeño de las instalaciones (indicadores clave de desempeño—KPI). La gestión del mantenimiento debe alinear todo el mantenimiento actividades con una estrategia definida sobre una base de

gestión, táctica y nivel operativo. Una vez que las prioridades comerciales cambian al mantenimiento prioridades, la elaboración de la estrategia, de acuerdo con los objetivos, procederá. De esta manera obtenemos un genérico plan de mantenimiento en la empresa que desarrollará y centrarse en aquellos activos considerados críticos. Las acciones a nivel táctico determinarán la asignación adecuada de recursos (habilidades, materiales, pruebas y medidas, equipos, etc.) para lograr el plan de mantenimiento. El fin del resultado es la creación de un programa detallado con todas las tareas. a emprender y los recursos asignados para su realización. Además, durante el proceso de planificación y programación de las necesidades de mantenimiento, se deben desarrollar habilidades para discriminar las diferentes opciones (costo) de los recursos disponibles. (que se puede asignar para realizar una determinada tarea en un equipo específico (activo)), el lugar ideal de implementación de la tarea y el tiempo de inicio y ejecución. Esto determinará en gran medida las políticas de mantenimiento a nivel táctico. Las acciones a nivel operativo deben asegurar que tareas de mantenimiento son realizadas correctamente por técnicos seleccionados siguiendo los procedimientos descritos en una programación del tiempo y usar las herramientas correctas.

5.7.2 Etapa 2 Clasificación de los equipos

Una vez definidos los objetivos, y diseñado las responsabilidades y una estrategia de mantenimiento, es de vital importancia la discretización de los activos físicos de la organización en función de su criticidad, es decir, mayor o menor impacto en el sistema global de producción y/o seguridad de los sistema (objetivos de negocio). Hay muchas técnicas cualitativas y cuantitativas que ofrecen una base sistemática para clasificar un activo como crítico (C)/semicrítico (SC)/no crítico (NC), basado en evaluación probabilística del riesgo y obtención del número/índice de probabilidad de riesgo de activos (PRA/PRN) (Moubray 1997).

Los activos con el índice más alto se analizarán primero. En muchos casos no hay datos históricos en base a los cuales para obtener estas tarifas. En estos casos se puede utilizar técnicas más cualitativas con el fin de garantizar una adecuada niveles iniciales de efectividad en las operaciones de mantenimiento. El riesgo se define como el producto de la frecuencia por la consecuencia del fracaso. La frecuencia es el número de fallas. en un tiempo dado. La ponderación de varios factores, o criterios, es de importancia dependiendo de las necesidades de la organización

que se utiliza para cuantificar la consecuencia de la falla. Los criterios importantes dependen de cada organización donde seguridad, medio ambiente, producción, costos (operaciones y mantenimiento), frecuencia de fallas y promedio de reparación el tiempo son los más utilizados. Una vez clasificados los activos, en función de su criticidad se obtiene la matriz de criticidad (Fig. 10) (Crespo 2007).

5.7.3 Etapa 3 Análisis de debilidades en proyectos de alto impacto equipos

Después de completar la jerarquía de los activos físicos de la planta, en función de su criticidad (equipos críticos, semicríticos y no críticos), el próximo paso debe ser realizar una inspección visual-técnica que desglose todos equipos clasificados como críticos en la planta.

CRITICAL MATRIX									
FREQUENCY	1	SC	SC	C	C	C	C	C	C
	2	SC	SC	SC	C	C	C	C	C
	.	NC	SC	SC	SC	C	C	C	C
	.	NC	NC	SC	SC	SC	C	C	C
		NC	NC	NC	SC	SC	C	C	C
	N	NC	NC	NC	NC	SC	SC	C	C
		1	2	.	.	.	.	.	M
CONSEQUENCE									

Figura 10 Representación Genérica de una Matriz de Criticidad

Semicrítico: el equipo será inspeccionado brevemente, con un nivel más bajo de detalle, mientras que los activos no críticos no necesitarán ningún recurso de inspección por su impacto en el sistema, en caso de falla, no es significativo. Por lo tanto, el no crítico se permitirá que el equipo funcione hasta que ocurra una falla. Inspección preliminar de los equipos C y SC nos permite conocer el estado actual de funcionamiento de los equipos, deficiencias en el rendimiento, entorno de funcionamiento y toda otra información relevante que determine las necesidades específicas de mantenimiento. En esta etapa, como en las anteriores, es muy importante considerar la información proporcionada por cada uno de los operadores asignados al control y uso de equipos C y SC. En

los equipos críticos, previo al desarrollo de acciones que constituyen los planes de mantenimiento, es recomendable analizar los posibles fallos repetitivos y crónicos (desde los datos históricos del equipo) de los cuales la frecuencia de ocurrencia puede considerarse excesiva. Identificar las razones que provocan estos fallos crónicos permitirá, en el mejor de los casos, la eliminación del fallo modo, o si no es posible, por ejemplo, cuando el costo de la eliminación supera con creces el costo de la falla del equipo, el modo de falla puede ser controlado. La eliminación o control de los modos de falla contribuyen a lograr un alto retorno de la inversión inicial en el programa de gestión de mantenimiento. Esto también facilita las etapas posteriores de análisis y diseño de planes de mantenimiento, que requieren importante inversión de tiempo y recursos. Existen diferentes métodos para el análisis de debilidades en activos críticos; uno de los más comunes es el análisis de causa raíz (RCA). Es una metodología que sistemáticamente identifica las causas raíz primarias de las fallas y aplica más correcciones (soluciones) para eliminarlos de forma permanente. Las causas por las que ocurren las fallas se pueden clasificar en causas físicas, humanas o latentes. La causa física es la explicación técnica de por qué falla el activo. Las causas humanas incluyen errores humanos (acción u omisión) que dan lugar a causas físicas de falla. Finalmente, la causa latente incluye todas las deficiencias organizativas y de gestión que resultan en errores humanos, y las fallas se vuelven crónicas en sistemas y procedimientos no corregidos con el tiempo. Las causas de las fallas suelen ser la mayor preocupación en esta etapa del proceso de gestión del mantenimiento.

El RCA tiene múltiples aplicaciones, por ejemplo:

- Evitar proactivamente fallas recurrentes de alto impacto costos de operación y mantenimiento.
- Resolver reactivamente problemas complejos que afectan a una organización.
- Analizar fallas repetitivas de equipos o críticos procesos.
- Analizar los errores humanos en el diseño e implementación de procedimientos.

Algunos beneficios que se esperan del uso de RCA son:

- Reducción del número de incidentes, averías y desperdiciar.
- Reducción de gastos y producción diferida, asociada a fallas.
- Mejora de la fiabilidad, la seguridad y el medio ambiente protección.
- Mejora de la eficiencia, rentabilidad y productividad.

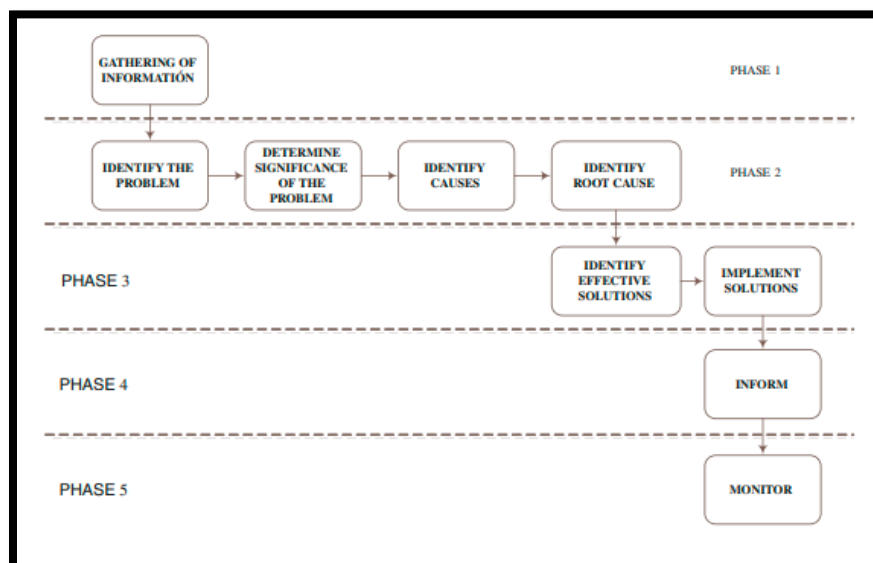


Figura 11 Metodología de RCA

RCA consta de cinco fases (Fig. 11) (DOE 1992). Como mostrado, la solución del problema se define directamente a partir de la definición del problema en sí, sin desarrollar un análisis exhaustivo de sus causas fundamentales. Para RCA, se pueden usar varias herramientas y técnicas para detectar la causa raíz de un problema. Las más comunes técnicas son:

- Árbol lógico (PROACT) (Latino y Latino 2002)
- Análisis de árbol de fallas (FTA) (Mobley 1999; Yang2007a, b)
- Diagrama de causa y efecto (DOE 1992)
- La técnica de los cinco porqués. (Cornell 2010)
- Diagrama de Ishikawa (Mobley 1999)

Hay muchas otras herramientas que se pueden utilizar para los RCA. La eficacia de su aplicación depende del nivel de información disponible y del detalle que se está analizado.

5.7.4 ***Etapas 4 Diseño de planes de mantenimiento y recursos requerido***

El diseño de planes de mantenimiento preventivo se puede dividir en dos partes principales:

- Información: Esto recopila datos de las computadoras para ser analizado. Identifica las diferentes funciones de los equipos analizados en su contexto operativo. Después, cada función está determinada por cualquier falla. Próximo, se identifican los modos de falla, esto es, el evento que precede a la decisión. Finalmente, y sólo si es necesario, las causas raíz de las fallas se analizarían si

fuera necesario (RCA, etapa 3). Con todos estos datos, evalúa las consecuencias de cada falla en cada una de las áreas (operacional, seguridad, medio ambiente y costo).

- La decisión: Establece deberes de prevención (técnicamente viables y económicamente rentables) para la Consecuencias de los modos de falla. Para cada modo de falla o causa raíz, es necesario determinar lo siguiente: la tarea de mantenimiento a realizar; la frecuencia con la que será hecho; la responsabilidad de ejecutarlo y los nuevos riesgos resultantes de la aplicación del plan de mantenimiento.

Una de las estrategias utilizadas en la industria para diseñar estrategias y planes de mantenimiento se conoce como RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). Este método es ampliamente utilizado y es conveniente para determinar las necesidades del mantenimiento de cualquier activo físico en su entorno operativo (Moubray 1997). También se ha definido (Rausand 1998) como un método para identificar las funciones de un sistema y cómo estas funciones pueden fallar, estableciendo en una manera preliminar, tareas de mantenimiento preventivo que necesitan ser aplicable y eficaz.

Como regla general, la filosofía RCM, da prioridad mantenimiento a los componentes críticos para el correcto funcionamiento de una planta (Lehtonen, 2006) y deja que los componentes no críticos operen hasta su falla. En esto instancia, se aplica el mantenimiento correctivo correspondiente.

El RCM tiene en cuenta el contexto operativo de equipos críticos y plantea la necesidad de un sistema de monitoreo programa y una actualización, (Barbera' et al. 2011) efectivo análisis RCM). Es fundamental identificar correctamente los componentes considerados críticos (Bloom 2006). A determinar la criticidad de la falla de un activo físico, dos aspectos deben ser considerados: su probabilidad de ocurrencia y severidad. La probabilidad de ocurrencia mide la frecuencia estimada de ocurrencia de la falla, mientras que la severidad mide la gravedad del impacto que esta falla pueda causar sobre la instalación. Esta evaluación se completa con la conocida técnica llamado "análisis de modos y efectos de falla" (FMEA). La metodología RCM propone la identificación de Modos de falla que preceden a las fallas potenciales de los equipos. Y la ejecución de un proceso sistemático y uniforme. Esto es para la selección de tareas de mantenimiento que son considerado útil y aplicable (Moubray 1997). El resultado son los grupos

recomendados de actividades de mantenimiento para cada activo. Esto definirá el contenido real de las actividades específicas a realizar y su frecuencia de ejecución. En concreto, la metodología de análisis RCM propone un procedimiento (Moubray 1997; SAE JA1011 1999) que, a través de la formulación de siete preguntas, ayuda a identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos como:

- 1 ¿Cuáles son las funciones que debe cumplir el activo y cuál es el desempeño esperado en su actual contexto operativo definido?
- 2 ¿Cómo puede fallar total o parcialmente el equipo?
- 3 ¿Cuál es la causa raíz de la falla funcional?
- 4 ¿Qué sucede cuando ocurre una falla?
- 5 ¿Cuál es la consecuencia de cada falla?
- 6 ¿Qué se puede hacer para prevenir o predecir la ocurrencia de cada falla funcional?
- 7 ¿Qué se puede hacer, si es posible, para prevenir o predecir la ocurrencia de falla funcional?

La aplicación del proceso RCM se regula a través de Normas SAE-JA1011 (1999) y SAE-JA1012 (2002). Una vez las actividades de mantenimiento que se consideran más eficientes para cada equipo crítico son seleccionados, él se establecerán las recomendaciones finales del análisis RCM y se llevará a cabo su implementación. A partir de estas recomendaciones finales, la redacción de la propuesta de plan o estrategia para el mantenimiento de la instalación debe crearse asignando los recursos necesarios. La implementación de un programa de mantenimiento preventivo ayudar a (Campbell y Jardine 2001; Bloom 2006) anticipar fallas y repararlas con un impacto mínimo en rendimiento del sistema, eliminando las causas de algunas fallas e identificando aquellas fallas que no comprometan sistema de seguridad. La necesidad de considerar nuevas técnicas de mantenimiento, agregando un posible modo de falla componente analizado inicialmente, o revisando la estrategia, entre otras cosas, hará conveniente revisar periódicamente actualizar el análisis RCM global para minimizar la obsolescencia de las recomendaciones hechas a lo largo del tiempo. El plan de mantenimiento preventivo generado debe especificar todos los recursos necesarios para implementarlo: datos técnicos, reglamentaciones, instalaciones especiales requeridas, repuestos, suministros, herramientas, equipos de monitoreo de las condiciones, auxiliares (respaldo), equipo de prueba, personal, etc. En el Al mismo tiempo, el diseño del plan de mantenimiento preventivo para un sistema dado debe tener en cuenta posibles restricciones en

el entorno operativo con el fin de diseñar real y planes ejecutables. Algunas de las restricciones que deben ser considerados son:

- Presupuesto asignado.
- Programación (tiempo disponible).
- Normas y reglamentos exigibles para el cumplimiento
- Condiciones ambientales de operación.
- Modos de trabajo.

5.7.5 *Etapa 5 Programación y optimización del mantenimiento en la asignación de recursos*

En esta etapa un cronograma detallado de todo el mantenimiento actividades deben realizarse, y las necesidades de producción en la escala de tiempo y el costo de oportunidad para el negocio durante la ejecución de las tareas debe tenerse en cuenta. La programación de las actividades de mantenimiento destinadas optimizar la asignación de recursos humanos y materiales recursos, debe minimizar el impacto en la producción. El programa de mantenimiento debe ser corto (\1 año), medio (1–5 años) y largo plazo ([5 años).

5.7.6 *Etapa 6 Control y evaluación del mantenimiento implementación*

La ejecución de las actividades de mantenimiento (una vez diseñadas, planificado y programado como se describe en las secciones anteriores) deben ser evaluados, y las desviaciones continuamente monitoreadas para perseguir los objetivos comerciales y los valores establecidos para los KPI de mantenimiento seleccionados de la organización. El control de la ejecución permite retroalimentar y optimizar el diseño de los planes de mantenimiento, por lo que mejorando su eficacia y eficiencia.

El diseño del sistema de información está orientado a recolectar y procesar la información exacta necesaria para satisfacer la información necesidades que conducen al logro de los objetivos básicos de manejo de mantenimiento. Estos son una mayor eficiencia y costos reducidos.

Los datos que luego serán analizados deben ser tan confiables como posible, es decir, el diseño de la hoja o la orden de trabajo de mantenimiento debe ser encontrado simple y estándar para los operadores y gerentes como este será el único dato útil y confiable disponible. Este problema de diseño es fundamental para el funcionamiento del sistema. Lo mismo ocurre con el resto de los documentos. que capturan los datos que componen el sistema.

5.7.7 Etapa 7 Análisis del ciclo de vida y las posibles renovaciones de equipos

La gran cantidad de variables que se deben manejar en estimar el costo real de un activo a lo largo de su vida útil crea un escenario de alta incertidumbre (Durairaj y Ong 2002). A menudo, el costo total del sistema de producción no es visible, en particular los costos asociados a la operación, mantenimiento, pruebas de instalación, capacitación 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), así, calculando el costo de estas funciones y aplicando las medidas adecuadas costo por la duración del ciclo de vida (Ahmed 1995). A través de un análisis del costo del ciclo de vida es posible determinar el costo de un activo a lo largo de su vida útil. El análisis de un activo típico podría incluir costos de planificación, investigación y desarrollo, producción, operación, mantenimiento y retiro del equipo (Yang 2007a, b). Los costos de adquisición de equipo (incluyendo investigación, diseño, prueba, producción y la construcción) suelen ser obvias, pero el análisis de los costos del ciclo de vida dependen crucialmente de los valores derivados de confiabilidad, por ejemplo, el análisis de la tasa de fallas, el costo de recambios, los tiempos de reparación, los costos de los componentes, etc. El análisis de los costos del ciclo de vida es necesario para una óptima adquisición de nuevos equipos (reemplazo o una nueva adquisición) (Campbell y Jardine 2001), ya que muestra todos los costos asociados con un activo (además del precio de compra), y permite a la gerencia desarrollar predicciones precisas.

5.8 Consideraciones del Modelo

El modelo propuesto incluye, además de las restricciones actuales, la aplicación de las nuevas tecnologías TIC en todas las etapas dentro de un ciclo de mejora continua. Con la aplicación de nuevas tecnologías de mantenimiento, el concepto de "e-mantenimiento" surge como un componente del término "e-manufactura" (Tsang et al. 1999). Esto promueve los beneficios de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación para crear entornos corporativos y distribuidos multi usuario. "E-Maintenance" se puede definir como un mantenimiento apoyo que incluye recursos, servicios y gestión necesarios para permitir la implementación de un proceso de toma de decisiones en mantenimiento. este apoyo incluye no solo tecnologías de Internet, sino también "e-mantenimiento" actividades (operaciones y procesos) tales como "e-monitorización", "e-diagnóstico", "e-prognosis", entre otros. Otro aspecto importante del modelo propuesto es la capacitación técnica y participación del personal en todos los niveles dentro la organización. La participación activa y comprometida de todo el personal involucrado en el área de mantenimiento

será un factor crítico para el éxito y la mejora continua. La información entre diferentes unidades de procesamiento debe ser lo más fácil y simple posible para una correcta interpretación e implementación.

8.1 ¿Por qué es importante el uso de la propuesta metodologías para apoyar la gestión del mantenimiento?

La importancia de las herramientas de análisis de causa raíz en el mantenimiento se basa en la necesidad de comprender las principales causas de falla sobre qué gestión u operaciones pueden tener algún control. Esto es para que puedan evitar la falla crónica y regresar a un plan de acción específico. La utilidad de esta metodología radica en que no solo pregunta "¿Qué pasó?" pero también pregunta "¿Por qué sucedió esto?" suceder, en lugar de centrarse en "¿quién tiene la culpa?" FMEA se puede utilizar en la etapa de análisis de debilidades de equipos críticos, donde se realiza una evaluación de las causas, modos de falla y efectos pueden ser relevantes. La identificación de los modos de falla es importante porque proporciona una descripción detallada de cómo ocurre el evento. FMEA toma un enfoque diferente y tiene como objetivo prevenir el fracaso de manera proactiva. Es un método sistemático para identificar y prevenir fallas de productos y procesos antes de que ocurran. No es así requieren un caso específico o evento adverso, sino más bien, un alto riesgo proceso que se elige para el estudio y donde un equipo interdisciplinario hace la pregunta "¿Qué puede ir mal con este proceso y cómo podemos prevenir fallas?" El uso de un solo método puede conducir a un análisis incompleto; por lo tanto, en algunos casos específicos puede ser apropiado herramientas de integración, especialmente cuando se trata de sistemas complejos, y se pueden lograr mejores resultados. De hecho, una de las combinaciones comunes para soportar el RCA. El análisis es FMEA y análisis de árbol de fallas (Li y Gao 2010). Por el aporte y valor agregado en el mantenimiento gestión, esta investigación ha propuesto todo un modelo que caracterizó el curso de acciones a implementar, para garantizar la eficiencia, eficacia y mejora continua del proceso de gestión.

5.9 Herramientas de software avanzadas para apoyar el mantenimiento gestión

La necesidad de implementar una herramienta de software que soporte la se justificará la gestión global del mantenimiento y la Se expondrán las principales ventajas obtenidas:

- Disponibilidad de información para la toma de decisiones: costo control, equipos críticos, repuestos, proveedores, personal o cualquier otro parámetro relevante.
- Gestión de recursos, planificación y seguimiento la ejecución del mantenimiento.
- Un software de gestión de mantenimiento permite la captura y uso de una gran cantidad de datos y parámetros. La principal característica operativas que cualquier herramienta de software de mantenimiento administración debe tener son:
- Creación o conexión con instalaciones de base de datos: técnica datos, estado operativo, costos relacionados y valor de los activos
- Almacenamiento y análisis de datos históricos de operaciones: fecha, duración, costo, operadores, equipos, repuestos, etc.
- Establecer niveles de alarma para ciertos parámetros.
- Planificación y gestión de tareas, recursos e inventario.
- Jerarquía de sistemas y equipos.
- Controlar el estado de cada orden de trabajo y ejecución de programas de mantenimiento preventivo.
- Informes.
- Análisis de fallas.

5.10 Integración de herramientas y habilitación para la computadora sistema

Es necesario generar una política común de integración a nivel todos los niveles de la organización, por lo tanto, todas las herramientas de software, para apoyar diferentes unidades de negocio y procesos de integración, debe lograr un lenguaje común que facilite el uso de multiusuario, generación de conocimiento, la gestión análisis de las unidades y la evaluación económica global que impacta en el negocio, entre otros. Por ello, la integración de estas herramientas de software con la base de datos existente en la organización (CMMS y otros sistemas EAM) es clave para el éxito de su implementación. La integración del sistema y la simplicidad de implementación son, y serán, factores decisivos en el desarrollo futuro de dicho software, es decir, en la evaluación de ella por una organización.

5.11 Selección de Repuestos Críticos

En cualquier tipo de industria, las empresas satisfacen, con sus actividades, demanda de un producto. La respuesta a esta demanda es con criterios de eficiencia (rentabilidad), que típicamente incluyen el costo mínimo y la máxima satisfacción del cliente. Esto traducido en mantenimiento significa minimizar inventario de piezas de repuesto y asegurar la disponibilidad de equipamiento requerido. Sin embargo, la complejidad de los sistemas dificulta la satisfacción de ambos criterios, y a veces incluso se opone. Desde el punto de vista técnico, cuantas más piezas de repuesto están disponibles en stock cuanto más asegura la disponibilidad de equipo. Desde el punto de vista económico, cuanto menos se almacenan repuestos, menos capital inmovilizado estará.

Entonces, es claro que el inventario de repuestos es importante, ya que representa un alto costo de almacenamiento cuando está presente, y cuando no está presente puede resultar en costos extremadamente altos por indisponibilidad. Por lo tanto, es necesario encontrar fórmulas que aseguren el nivel deseado de disponibilidad de equipos con el menor capital posible.

5.11.1 Aspectos a considerar en la selección de repuestos críticos

Muestra algunos aspectos clave a tener en cuenta al seleccionar las piezas de repuesto críticas. Estos siguen una secuencia lógica:

- **Equipos Críticos:** Utiliza la información de la matriz de criticidad para determinar qué repuestos son críticos, dependiendo de las consecuencias de la falla de los equipos a los que pertenecen. Así, el almacén de repuestos estará compuesto principalmente por equipos C y SC componentes y, en menor medida, componentes de equipos NC.

- Consumo: Después de analizar el historial de averías, o la lista de artículos comprados en períodos anteriores (uno o dos años), se puede determinar qué artículos se consumen regularmente. Todos aquellos elementos que se consumen regularmente y son de bajo costo deben ser considerados en la lista de repuestos críticos. Por lo tanto, los elementos de las bombas que no son críticos, pero que a menudo fallan, deben estar en stock (sellos, impulsores, sujetadores, etc.).
- Suministro a Plazo: Algunas piezas tienen una disponibilidad casi instantánea y constante de proveedores cercanos a la planta. Otros, sin embargo, están hechos para pedido, por lo que su disponibilidad no es inmediata, e incluso la entrega puede tardar meses. Las partes que pertenecen a críticos los equipos, donde la entrega no es inmediata, deben integrar la lista de repuestos críticos. Las otras partes, lo que lo hace mira que los equipos SC permanecen fuera de servicio por mucho tiempo, que aún no son equipos C, deben ser considerados igualmente en esta lista.
- Costo: El costo es crucial. En general, aquellos artículos de alto precio (líneas principales, grandes coronas) no deben almacenarse, sino estar sujetos a un sistema efectivo de mantenimiento predictivo.

En el esquema principal (Fig. 8), la definición de crítico piezas de repuesto se integra en la fase de diseño de la planificación, programación y ejecución del mantenimiento. Por lo tanto, puede entenderse cómo estas tres etapas se retroalimentan determinar los repuestos críticos. También es necesario aclarar que el análisis de criticidad y los puntos débiles son tenido en cuenta al determinar el repuesto crítico partes. Además, considerando todas las variables posibles, según el contexto, puede afectar de una forma u otra, la gestión óptima de los repuestos en una organización.

5.12 Principios del CMI en la gestión del Mantenimiento Global

El CMI es un proceso de diálogo y comunicación en todas las áreas de una organización incluyendo el área de mantenimiento, para la medida en que este proceso de comunicación funciona y logra una mayor participación, alineación y sinergia. La gestión de indicadores financieros y técnicos. permite a la empresa utilizar el mismo idioma en el mantenimiento gestión. Perspectivas financieras, clientes, procesos y aprendizaje, sugieren, por ejemplo, realizar cálculos como la disponibilidad en función de la media tiempo de reparación y tiempo medio de falla. Esto mejora la relación entre parámetros tales como producción, costos y disponibilidad. El objetivo final del CMI aplicado al mantenimiento gestión es transformar el mantenimiento estratégico objetivos para

planes de acción concretos basados en indicadores de gestión comparables. Estos son desarrollados desde las cuatro perspectivas de la metodología.

	Objetivos estratégicos	Indicadores (kpis)	Objetivos	Plan de Acción	Perspectiva
Misión y estrategia	Mejora de la eficacia de los costes de mantenimiento	Costo de mantenimiento por unidad de producción (%)	Real: (X)% Objetivo: (X-1)%	Asegurar la adquisición adecuada de datos y el análisis de criticidad de equipo	Financiera
	Mejorar el tiempo de reparación y calidad de mantenimiento	Fallas repetitivas. MTTR	Fallos repetitivos < X Reducir MTTR en Y %	Análisis de fallos de programación. Soporte de mantenimiento mejorado	Clientes
	Mejorando el mantenimiento proceso y su documentación	cumplir con reglas de regulación	Certificado de mantenimiento antes de dd.mm.aaaa	Desarrollar procedimientos y inspección	Proceso Interno
	Garantizar niveles adecuados de formación y educación para cumplir la misión	Nivel de entrenamiento para cada nivel de mantenimiento	Definición de niveles de entrenamiento requerido para cada nivel de mantenimiento	Definición de niveles de formación necesarios para cada mantenimiento formación y evaluación de nivel	Aprendizaje

Tabla 2 Aplicación general del enfoque CMI a la gestión del mantenimiento

El proceso implica el establecimiento de indicadores, metas y acciones. planes a alcanzar. De esta manera la gestión puede comenzar alineándose con los objetivos del negocio, especialmente si el desarrollo de indicadores clave pasa por una serie de funciones indicadores, los resultados que se obtienen en los diferentes procesos del negocio estarán más cerca, y, por lo tanto, más fácil de medir y controlar. El CMI permite el despliegue y la implementación completa de la estrategia de mantenimiento en todos los niveles de la empresa. Esto fomenta la participación de todos los interesados en el logro de los objetivos estratégicos y el logro de alineación en toda la organización, desde la transformación de los planes estratégicos a planes de acción concretos.

5.13 Falla Funcional

“Una falla funcional es definida como la inhabilidad del equipo para mantener un estándar deseado de rendimiento (función)” (Crespo, 2007). Mas detalladamente, “es una ocurrencia no previsible, que no permite que el activo alcance el estándar de ejecución esperado en el contexto operacional en el cual se desempeña, trayendo como consecuencia que el activo no pueda cumplir con su función o la cumpla de forma ineficiente” (Parra, 2008). La falla funcional puede ser total, es decir, cubre una perdida global de funcionamiento, o también pueden ser situaciones en la que el bien continúa funcionando, pero se desempeña fuera de los limites deseados.

5.14 Efectos de la Falla

“Los efectos de las fallas describen que sucede cuando se presenta un modo de falla” (Moubray, 2004). Esta descripción de lo sucedido dada la ocurrencia de un modo de falla son los tiempos de inactividad, los efectos en la calidad del producto, evidencia que la falla ha ocurrido y amenazas a la seguridad y el ambiente. Además, la descripción de estos efectos debería incluir toda la información necesaria para soportar la evaluación de las consecuencias de la falla (A. Crespo, 2007) – Los efectos de las fallas no son lo mismo que consecuencias de las fallas dado que el efecto de la falla responde a la pregunta “¿Qué sucede?”, mientras que la consecuencia responde a “¿Cómo afecta?” (J. Moubray, 2004) – es por esto que las descripciones de los efectos de la falla deben registrar los siguiente:

- : • Evidencias (si es que hay) que la falla ha ocurrido.
- Amenazas (si es que hay) para la seguridad y el ambiente.
- Efectos (si es que hay) en la producción u operación.
- Daños físicos (si es que hay) causado por la falla.
- Reparaciones necesarias para corregir los efectos de la falla.

5.15 Mantenimiento Correctivo (CM)

El mantenimiento correctivo es el “mantenimiento llevado a cabo después de la detección de la falla para efectos de restauración” (ISO 14224, 2016). Para los sistemas que están bajo la estrategia de CM, los componentes son operados hasta la falla por lo que necesita de acciones de renovación o reparación para ser desarrolladas. “El CM es el enfoque más antiguo para mantenimiento y hoy en día todavía se adopta en algunas industrias, especialmente para equipos que no son críticos para la seguridad ni cruciales 35 para el rendimiento de producción de la planta, y cuyos repuestos están fácilmente disponibles y no son caros” (Zio, 2013).

5.16 Mantenimiento Preventivo (PM)

El mantenimiento preventivo es el “mantenimiento llevado a cabo para mitigar la degradación y reducción de la probabilidad de falla” (ISO 14224, 2016). Esta acción se lleva a cabo a través de un mantenimiento cíclico según una edad de reemplazo, esto debido a que el “PM abarca todas las acciones realizadas en un intento de retener un ítem en condiciones específicas al proporcionar inspección sistemática, detección y prevención de fallas incipientes” (E. Zio, 2013). Este mantenimiento preventivo tuvo sus primeros estudios por el año 1960, por lo tanto, desde aquellos años que una enorme cantidad de modelos y métodos de optimización han sido

introducidos con el fin de reducir las fallas, por razones de seguridad y apagones no programados por razones económicas.

5.17 Mantenimiento según condición (CBM)

El mantenimiento según condición es “el mantenimiento preventivo basado en la evaluación de la condición física, esta evaluación de condición puede ser por observación del operador, conducido de acuerdo con un cronograma, o por monitoreo de condición de los parámetros del sistema” (ISO 14224, 2016). Este monitoreo permite una inspección del tiempo de vida del activo a través de la revisión de parámetros como la vibración, la temperatura, la lubricación, contaminación entre otros factores. “La motivación del CBM es que el 99% de las fallas de los equipos sean precedida por ciertos signos, condiciones o indicaciones de que una falla va a ocurrir. Por lo tanto, CBM es necesario para una mejor gestión de la salud del equipo, para costos del ciclo de vida más bajo, para evitar fallas catastróficas etc.” (R. Ahmad, 2012).

5.18 Mantenimiento Predictivo (PrM)

El mantenimiento predictivo es “el mantenimiento basado en la predicción de la futura condición de un ítem estimado o calculado de un conjunto o definido de información histórica y conocidos parámetros operaciones futuros” (ISO 14224, 2016). Este mantenimiento es uno de los últimos principios y lineamientos a seguir, es comúnmente conocido como la mejora del mantenimiento según condición, ya que si bien mantiene según la condición en la que se encuentre el activo, es una actualización, ya que el conocimiento del actual estado de degradación de los componentes (diagnóstico) es complementado con una predicción de su futuro comportamiento “la estimación precisa provee tiempo para oportunamente planear y preparar la reparación o el reemplazo del componente” (E. Zio, 2013).

5.19 Fundamentos de Confiabilidad

La teoría de la confiabilidad es una herramienta para predecir el comportamiento operacional, que tiene por objetivo minimizar el costo global de una operación industrial durante todo el ciclo de vida. Es importante en este ámbito la correcta cuantificación de los costos ocultos, como es por ejemplo los costos de ineficiencia, que como se mencionó antes responden al gasto por el hecho de que las instalaciones y equipos no respondan a los estándares de capacidad productiva, Cano, M (2016).

El costo de ineficiencia esta dado por:

$$Ci = Cf * T \quad (4)$$

Donde T es el tiempo de la detención y Cf es el costo de falta, que está dado por la diferencia entre lo que se deja de facturar o vender (F) y los costos variables (Cv) que se dejan de gastar durante el periodo de detención (T).

$$Cf = F - Cv \quad (5)$$

5.20 Teoría de Confiabilidad

Las fallas de un equipo en una instalación industrial pueden ser provocadas por causas claramente asignables, que pueden ser estudiadas y solucionadas por medio de control de los hechos que la provocaron. Por otro lado, las fallas también se pueden dar por causas no sistemáticas que son propias del componente, equipo o sistema y que requieren un análisis más complejo (Arata, 2009).

Reconociendo que el tiempo al cual falla un elemento puede ser modelado como variable aleatoria, la confiabilidad se define como la probabilidad que un elemento funcione, sin fallar, durante un tiempo determinado bajo condiciones ambientales y de entorno preestablecidas. Se entiende entonces que un elemento puede estar funcionando o detenido, que, una vez establecidos estos estados, la confiabilidad de un elemento es función únicamente del tiempo, cuyas características dependen única y exclusivamente de la distribución de probabilidad con que la falla puede modelarse (Arata, 2009).

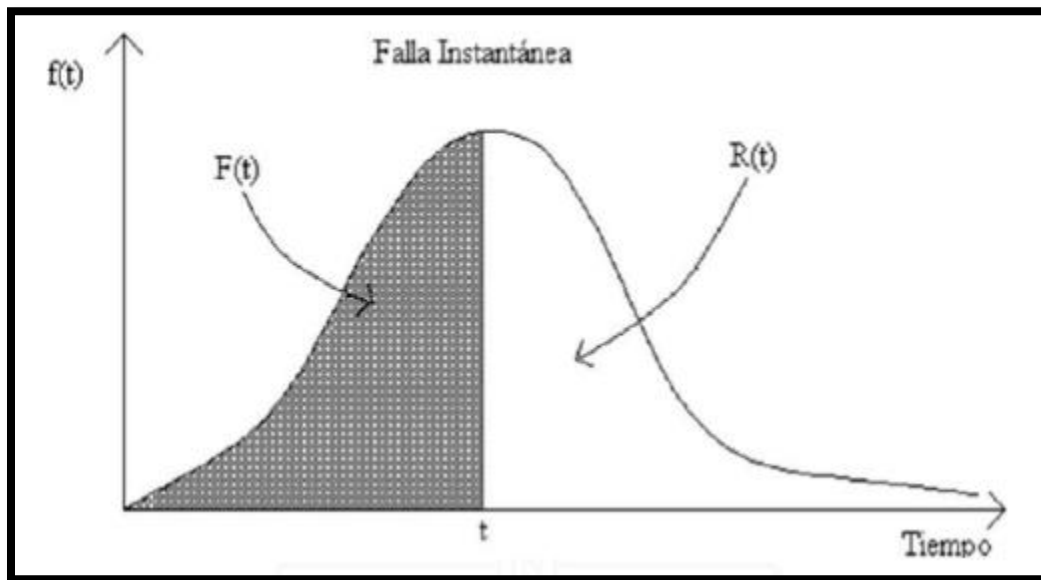


Figura 12 Función de densidad de probabilidad de falla (Cano, M 2016)

Sea $f(t)$ función de densidad de probabilidad de falla, $F(t)$ función acumulada de falla para el intervalo de tiempo $[0, t]$ y $R(t)$ la confiabilidad, se tiene: La probabilidad acumulada de falla es:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (6)$$

La Confiabilidad está dada por:

$$R(t) = \int_0^\infty f(t)dt = 1 - \int_0^t f(t)dt = 1 - F(t) \quad (7)$$

Conocida entonces la ley de probabilidad que explica el comportamiento sobre la falla de un componente es posible definir el concepto de tiempo medio entre falla para equipos reparables o tiempo medio hasta la falla para equipos no reparables. Por definición MTTF (Mean Time to Failure) o MTBF (Mean Time Between Failure) viene dado por:

$$MTBF = \int_0^\infty t * f(t)dt = \int_0^\infty R(t)dt \quad (8)$$

La confiabilidad de un elemento puede ser caracterizada a través de distintos modelos de probabilidades. Este modelamiento depende de la etapa de la vida útil en que se encuentre el equipo. Se define la tasa de falla $\lambda(t)$, como la probabilidad de tener una falla del elemento entre los instantes t y $(t+dt)$ en condición de que el sistema haya sobrevivido hasta el tiempo t (Arata, 2009).



Figura 12 Ciclo de vida de un equipo (Cano,M 2016)

En la fase de rodaje la tasa de falla es decreciente y el modelo matemático en esta situación se representa con la distribución Weibull. En la fase de vida útil, la tasa de fallas es constante y se representa con la distribución exponencial negativa. En la fase de desgaste es posible modelar las fallas por medio de una distribución normal (Arata, 2009). A continuación, se detalla la forma de

los modelos matemáticos para las distribuciones Weibull y Exponencial negativa:

Distribución Weibull:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{a} \left(\frac{t-\gamma}{a} \right)^{\beta-1} \quad (9)$$

$t - \gamma > 0$, γ es el parámetro de inicio.

$\beta > 0$ es el parámetro de forma.

$a > 0$ es el parámetro de escala

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{a}\right)^\beta} \quad (10)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{a} \left(\frac{t-\gamma}{a} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{a}\right)^\beta} \quad (11)$$

Distribución Exponencial: Es importante mencionar que aquellos componentes que se encuentran en la etapa de vida útil, pueden ser modelados por una distribución exponencial (tasa de falla constante).

$$\lambda(t) = \lambda \quad (12)$$

Luego su función de confiabilidad es de la forma:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (13)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (14)$$

5.21 Confiabilidad en Sistemas

La confiabilidad de un sistema no es otra cosa que la probabilidad de no falla, que depende del comportamiento de los componentes individuales, por lo que es fundamental establecer la relación para cada configuración, ya que, si se conoce el comportamiento de cada componente, se puede deducir el comportamiento del sistema, es posible jerarquizar sobre la base de componentes críticos (Arata, 2009). Se define como sistema en serie, cuando la falla de uno de sus elementos (acontecimiento independiente), determina la falla del sistema en un conjunto. La confiabilidad del sistema en serie, corresponde a la probabilidad que todos los elementos no fallen en un tiempo determinado, en otras palabras, la confiabilidad del sistema corresponde al producto de las probabilidades de éxito de cada uno de los componentes. Existen dos tipos de redundancia en paralelo, la redundancia parcial es la configuración en la que un grupo de elementos del sistema es capaz de soportar el buen funcionamiento del sistema. La redundancia total se da cuando un elemento del sistema por sí solo, es capaz de soportar el buen funcionamiento del sistema. Entonces la probabilidad de falla de un sistema en redundancia total ocurre cuando fallan simultáneamente todos los elementos que lo componen, Cano, M (2016).

Por otro lado, para un sistema en redundancia parcial la confiabilidad del sistema considera que una cantidad mínima de elementos funciona. Otro caso de redundancia son los sistemas en stand by, en donde un elemento del sistema funciona, mientras que los demás están en espera, los que intervienen cuando el elemento falla. Finalmente, un indicador muy utilizado y de fácil comprensión es la disponibilidad, que se define, matemáticamente, como el cociente entre el tiempo en que el sistema está realmente en funcionamiento y el tiempo total, que incluye el tiempo en funcionamiento más el tiempo de reparación (Arata, 2009). Se entiende entonces por disponibilidad a la aptitud de un sistema de estar en un estado para cumplir una función requerida Cano, M (2016). En base a lo anterior la disponibilidad A, está dada por:

$$A = \frac{UT}{UT+DT} \quad (15)$$

Donde UT (o up-time) representa el tiempo en que el sistema está disponible para el funcionamiento y DT (o down-time) representa el tiempo fuera de servicio imputable a causas técnicas. Por otro lado, considerando los antecedentes mencionados anteriormente se define la disponibilidad esperada como:

$$Disponibilidad\ esperada = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (16)$$

Donde MTBF es el tiempo medio entre fallas, y MTTR o tiempo medio de reparación, es el tiempo medio requerido de reparación de un componente, que se obtiene como el tiempo promedio de las intervenciones que se han realizado al mismo componente. Cabe destacar que en este indicador la disponibilidad está presente, solo el efecto de la falla del elemento. En general, el tiempo fuera de servicio de una instalación industrial durante cierto periodo es el resultado de la suma del tiempo debido a las intervenciones de mantenimiento preventivo y del tiempo debido a las operaciones de mantenimiento correctivo. Para el cálculo de la disponibilidad se necesitan los siguientes datos estadísticos: T_i =tiempo de funcionamiento en cada ciclo i de funcionamiento-reparación. t_i =tiempo de reparación de cada ciclo i de funcionamiento reparación Cano, M (2016).

N =número de ciclos de funcionamiento-reparación, en análisis.

En vista de lo anterior se define:

$$UT = \sum_{i=1}^N T_i \quad (17)$$

$$DT = \sum_{i=1}^N t_i \quad (18)$$

Luego reemplazando en la ecuación (3.12) se tiene:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{(\sum_{i=1}^N T_i + \sum_{i=1}^N t_i)}$$

6 Caso de Estudio

6.1 La era del Cemento y su Historia

A partir de la segunda mitad del siglo XVIII, se va configurando el escenario de la revolución industrial en Europa. Las ciudades crecen rápidamente y es necesario construir casas, puertos, estaciones ferroviarias y caminos. Los británicos perfeccionan el descubrimiento de los romanos y el inglés John Smeaton observa que la argamasa procedente de la caliza arcillosa es la que tiene mayores propiedades para endurecer bajo el agua. En 1824; Joseph Aspdin logra la mezcla del cemento Portland, así llamado por la semejanza de su color con el de las piedras de ese lugar de la isla. El uso de este material se extiende por toda Europa y sus cualidades, obtenidas a través del proceso de calcinación extremadamente altos, comienzan a ser requeridas por el mundo entero. Se entra así a la Era del Cemento (Melon,2009).

6.2 Un Material de Propiedades inigualables

A principios del siglo XX, 21 mil toneladas de cemento Portland entran cada año por los puertos chilenos para construir el país que se va sacudiendo del pasado para entrar también a la modernidad. Las marcas Alsen y White son importadas para caminos y obras de hidráulica por compañías tales como Wessel, Duval, Saavedra, Grace y Cía., Williamson, Balfour y Cía., entre otras (Melon,2009).

El primer cemento fabricado en Chile, “Cemento León”, era de baja calidad, ya que la calcinación de su materia prima se hacía en hornos verticales con temperaturas deficientes. Existían también fábricas en La Cruz, La Palmilla y La Calera, pero que no lograban elaborar un producto comparable al cemento Portland que se importaba desde el extranjero.

Fue el ingeniero Carlos Barroilhet quien comprendió que Chile contaba con la materia prima necesaria para fabricar cemento de buena calidad. En 1904 comienza a esbozar esta idea que rápidamente capta la atención de Alfredo Cox, casado con Isabel Caces, propietaria de la Hacienda el Melón en la zona de la Calera, y logra involucrarlos en este nuevo desafío para producir cemento en el país (Melon,2009).

Barroilhet viaja a Europa a comprobar la buena ley del material y a hacer contactos para traer las maquinarias y los técnicos necesarios a Chile.

En Julio de 1906 la Fábrica de Cemento El Melón se constituye en entidad legal a través del decreto presidencial que autoriza su existencia. La primera reunión de directorio se realiza al mes siguiente, cuando se registran los nombres de los accionistas y se aprueba el contrato con F.L.

Smidth & Co. De Copenhague, Dinamarca, para el montaje de la planta de cemento en La Calera.

En 1907 llega a Valparaíso el vapor danés Brattingsborg cargado de los elementos necesarios para la fábrica El Melón. En el barco vienen también los técnicos, acompañados de sus mujeres y familias, a mover en suelo chileno las maquinas cementeras. Como además de artefactos, casas de madera prefabricadas, útiles y enseres, los daneses traen hasta sus perros, gatos y canarios, en Valparaíso, con humor, bautizan al buque como la bíblica “Arca de Noé” (Melon,2009)

El ingeniero danés P.H Ipsen estuvo a cargo de la instalación y puesta en marcha de toda la infraestructura y maquinaria importada para la primera fábrica de cemento en Sudamérica: dos hornos rotativos (gran novedad al respecto de la tecnología existente), un molino tubular para clinker, dos molinos de bolas tipo Kominor para clinker, cinco molinos para materia prima, dos secadores de carbón, un molino para carbón, dos secadores de piedra, dos chancadores de mandíbula para yeso y un chancador de rodillos para yeso. Todo comenzó a ser movido por dos generadores de fuerza a vapor, tecnología de punta en aquella época.

El 20 de diciembre de 1908, la Fábrica de Cemento El Melón produce el primer saco de cemento Portland en Sudamérica. Durante su primer año de trabajo, la empresa produce algo más de 250.000 sacos. Aunque la importación de este material sigue siendo necesaria por algún tiempo, la industria nacional lo hace cada vez más disponible para el crecimiento del país (Melon,2009).

6.3 El Proceso Productivo del Cemento Hoy

1.-Recepción de caliza: La piedra caliza proveniente de canteras ubicadas en la cuarta región es recibida en la planta de La Calera y llevada hacia las canchas de acopio por medio de cintas transportadoras.

Estas calizas con un aporte importante de carbonato de calcio, fierro, alúmina y sílice sirven para optimizar la mezcla de calizas a ser utilizadas en el horno

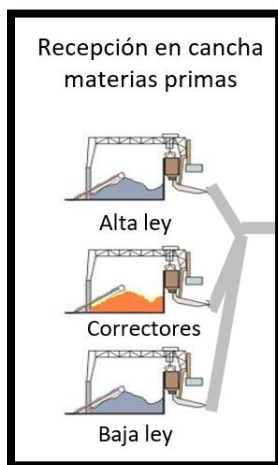


Figura 13 Recepción de caliza

2.-Molienda de caliza: la mezcla formada por las distintas calizas y elementos correctores, es enviada a dos grandes molinos de bolas con el objeto de obtener un producto homogéneo y muy fino llamado crudo. Este material es almacenado en silos de acopio.

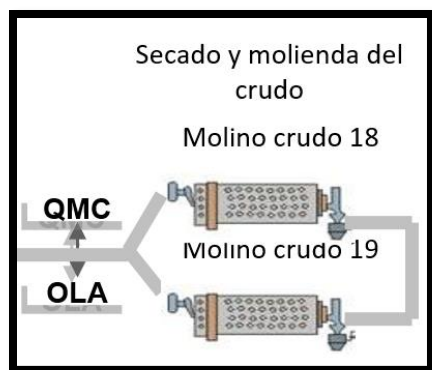


Figura 14 Secado y molienda del crudo

3.-Calcinación y clinkerización: desde los silos de crudo, el polvo de caliza se lleva al horno rotatorio, un enorme cilindro ligeramente inclinado con una longitud de 52 metros. El horno tiene una torre de precalentamiento y un precalcinador para optimizar el uso de energía térmica. En su interior, el material y los gases alcanzan temperaturas de más de 2.000 °C, con lo cual producen distintas reacciones químicas, como la calcinación de la caliza y posterior reacción con el resto de los elementos presentes en el crudo. El resultado es el clinker, un material semivitrificado con altas propiedades aglutinantes al mezclarse con el agua. Las emisiones de material particulado son controladas mediante precipitadores electrostáticos, los cuales permiten cumplir con la norma medio ambiental.

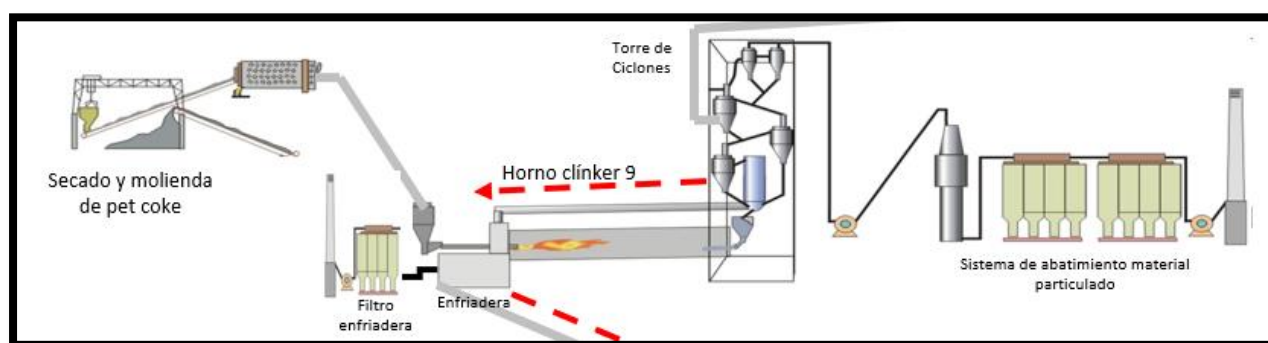


Figura 15 Calcinación y clinkerización

4.-Acopio de clinker: El clinker producido en los hornos es acopiado en silos o canchas de almacenamiento, para su posterior uso en la fabricación de cemento.

5.-Llegada y acopio de yeso: Una materia prima relevante es el yeso, que permite regular el fraguado para que el cemento no se endurezca mientras se trabaja

6.-Llegada y acopio de Puzolana: Otro de los componentes necesarios para la fabricación de cemento es la puzolana, material de origen volcánico que se extrae desde canteras ubicadas en la Región Metropolitana. Esta materia prima es acopiada en canchas de almacenamiento y posteriormente transportada en su estado natural hacia un equipo encargado de reducir su contenido de humedad mediante un proceso de secado

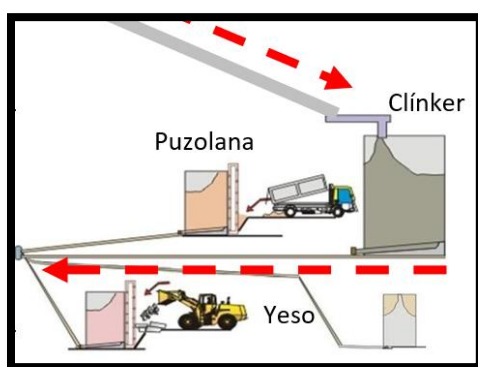


Figura 16 Acopio de clinker, yeso y puzolana

7.-Molienda de cemento: clinker, yeso y puzolana son dosificados, mezclados y molidos, en dos grandes molinos de bolas de dos cámaras y diafragma intermedio, que permiten reducir el tamaño de los componentes hasta el polvo fino denominado cemento. La calidad y propiedades del mismo quedan determinadas por la participación de cada uno de estos componentes, así como la fineza final del producto.

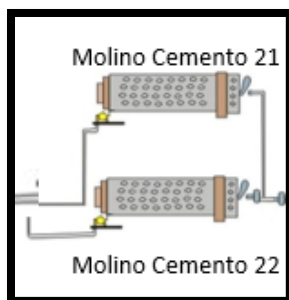


Figura 17 Molienda de cemento

8.-Envasado y despacho: El cemento es enviado desde la molienda, por sistemas de transporte neumático y mediante una red de cañerías, hasta los silos de almacenamiento. Los distinto tipos.

De cemento producido son sometidos a pruebas de resistencia y análisis controlados en laboratorios propios y externos. El envasado se realiza en bolsas de papel, para lo cual se cuenta con dos modernos sistemas de llenado de sacos y dos paletizadores automáticos.

Además, se despacha en Big Bag, que son contenedores de 1500 kg. También se utiliza el despacho a granel vía ferrocarriles o camiones (Melon,2009).

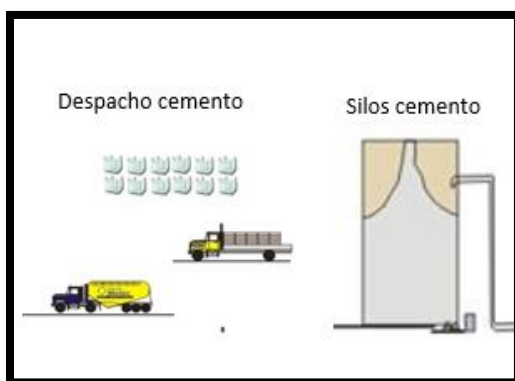


Figura 18 Almacenamiento, envasado y despacho

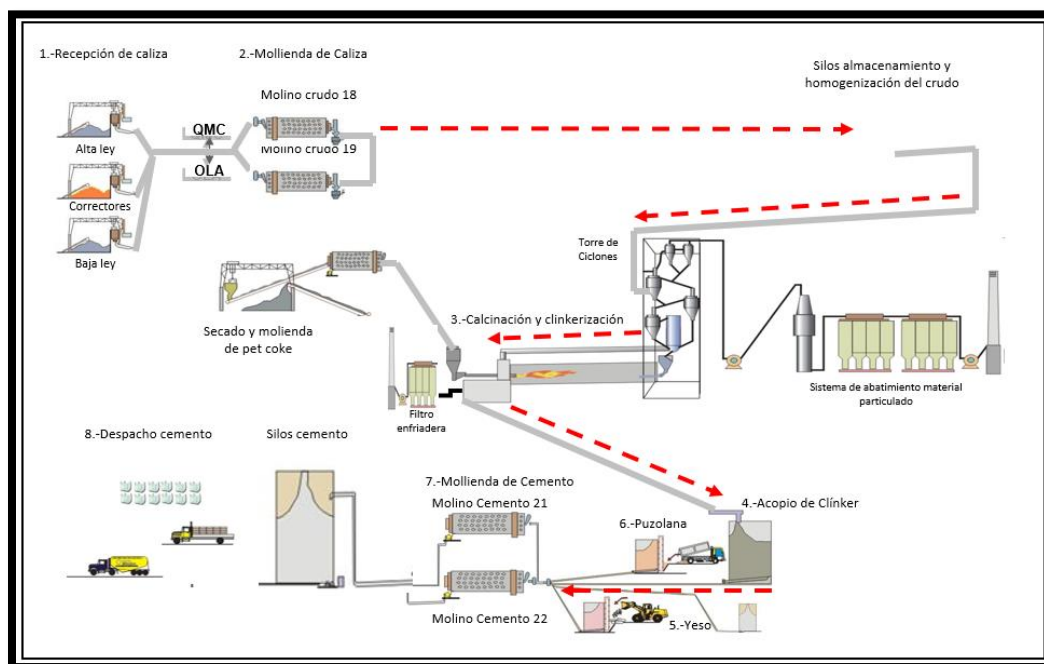


Figura 19 El proceso productivo del cemento hoy (Fuente: Melón, 2009)

En cuanto al horno, presenta un nuevo diseño que corresponde a uno de los más modernos entre los distintos modelos que existen en la actualidad. Entre sus innovaciones se cuenta un sistema de recuperación de calor, llamado precalentador, que permite un consumo energético apreciablemente más bajo que en los hornos convencionales. Otros adelantos notables corresponden al control electrónico de los procesos de fabricación, lo que se traduce en una calidad más estable y uniforme, y la reducción sustancial de las partículas sólidas emitidas hacia el exterior a través de un sistema de filtros "10queconstituye un excelente progreso en favor de la ecología", según lo señaló la "Revista de IDIEM" (Instituto de Investigaciones Ensayos de Materiales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile). Los nuevos equipos pertenecen a la marca danesa F. L. Smidth, la misma a que pertenecía el primer horno con que se iniciaron las actividades a comienzos de siglo con una capacidad de unas 120 toneladas diarias de producción. El horno inaugurado en 1983 pertenece al modelo Folax de F. L. Smidth y tiene 49 metros de longitud, menos que la mitad de un horno tradicional. Su capacidad es de 1.250 toneladas por día de clinker (producto básico con que hace el cemento). Como dato ilustrativo, anteriormente, con cuatro hornos largos, la fábrica tenía una capacidad de 1.700 toneladas por día. En particular, el horno N°8, de 123 metros de largo, produce 670 toneladas al día. Con la ampliación, Cemento Melón tiene ahora la capacidad instalada para producir sobre un millón de toneladas al año.

Entre los adelantos más notorios, el nuevo horno dispone del intercambiador de calor de cuatro etapas y el precalcinador. Los intercambiadores de calor son sistemas colocados en alineación vertical a la salida de los gases del horno, por cuya boca superior ingresa la materia prima cruda mientras al mismo tiempo circulan los gases resultantes de la cocción del clinker. Ese calor residual precalefacciona a los materiales crudos. La ventaja principal de este sistema es que se reduce el consumo de combustible (carboncillo fino molido y secado). Esto se produce de la siguiente forma: los gases de salida, a medida que ascienden, van entregando su calor residual a la materia prima cruda durante su descenso, debido al contacto íntimo entre uno y otro.

El precalcinador es un horno especial, intercalado en la línea del intercambiador de calor, en que se realiza un 85% de la descarbonatación de la materia prima. L. Smidth presentó su primera instalación industrial con precalcinación a principios de 1974. Si bien la precalcinación significa algún ahorro de combustible, sus ventajas principales están en que mejoran notablemente la estabilización en la marcha del horno y además permiten reducir la longitud del silo. Una ventaja adicional muy importante es que este precalcinador permite quemar combustibles de nivel inferior.

El consumo térmico total de la unidad horno precalcinador - intercambiadores es de 800 calorías por kilo de clinker, en comparación con 1150 de los hornos antiguos, En este sentido, corresponde el nivel de consumo más eficiente que se alcanza en la actualidad. (Melón,1983)

El nivel de inversión es de US\$60 millones (Melon,2009).



Figura 20 Vista en altura del Horno N°9 (Fuente: Melón, 2022)

6.4 Modelo de Mantenimiento Melón

Se puede definir el mantenimiento como un Ciclo de Gestión de Calidad que permite impactar en la sostenibilidad de los procesos productivos a través de la atención de los activos del negocio asignando los recursos humanos y materiales en los cuales el mantenimiento pasa a convertirse en un departamento cuya función es la de producir una mayor disponibilidad de equipos e instalaciones al menor costo posible. Cemento Melón, ubicada en la ciudad de La Calera, Chile, posee una Planta matriz con capacidad de producción de 600.000 T/A de clinker en donde según Tirado “es dentro de la industria cementera un dispositivo de vital importancia, pues se constituye en un elemento esencial para la producción de cemento” (2022, p.3), y tres Estaciones de molienda cercanas al borde costero para la recepción de Clinker importado.

Hoy la opción de importar Clinker se ha vuelto más complejo e inestable y por lo tanto la empresa más competitiva del mercado es aquella que pueda obtener el

máximo rendimiento del modelo tradicional por medio de sus hornos rotatorios para la producción de Clinker.

La Compañía define un proyecto de Excelencia Operacional con foco en el Mantenimiento teniendo como meta objetivo el aumento de la disponibilidad del horno N°9 para cumplir con la producción de 600.000 T/A y que solo ha sido alcanzada en el año 2016, a partir de ese año ha presentado un deterioro significativo en los indicadores de Disponibilidad y altos tiempos de Mantenibilidad, indicadores que son una medida directa de la productividad de la Planta y sus costos de parada son significativos, no solo por el costo de los consumibles o partes sino por la producción perdida (Gil, 2012,p.9), afectando significativamente en el resultado financiero de la compañía ,siendo hoy su mayor ventaja comparativa y diferenciadora respecto de aquellas empresas que mantienen un modelo de importación de Clinker para las estaciones de Molienda y que según García “para ser competitivos, es necesaria la aplicación de herramientas que aseguren la consecución de los objetivos estratégicos de la organización”(2013,p.1). Cementos Melón en el año 2021 realiza un análisis de las brechas del modelo de mantenimiento el cual posee 6 bloques definidos por:

- Managment: Organizar y manejar los recursos humanos, financieros y materiales del área para optimizar la calidad de sus servicios y de su rendimiento técnico y económico
- Predictivo: Seguir y medir la condición del equipo, analizando tendencias e identificando las necesidades de mantenimiento para el equipo, considerando las necesidades de la

producción

- **Planificación:** Definir metodología, mano de obra, repuestos y otros recursos para alcanzar un mantenimiento eficiente y seguro.
- **Programación:** Definir el programa de trabajo según las prioridades, mano de obra, recursos y disponibilidad operacional de los equipos.
- **Ejecución:** Completar los trabajos con el más alto nivel de calidad, seguridad, eficacia, con el mínimo costo y maximizando disponibilidad del equipo.
- **Mejoramiento:** Reducir el trabajo de mantenimiento reparativo, aumentando el ciclo de vida del equipo con mejores materiales y prácticas para mejorar técnica y económicamente el rendimiento.

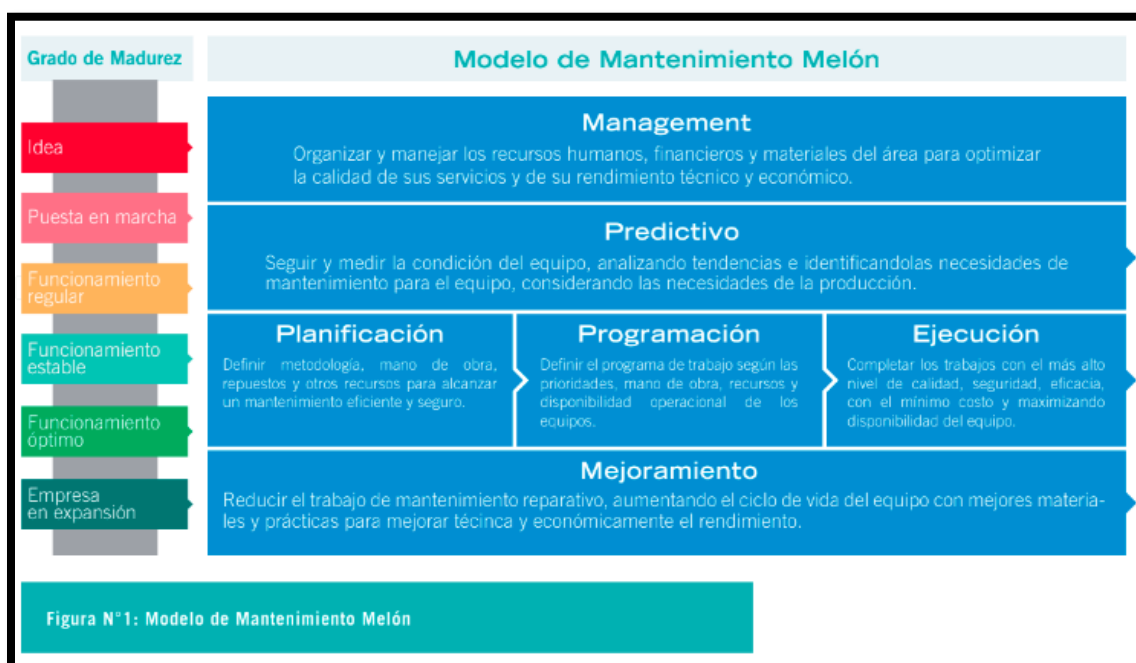


Figura 21 Modelo de Mantenimiento Melón (Fuente, Melón 2023)

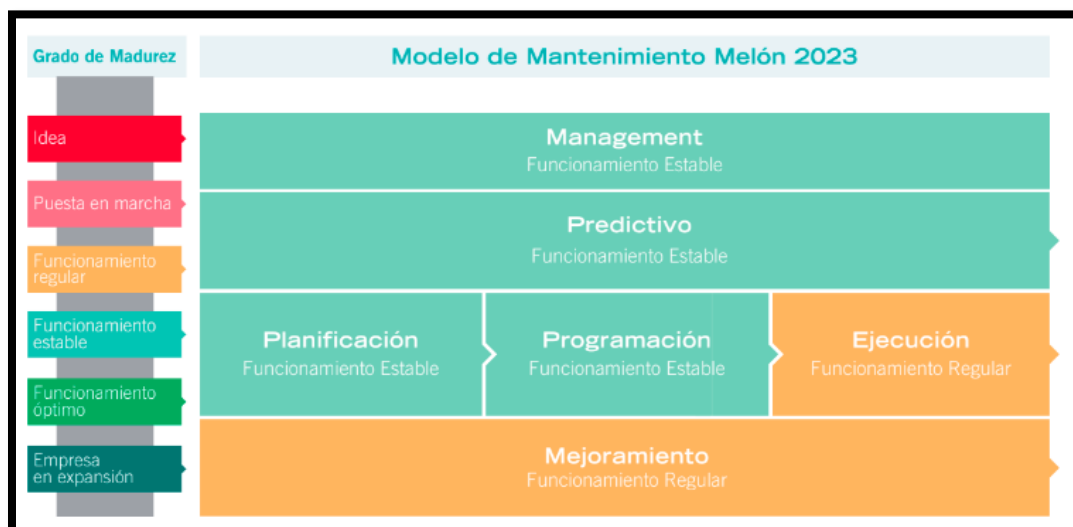


Figura 22 Grado de Madurez del modelo de mantenimiento (Fuente, Melón 2023)

7 Metodología

La presente metodología tiene como objetivo guiar el proceso de mejora de la estrategia de mantenimiento en la línea de producción del Horno N°9, con el fin de optimizar la eficiencia operativa y reducir los costos de ineficiencia asociados con el activo. Esta metodología se basa en un enfoque integral que combina la revisión del marco teórico, el análisis de datos históricos, la identificación de modos de falla, el modelo y simulación de funcionamiento de la línea de calcinación y la elaboración de un presupuesto anual.

7.1 Recopilación y Análisis de Datos

La recopilación de datos se realizará a través de la descarga de información obtenida del Sistema de Gestión de Paros (SGP) que posee la empresa en la cual es posible identificar el tiempo de buen funcionamiento (TBF), tiempo entre reparación (TTR) y disponibilidad calculada a través de la data histórica en la cual se abordará desde el año 2016 hasta Julio del año 2023.

Posterior a la descarga de datos se realizará una limpieza de los datos y depuración según las condiciones de operación que permitan establecer un criterio de horno en funcionamiento u horno en reparación para evitar funcionamiento anidados entre reparación, para ello se define como criterio un horno en buen funcionamiento superior a las 12 horas posterior a la reparación.

Posterior a la depuración se aplicará el método de mínimos cuadrados para el ajuste de curvas y la priorización de los equipos que representen el mayor tiempo de reparación a través del método de Pareto con la finalidad de enfocar la recomendación de propuesta de mejoramiento al modelo de mantenimiento Melón posterior al análisis.

El análisis de datos se dividirá en dos segmentos, el primero será por año calendario, es decir, los indicadores calculados se enmarcan en periodos anuales desde el año 2016 a julio del 2023, el segundo segmento será entre mantenimientos mayores, es decir, la planta establece un régimen de mantenimiento mayor que tiene un rango de 99 a 1.233 horas entre el 19 de junio del 2015 y el 31 de Julio del 2023

Ambos segmentos de periodos analizados se calcularán en formato Excel los siguientes indicadores:

Campañas de Mantenimiento Mayores	19JUL15 19JUN16	08JUL16 02OCT17	10OCT17 02ABR18	02MAY2018 29SEP19	20NOV19 28JUN20	17JUL20 31AGO21	19SEP21 22JUL22	04SEP22 31JUL23
Año Calendario[Hr]	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
TBF[Hr]	Es el tiempo de buen funcionamiento para la producción de clinker							
TTR[Hr]	Es el tiempo de reparación histórico							
Circunstancial [Hr]	Es el tiempo que no afecta a la disponibilidad debido a un evento externo							
Programado [Hr]	Es el tiempo que por decisión no afecta a la disponibilidad (máxima capacidad de stock de producción, mantenimiento mayor)							
Mantenimiento Mayor [Hr]	Es el tiempo que establece el ciclo de mantenimiento mayor							
A(t)	Disponibilidad histórica							
MTBF [Promedio]	Tiempo medio de funcionamiento histórico							
MTTR [Promedio]	Tiempo medio de reparación histórico							
A(t)	Disponibilidad promedio histórica							
MTBF[Weibull]	Tiempo medio de funcionamiento por distribución de Weibull							
MTTR[Weibull]	Tiempo medio de reparación por distribución de Weibull							
R(año 2016)	Confiabilidad respecto del MTBF del año 2016							
A(t)	Disponibilidad por MTBF y MTTR de distribución de Weibull o Normal							
Max TBF	corresponde al máximo tiempo de funcionamiento para cada periodo							

Tabla 3 Indicadores analizados

7.2 Recopilación y Análisis de los Costos Globales

Para la recopilación de los costos globales se obtienen desde el ERP JDEdwards el total de proyectos (CAPEX) desde los años 2016 hasta una proyección 2023, respecto de los costos operativos (OPEX) se solicita al área de control de gestión correspondiente a los mismos periodos anteriormente comentados. Respecto del costo de ineficiencia se utiliza la ecuación:

$$Ci = Cf * T \quad (4)$$

Donde T es el tiempo de la detención y Cf es el costo de falta, que está dado por la diferencia entre lo que se deja de facturar o vender (F) y los costos variables (Cv) que se dejan de gastar durante el periodo de detención (T):

$$Cf = F - Cv$$

7.3 Evaluación y Determinación de un Modelo y Simulación de Funcionamiento del Proceso de Producción de Clinker

Para la determinación del modelo de funcionamiento y reparación del horno N°9 se establece como base histórica el año 2023 desde el 01 de enero al 11 de septiembre el cual es el periodo más cercano y representativo del modo de falla observada y preferente (datos también depurados).

Posteriormente se establece un ajuste de curva con distribución de Weibull tanto para su funcionamiento como para su mantenibilidad y de esta forma se calcula el MTBF y MTTR respectivamente.

A su vez se realiza simulación en un horizonte de tiempo 182.815 horas para evaluar el comportamiento de la disponibilidad y se toma una muestra del año 2024 en el cual se realiza un total de 1.000 iteraciones a través de Visual Basic para evaluar la condición de disponibilidad del periodo de interés.

Con ello se establecen criterios para disponer de un grado de probabilidad de ocurrencia y su vez parámetros de funcionamiento con distintos niveles de rendimiento con la finalidad de evaluar la capacidad de producción anual esperada.

8 Análisis de Disponibilidad, Mantenibilidad y Confiabilidad del Horno N°9 anual

A partir de los registros históricos depurados correspondiente al Horno N°9 de Cementos Melón Planta La Calera para el periodo enero 2016-julio 2023, se obtienen los siguientes resultados:

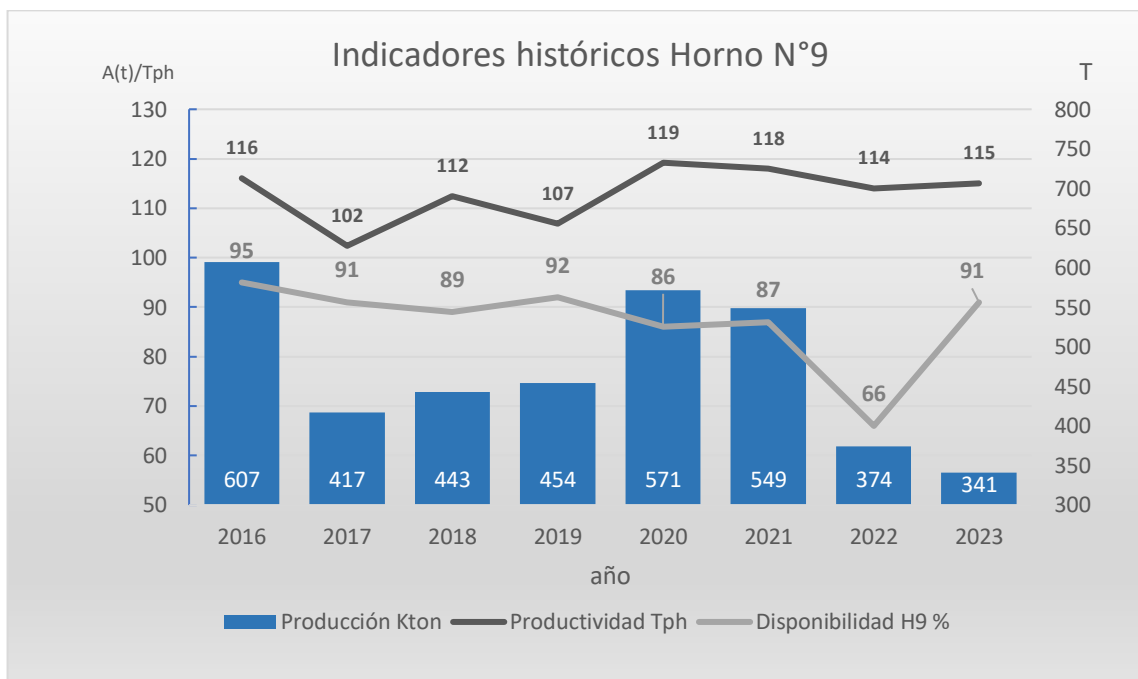


Gráfico 1 Indicadores históricos Horno N°9

El indicador de disponibilidad se ha visto afectado desde el año 2017 a la fecha no pudiendo cumplir con el KPI de presupuesto el cual es de un 93%, a continuación, se realizará un detalle anual.

8.1 Año 2016

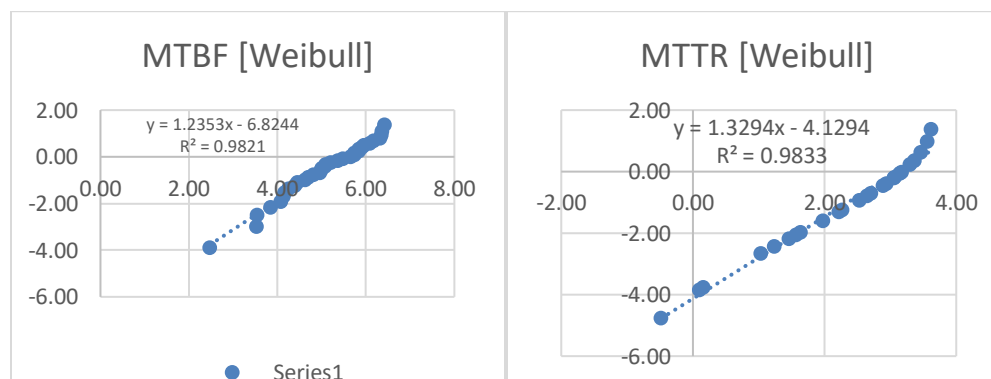


Gráfico 2 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Año Calendario [Hr]	8.784
TBF[Hr]	7.875
TTR[Hr]	378
Circunstancial [Hr]	73
Programado [Hr]	458
A(t)	95,4%
MTBF [Promedio]	232
MTTR[Promedio]	14,53
A(t)	94,1%
MTBF[Weibull]	234,19
MTTR[Weibull]	20,54
R(2016)	39,9%
A(t)	91,9%

Tabla 4 Indicadores año 2016

La disponibilidad del año 2016 fue de un 95,4% en función a los datos históricos depurados y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 94,1% a su vez el MTBF y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 91,9%.

El año 2016 es el mejor año en cuanto a nivel de disponibilidad para el horno N°9 con un total de 7.875 horas de funcionamiento.

Causa Aparente	TTR	%	%acc
C323CY54	123	33%	33%
C326WF01	79	21%	54%
C324ES02	46	12%	66%
C328ES01	39	10%	76%
C324FA02	24	6%	82%
CO Alto	21	6%	88%
C326BP01	14	4%	92%
C410TF04	10	3%	94%
C832TF04DH01	9	2%	97%
Control Eléctrico	6	2%	98%
C323CY51	4	1%	100%
C86	1	0%	100%
Error de Operación	1	0%	100%
Total, horas	378		

Tabla 5 Detenciones del año 2016

Las causas más significativas del año 2016 son:

- C323CY54: Ciclón 54, ubicado en el sector precalcación en el cual se realiza la preparación de crudo y que su modo de falla se relaciona con sobrellenado y “atollo” de material.
- C326WF01: Coriolis alimentador de carbón ubicado en el sector precalcación en el cual se realiza la inyección de carbón hacia el horno y que su modo de falla se relaciona a falla de componentes mecánicos atascados impidiendo el giro del alimentador.
- C324ES02: Filtro electrostático cámara N°2, ubicado en sector aguas debajo de horno N°9 el cual se utiliza para la captura de polvo fino de clinker, el modo de falla se relaciona a control eléctrico.
- C328ES01: Filtro FE21 el cual se encuentra ubicado aguas debajo de horno N°9, el

modo de falla se asocia a una explosión en sector enfriadera y desplome de techo del mismo.

- C324FA02: Ventilador principal de tiro para la producción de clinker, su modo de falla se asocia a eventos electrónicos (trip magnético de VDF) y “pegaduras” en aspas del ventilador ocasionado vibraciones altas para su funcionamiento.

8.2 Año 2017

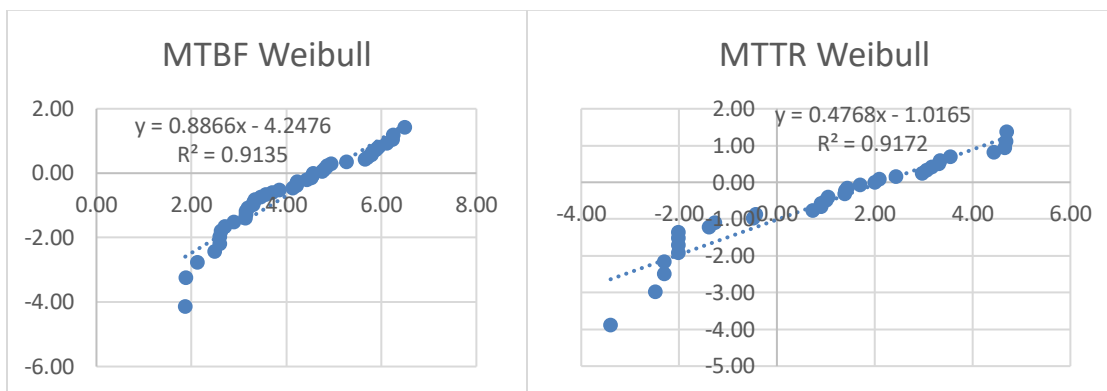


Gráfico 3 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Año Calendario	8.760
TBF [Hr]	6.019
TTR [Hr]	624
Circunstancial [Hr]	40
Programado [Hr]	2.076
A(t)	90,6%
MTBF [Promedio]	137
MTTR [Promedio]	18
A(t)	88,2%
MTBF [Weibull]	127,8
MTTR [Weibull]	18,5
R(año 2016)	16,5%
A(t)	87%

Tabla 6 Indicadores año 2017

La disponibilidad del año 2017 fue de un 90,6% en función a los datos históricos depurados y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 88,21% a su vez el MTBF y

MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 87%.

El año 2017 inicia un ciclo de eventos reparativos mayor al año 2016.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C324VS01	173	28%	28%
C327CC01	110	18%	45%
C326KI01	110	18%	63%
C200CN01	85	14%	77%
C328ES02	28	5%	81%
C326DR01	28	4%	86%
C323CY53	24	4%	89%
C324DG03	20	3%	92%
C324FA01	16	2%	95%
C324FA02	8	1%	96%
C323WF01	6	1%	97%
C322PS01	5	1%	98%
C327CR01LU01	5	1%	99%
C326KP03	3	0%	99%
C324TW01NZ01	2	0%	100%
C309BE01	1	0%	100%
Sin Clasificar	0	0%	100%
C322WF01	0	0%	100%
Total	624		

Tabla 7 Detenciones del año 2017

Las causas más significativas del año 2017 son:

- C324VS01: Variador de frecuencia de ventilador principal asociado a alarmas de interlock asociados a “Trip Magnético” , “switch in G freq 1 mseg” y “Alarma FE12J09_SEPR_ALL >mbar”, destaca este modo de falla con un total de 11 veces en el año.
- C327CC01: Sobre llenado del Horno por avalancha de material proveniente de Torre de ciclones provocando una detención significativa de 110 horas en el año

2017

- C326KI01: Desprendimiento de refractarios en metro 15 de Horno N°9 en el cual se realiza una reparación de 5 metros de ladrillo refractario.
- C200CN01: Evento asociado en sector materias primas en el cual equipo nave grúa puente presenta falla en motores para el movimiento de materias primas en la fase de crudo.
- C328ES02: Evento asociado a material extraño en sector rastra el cual produjo una acumulación de material.

8.3 Año 2018

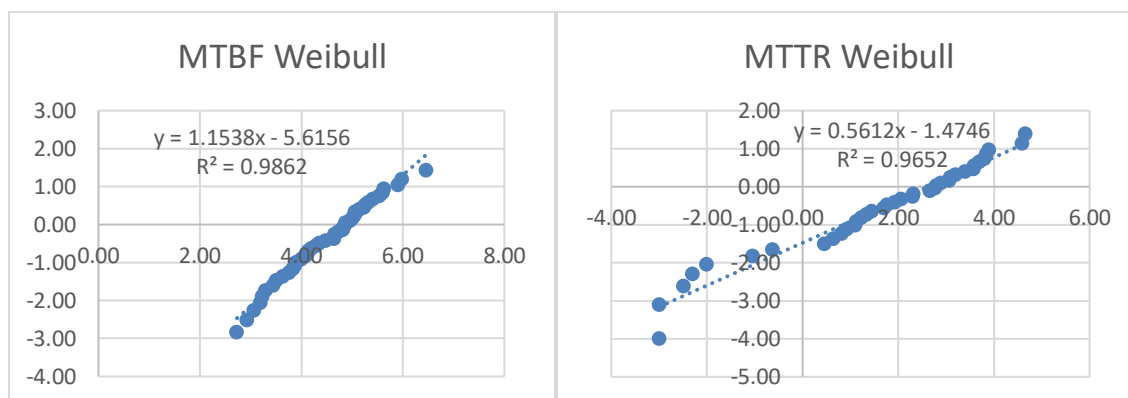


Gráfico 4 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Horas Calendario	8.760
TBF	5.872
TTR	690
Circunstancial	1478
Programado	720
A(t)	89%
MTBF[Promedio]	125
MTTR [Promedio]	18
A(t)	87%
MTBF[Weibull]	124
MTTR [Weibull]	23
R (2016)	13,9%
A(t)	84%

Tabla 8 Indicadores año 2018

La disponibilidad del año 2018 fue de un 89% en función a los datos históricos depurados y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 87% a su vez el MTBF y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 87%.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C326KI01	258	37%	37%
C323CY54	90	13%	50%
C327CC01	66	9%	60%
C323CY52	51	7%	67%
C326BP01	46	7%	74%
C324FA02	45	6%	81%
Inestabilidad Horno	35	5%	86%
C327HU01PU03	30	4%	90%
C324DG01	24	4%	94%
C323CY53	18	3%	96%
C327CR01	11	2%	98%
C327MC13	10	1%	99%
C322DC03RA01	3	0%	100%
C326DR01PU01	2	0%	100%
C322PS01	0	0%	100%
C309BE01	0	0%	100%
C832TF04	0	0%	100%
C326	0	0%	100%
CO Alto	0	0%	100%
Total	690		

Tabla 9 Detenciones del año 2018

Las causas más significativas del año 2018 son:

- C326KI01: Horno N°9 con un total de 5 eventos en el año en los cuales se puede destacar un reemplazo de polín de una de las bases de soporte (105,3 hrs), un alza de temperatura en el metro N°27 el cual se alude a caída de ladrillos refractarios (97,8 hrs) y 2 eventos por caída de material desde el sello de alimentación (38,9 hrs).
- C323CY54: Ciclón 54 con un total de 4 eventos en el año y que el factor común de los cuatro eventos es “atollo” (sobre acumulación de material en la fase de

precalcinación).

- C327CC01: Enfriadera con un total de 4 eventos en el año y que el factor común se asocia al sistema hidráulico para el movimiento de las parrillas móviles (mecanismo de movimiento en traslación para el transporte de clinker).
- C323CY52: Ciclón 52 el cual se encuentra en la torre de precalcinación en donde su causa se relaciona a “atollos” (sobre acumulación de material en la fase de precalcinación).
- C326BP01: Coriolis de MP el cual se desarrolla un reemplazo por un total de 46,4 hrs.
- C324FA02: Ventilador de tiro principal con un total de 9 eventos en el año con múltiples factores asociados al variador de frecuencia y alzas de vibraciones.

8.4 Año 2019

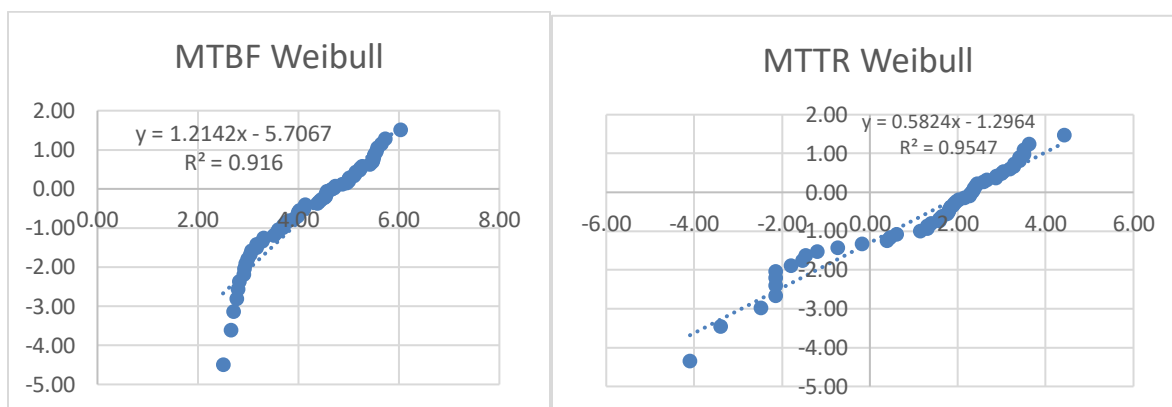


Gráfico 5 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Horas Calendario	8.760
TBF	6.597
TTR	599
Circunstancial	311
Programado	1253
A(t)	92%
MTBF[Promedio]	105
MTTR[Promedio]	11
A(t)	90%
MTBF [Weibull]	103,11
MTTR [Weibull]	14,5
R (2016)	8,2%
A(t)	88%

Tabla 10 Indicadores año 2019

La disponibilidad del año 2019 fue de un 92% en función a los datos históricos depurados y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 90% a su vez el MTBF y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 88%.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C327HU01	122	20%	20%
C327	83	14%	34%
C324FA02	83	14%	48%
C324DC01DG01	30	5%	53%
C324ES01	30	5%	58%
C322PS01	29	5%	63%
C323CY51	28	5%	68%
C309BC01	27	4%	72%
C324TW01VV01	26	4%	77%
C323	21	3%	80%
C327CR01	21	3%	84%
Horno detenido	18	3%	87%
C407CM01	18	3%	89%
C327CC01	17	3%	92%
C324CM01	16	3%	95%
Investigando causa	11	2%	97%
C326KI01	5	1%	98%
C323CY52	5	1%	98%
C324PU03	4	1%	99%
C309VN01	2	0%	99%
C324CM02	2	0%	100%
Sensor	1	0%	100%
C32	0	0%	100%
C324VS01	0	0%	100%
Trip Magnético VDF	0	0%	100%
C328	0	0%	100%
C324TW01DG01	0	0%	100%
CO Alto	0	0%	100%
C324DC01	0	0%	100%
Total	599		

Tabla 11 Detenciones del año 2019

Las causas más significativas del año 2019 son:

- C327HU01: Enfriadera con un total de 6 eventos en el año y que el factor común se asocia al sistema hidráulico por fugas de aceite el cual impide el movimiento de las parrillas móviles (mecanismo de movimiento en traslación para el transporte de clinker).
- C327: Pared caliente la cual se encuentra en la salida del horno N°9 y que producto de acumulación de material (clinker) supera el nivel térmico aceptable generando roturas.
- C324FA02: Ventilador de tiro principal con un total de 11 eventos en el año y con factor común asociado a vibraciones altas con síntomas de desbalanceo.
- C324DC01DG01: Rastra transportadora en la cual se indica un corte de cadena
- C324ES01: Filtro electrostático cámara N°1, ubicado en sector aguas debajo de horno N°9 el cual se utiliza para la captura de polvo fino de clinker, el modo de falla se relaciona a control eléctrico.
- C322PS01: Válvula de alimentación de bomba transportadora “Flux”.
- C323CY51: Ciclón 51 ubicado en sector de precalcinación la cual tiene como evento un “atollo”.
- C309BC01: Cinta transportadora de materia prima la cual tiene como evento un “atollo”.
- C324TW01VV01: válvula reguladora de agua para filtro principal la cual genera un alza de temperatura de este filtro.
- C323: Reemplazo de quemador de horno N°9 el cual inyecta el combustible principal para la transformación de crudo a clinker.

8.5 Año 2020

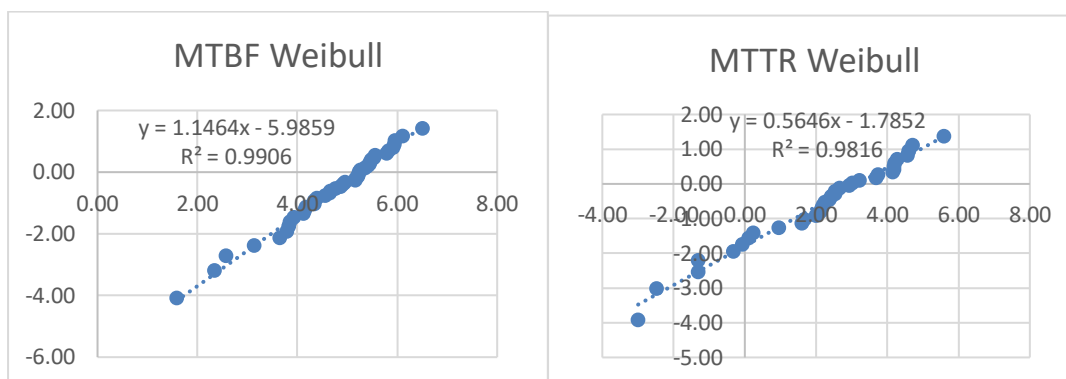


Gráfico 6 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Horas Calendario	8.784
TBF	7.159
TTR	1.169
Circunstancial	37
Programado	419
A(t)	86%
MTBF [Promedio]	170
MTTR[Promedio]	43
A(t)	80%
MTBF[Weibull]	176,42
MTTR[Weibull]	38,6
R (2016)	27,0%
A(t)	82%

Tabla 12 Indicadores año 2020

La disponibilidad del año 2020 fue de un 86% en función a los datos históricos depurados y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 80% a su vez el MTBF y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 82%.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C326KI01	661	57%	57%
C323CY54	186	16%	72%
C327CC01	78	7%	79%
C327FT01	66	6%	85%
C322BE02	40	3%	88%
C309	20	2%	90%
C328DG02	19	2%	91%
C322WF01	15	1%	93%
C832TF02	13	1%	94%
C613SC02	11	1%	95%
C327HU01PU01	11	1%	96%
C322PS01	10	1%	97%
Investigando causa	9	1%	97%
C324FA02	8	1%	98%
C324DC01DG02	7	1%	99%
C324VS01TF01	5	0%	99%
C320PL02	5	0%	100%
C32	3	0%	100%
C324FA01	2	0%	100%
Sin Clasificar	0	0%	100%
C324DC01	0	0%	100%
Total	1169		

Tabla 13 Detenciones del año 2020

Las causas más significativas del año 2020 son:

- C326KI01: Horno N°9 el cual representa el 57% de las horas de falla con un total de 661 hrs y 5 eventos en el año asociados principalmente a caída de ladrillos refractarios (489,18 hrs) y 2 eventos asociados a roturas en sello de alimentación (171,88 hrs).
- C323CY54: Ciclón 54 con un total de 4 eventos en el año y que el factor común de los cuatro eventos es “atollo” (sobre acumulación de material en la fase de precalcación).
- C327CC01: Enfriadera con un total de 2 eventos en el año relacionado con acumulación de materia en cámara CIS la cual recibe el clinker desde el horno.

8.6 Año 2021

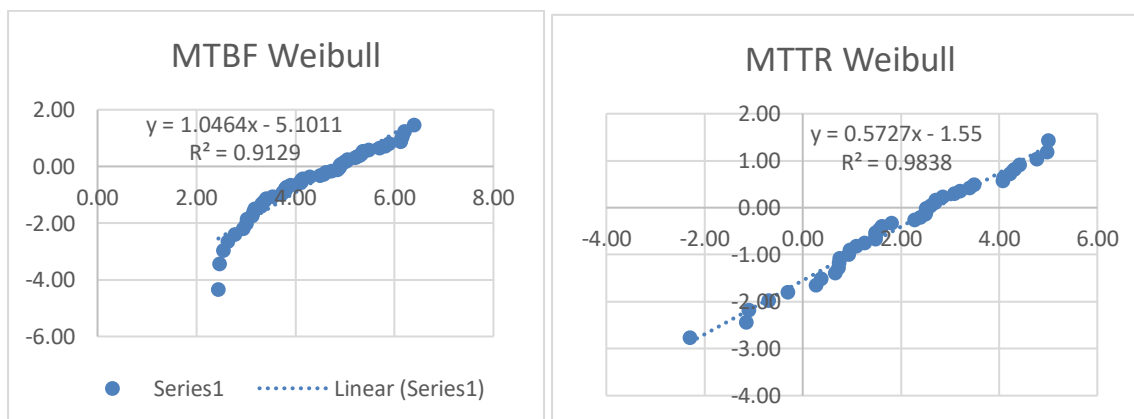


Gráfico 7 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Hora Calendario	8.760
TBF	7.153
TTR	1.033
Circunstancial	114
Programado	460
A(t)	87%
MTBF [Promedio]	135
MTTR [Promedio]	32
A(t)	81%
MTBF [Weibull]	128,61
MTTR [Weibull]	24,01
R (2016)	15,9%
A(t)	84%

Tabla 14 Indicadores año 2021

La disponibilidad del año 2021 fue de un 87% en función a los datos históricos depurados y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 81% a su vez el MTBF y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 84%.

Causa Aparente	TTR	%	%acc
C326KI01	727	70%	70%
C327CC01	76	7%	78%
Giros	34	3%	81%
Bajo stock de material	33	3%	84%
M17	30	3%	87%
C324FA02	22	2%	89%
C612DG01	17	2%	91%
C324DG01	15	1%	92%
C324FA01	15	1%	94%
C324CM01	12	1%	95%
C322BE01	11	1%	96%
C327CR01	11	1%	97%
C323CY52	9	1%	98%
C322PP01	6	1%	99%
C322PS01	4	0%	99%
C831BI01	4	0%	99%
C831SU02	4	0%	100%
C327FA03	2	0%	100%
C327FA02	1	0%	100%
C322SC01	0,33	0%	100%
C326PU03	0,10	0%	100%
C324PU03	0,10	0%	100%
Total	1033		

Tabla 15 Detenciones del año 2021

Las causas más significativas del año 2021 son:

- C326KI01: Horno N°9 el cual representa el 70% de las horas de falla con un total de 727 hrs de los cuales 6 eventos tienen relación con caída de ladrillos refractarios (546 hrs) ,4 eventos relacionados con alzas de temperaturas a las bases de soportación del horno rotatorio (162 hrs) y 3 eventos relacionados con avalancha y salida de material al exterior proveniente del sello de alimentación (19 hrs).
- C327CC01: Enfriadera en la cual existen un total de 5 eventos relacionados con problemas en sistema hidráulico.
- Giros: Horno en funcionamiento a la espera de alimentación.

8.7 Año 2022

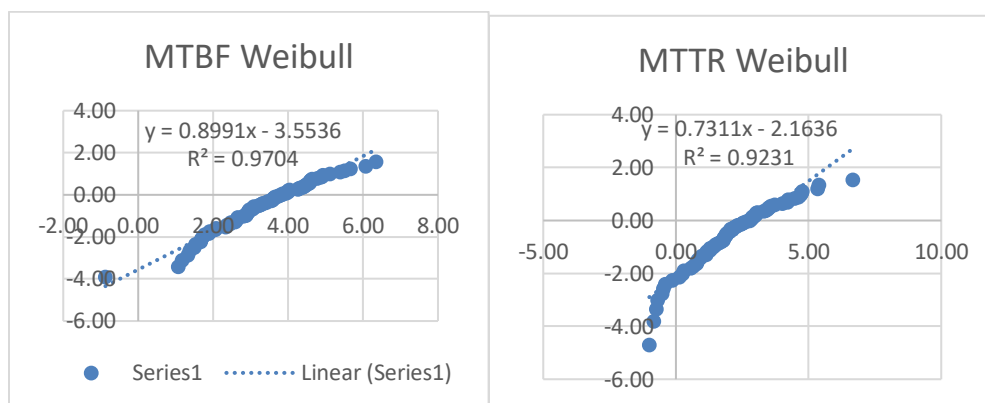


Gráfico 8 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Año Calendario	8.760
TBF	5.050
TTR	2.656
Circunstancial	9
Programado	1.045
A(t)	66%
MTBF	59
MTTR	34
A(t)	63%
MTBF [Weibull]	54,81
MTTR [Weibull]	23,46
R (2016)	2,1%
A(t)	70%

Tabla 16 Indicadores año 2022

La disponibilidad del año 2022 ha sido la más baja desde el año 2016 con un 66% en función a los datos históricos depurados y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 63% a su vez el MTBF por distribución de Weibull y MTTR por distribución Weibull indica un nivel de disponibilidad de 70%.

Causa Aparente	TTR	%	%aAcc
C326KI01	1548	58%	58%
C327CC01	527	20%	78%
C323CY54	117	4%	83%
C323CY52	79	3%	86%
C326DR01MT01	67	3%	88%
C327	36	1%	89%
C322DC03	34	1%	91%
C327CR01	34	1%	92%
C322PS01	23	1%	93%
C324DC01DG03	22	1%	94%
C309CB01	21	1%	94%
Rastra	21	1%	95%
C324FA02	20	1%	96%
Corte de energía interno	18	1%	97%
Soplador Axial	14	1%	97%
M17	13	1%	98%
Mantenición programada	13	0%	98%
C323CY53	9	0%	99%
C324CM01	9	0%	99%
C322CY01RA01	8	0%	99%
C326KP03	7	0%	99%
Filtro 81	4	0%	100%
C327FA02	3	0%	100%
Roturas	2	0%	100%
C324CM02	2	0%	100%
C328FA02	1	0%	100%
C309BE01	1	0%	100%
C322DC01RA01	1	0%	100%
C324DC01YT02	1	0%	100%
C322PP01	1	0%	100%
C326WF01	0,5	0%	100%
C324SC03	0,36	0%	100%
Total	2.656	0%	100%

Tabla 17 Detenciones del año 2022

Las causas más significativas del año 2022 son:

- C326KI01: Horno N°9 el cual representa el 58% de las horas de falla con un total de 1548 hrs de los cuales existe un evento significativo no solo del año en cuestión sino de todo el periodo analizado en donde acontece después de un mantenimiento mayor de 43,5 días en el cual se realiza un reemplazo de virola una fractura en una de las soldaduras realizadas para dicho efecto teniendo una reparación de 786,4 hrs al final del último trimestre del año, además durante el periodo 2016 se observan 9 eventos relacionados con alzas de temperaturas en descansos de soportación del horno por 427,16 hrs. Y problemas en corona por 219,06 hrs.
- C327CC01: Enfriadera en la cual existen un total de 18 eventos relacionados con problemas mecánicos en la etapa de transporte de material (clinker).
- C323CY54: Ciclón 54 con un evento por caída de ladrillos refractarios.

8.8 Año 2023 (Hasta el 31 de Julio)

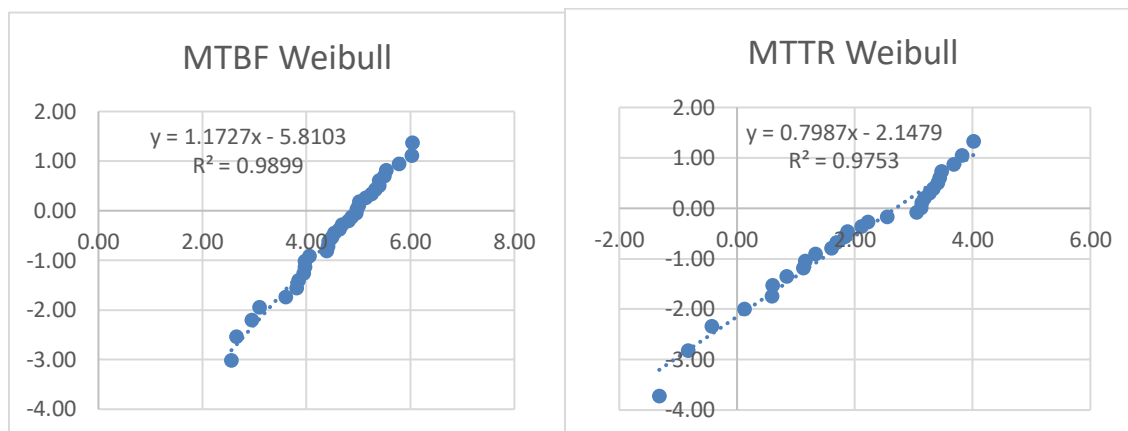


Gráfico 9 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Año Calendario a Julio 2023	5.088
TBF	4.587
TTR	450
Circunstancial	51
Programado	0
A(t)	91%
MTBF	131
MTTR	16
A(t)	89%
MTBF [Weibull]	134,23
MTTR [Weibull]	16,7
R(t)	16,5%
A(t)	89%

Tabla 18 Indicadores año 2016

La disponibilidad del año 2023 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 91% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 89% a su vez el MTBF y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 89%.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C322PS01	63	14%	14%
C328SC03	55	12%	26%
C323CY54	79	18%	44%
C326KI01	49	11%	55%
C322DC03	39	9%	64%
C327CR01	35	8%	71%
Molino 18 y 19	30	7%	78%
C323WF01	28	6%	84%
C327CC01	28	6%	90%
C612DG01	21	5%	95%
C322WF01	13	3%	98%
Corto Circuito	7	2%	100%
C326WF01	2	0%	100%
C324DC01DG03	0,43	0%	100%
Total	450		

Tabla 19 Detenciones del año 2023

Las causas más significativas del año 2023 son:

- C322PS01: Válvula de alimentación de bomba transportadora “Flux” con falla mecánica.
- C328SC03: Rosca de recuperación de polvo de clinker trabada.
- C323CY54: Ciclón 54 con un total de 3 eventos en el año y que el factor común de los tres eventos es “atollo” (sobre acumulación de material en la fase de precalcinación).
- C326KI01: Horno N°9 en el cual se declara un corte de polín en la primera base.
- C322DC03: Filtro de mangas por emisión de polvo fugitivo se define reemplazo de mangas, posteriormente acontece un evento anidado relacionado con un elevador de capachos el cual no permite iniciar alimentación a Horno N°9.
- C327CR01: Chancador que permite disminuir el tamaño de la piedra de clinker en su etapa final y que tiene un total de 11 eventos acumulados a Julio del 2023

relacionado por corte de correas y que su causa se debe a avalanchas de material.

- Molino 18 y 19: Molinos de crudo los cuales tienen factor común contaminación de material entre cámaras N°1 y N°2 por desgaste de chasis.
- C323WF01: Coriolis precalcinador el cual debido a un trabamiento mecánico se define su reemplazo.

9 Análisis de Disponibilidad, Mantenibilidad y Confiabilidad del Horno N°9 por Campaña

A partir de los registros históricos depurados correspondiente al Horno N°9 de Cementos Melón Planta La Calera se define campaña como el periodo de funcionamiento antes del mantenimiento mayor, para ello existe 8 campañas las cuales se detallan a continuación:

- Campaña N°1 (19 de julio 2015 al 19 de junio 2016).
- Campaña N°2 (08 de julio 2016 al 02 de octubre 2017).
- Campaña N°3 (10 de octubre 2017 al 02 de abril 2018).
- Campaña N°4 (02 de mayo del 2018 al 29 de septiembre 2019).
- Campaña N°5 (20 de noviembre del 2019 al 28 de junio 2020).
- Campaña N°6 (17 de julio 2020 al 31 de agosto 2021).
- Campaña N°7 (19 de septiembre del 2021 al 22 de julio 2022).
- Campaña N°8 (04 de septiembre 2022 al 31 de julio 2023).

La gráfica siguiente indica además el horizonte de cada campaña en horas, la disponibilidad y el periodo de mantenimiento mayor entre campaña entregando los siguientes resultados:

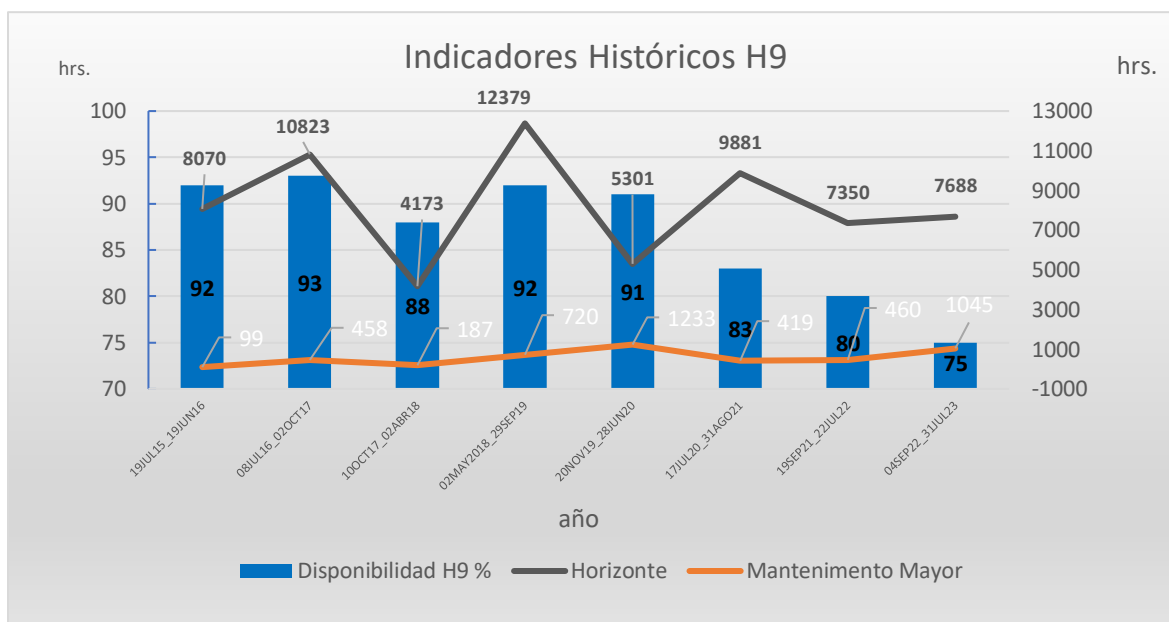


Gráfico 10 Indicadores Históricos Horno N°9

El indicador de disponibilidad se observa estable solo para la campaña N°2 y una caída sostenida para las campañas N°6, N°7 y N°8 de acuerdo al KPI de presupuesto el cual es de un 93%, a continuación, se realizará un detalle anual.

9.1 Campaña N°1 del 19 de junio del 2015 al 19 de junio del 2016

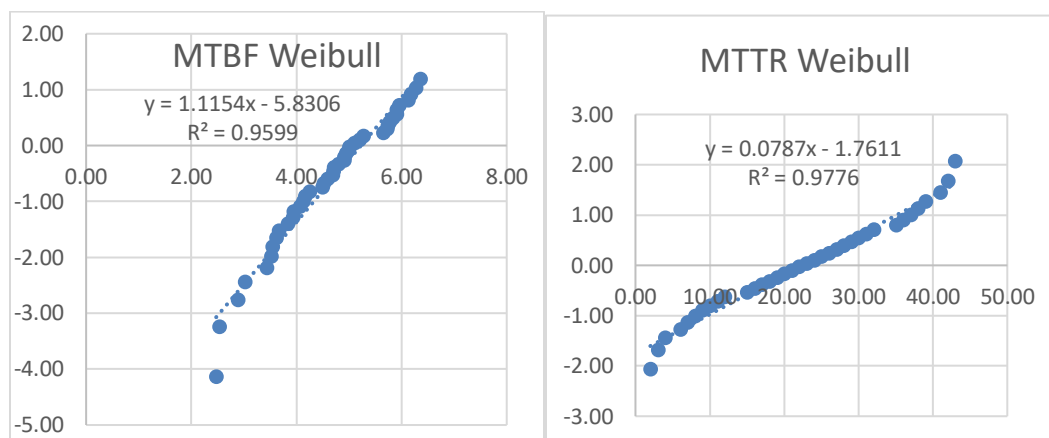


Gráfico 11 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Campaña N°1	8.070
TBF	7.379
TTR	621
Circunstancial	70
Programado	0
A(t)	92%
MTBF	172
MTTR	17
A(t)	91%
MTBF [Weibull]	178,96
MTTR [Weibull]	23,2
R (2016)	27,5%
A(t)	89%

Tabla 20 Indicadores Campaña N°1

La disponibilidad de la campaña N°1 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 92% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 91% a su vez el MTBF y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 89%.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C324FA02	195	31%	31%
C326KI01	101	16%	47%
C326WF01	78	13%	60%
C328ES01	76	12%	72%
C323CY54	57	9%	81%
C323CY53	35	6%	87%
C327FA02	25	4%	91%
CO Alto	21	3%	94%
Control Eléctrico	12	2%	96%
C323CY51	7	1%	98%
Pruebas	6	1%	99%
C327HU01	4	1%	99%
Enfriadera	3	1%	100%
C86	1	0%	100%
C323WF01	1	0%	100%
Total	621		

Tabla 21 Detenciones Campaña N°1

Las causas más significativas de la campaña N°1 son:

- C324FA02: Ventilador de tiro principal con un total de 7 eventos en el año con múltiples factores asociados al variador de frecuencia y alzas de vibraciones.
- C326KI01: Horno N°9 asociado a un evento en polín de la primera base.
- C326WF01: Coriolis alimentador de carbón ubicado en el sector precalcación y que en la campaña N°1 se evidencia 9 eventos asociados alarmas del dosificador que impiden su funcionamiento.
- C328ES01: Filtro FE21 el cual se encuentra ubicado aguas debajo de horno N°9, el modo de falla se asocia a atollos con un total de 4 eventos.
- C323CY54: Ciclón 54, ubicado en el sector precalcación en el cual se realiza la preparación de crudo y que su modo de falla se relaciona con sobrellenado y “atollo” de material con un total de 3 eventos en la primera campaña.

El fin de esta campaña consideró un total de 458 horas (19 días aproximadamente) de mantenimiento mayor entre el 19 de junio del 2016 y el 08 de Julio del mismo año en el cual se realiza un reemplazo de 30 metros de ladrillo refractario del horno N°9, dando inicio a la segunda campaña.

9.2 Campaña N°2 del 08 de julio del 2016 al 02 de octubre del 2017

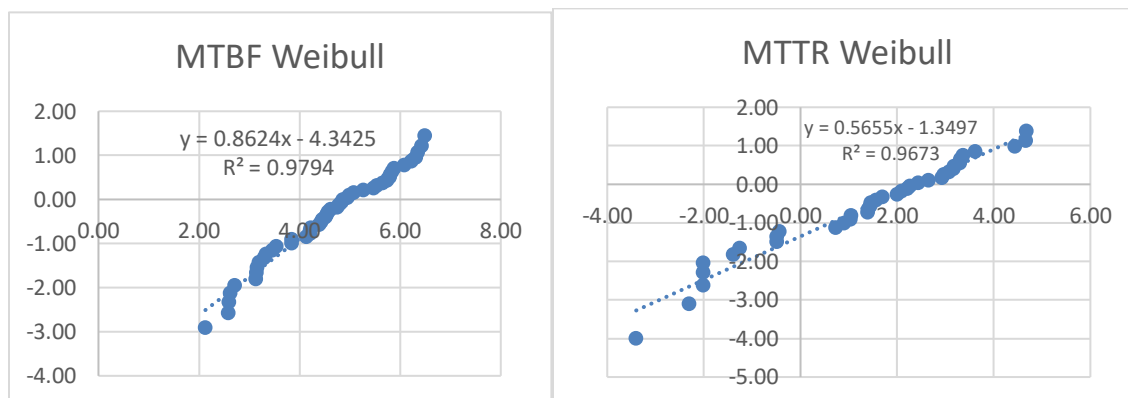


Gráfico 12 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Campaña N°2	10.823
TBF	8.223
TTR	627
Circunstancial	84
Programado	1.889
A(t)	93%
MTBF [Promedio]	164
MTTR [Promedio]	16,50
A(t)	91%
MTBF [Weibull]	165,78
MTTR [Weibull]	17,76
R (2016)	23,7%
A(t)	90%

Tabla 22 Indicadores Campaña N°2

La disponibilidad de la campaña N°2 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 93% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 91% a su vez el MTBF por distribución de Weibull y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad

de 90%.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C324VS01	138	22%	22%
C327CC01	110	18%	40%
C200CN01	85	13%	53%
C323CY54	66	11%	64%
C324ES02	46	7%	71%
C326KI01	28	4%	75%
C323CY53	24	4%	79%
C326WF01	24	4%	83%
C324DG03	20	3%	86%
C324FA02	16	3%	89%
C324FA01	16	2%	91%
C326BP01	14	2%	93%
C410TF04	10	2%	95%
C832TF04DH01	9	1%	96%
C323WF01	6	1%	97%
C322PS01	5	1%	98%
C327CR01LU01	5	1%	99%
C323CY51	4	1%	100%
C309BE01	1	0%	100%
Error de Operación	1	0%	100%
Sin Clasificar	0	0%	100%
C322WF01	0	0%	100%
Total	627		

Tabla 23 Detenciones Campaña N°2

Las causas más significativas de la campaña N°2 son:

- C324VS01: Variador de frecuencia de ventilador principal asociado a alarmas de interlock asociados a “Trip Magnético” , “switch in G freq 1 mseg” y “Alarma FE12J09_SEPR_ALL >mbar”, destaca este modo de falla con un total de 8 veces en esta campaña.
- C327CC01: Sobre llenado del Horno por avalancha de material proveniente de Torre de ciclones provocando una detención significativa de 110 horas en el año 2017.
- C200CN01: Evento asociado en sector materias primas en el cual equipo nave grúa puente presenta falla en motores para el movimiento de materias primas en la fase de crudo.
- C323CY54: Ciclón 54, ubicado en el sector precalcinación en el cual se realiza la preparación de crudo y que su modo de falla se relaciona con sobrellenado y “atollo” de material.
- C324ES02: Filtro electroestático cámara N°2, ubicado en sector aguas abajo de horno N°9 el cual se utiliza para la captura de polvo fino de clinker, el modo de falla se relaciona a control eléctrico.
- C326KI01: Horno N°9 asociado a falla en machón de acoplamiento.
- C323CY53: Ciclón N°53 el cual se encuentra en la fase de precalcinación el evento se asocia a “atollo” (sobre acumulación de material).
- C326WF01: Coriolis de carbón asociado a falla en sistema de control.

El fin de esta campaña consideró un total de 187 horas de mantenimiento mayor (7,8 días aproximadamente) entre el 02 de octubre del 2017 y el 10 de octubre del mismo año en el cual se realiza actividades de mantención correctiva asociada a enfriadera, dando inicio a la tercera campaña.

9.3 Campaña N°3 del 10 de octubre del 2017 al 02 de abril del 2018

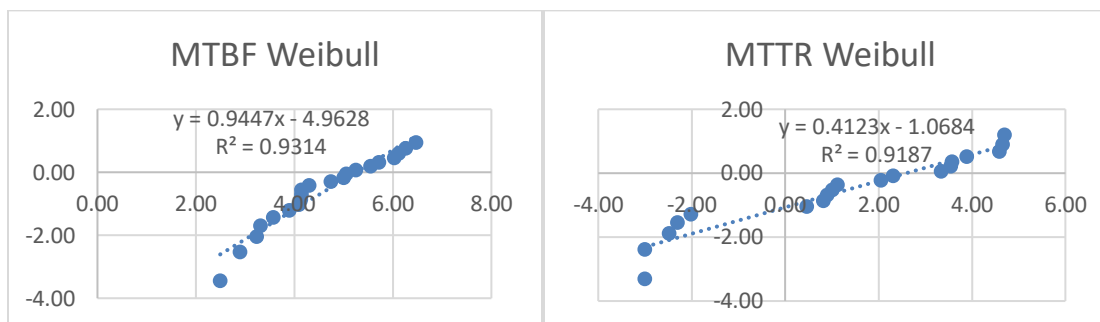


Gráfico 13 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Campaña N°3	4.173
TBF	3.674
TTR	492
Circunstancial	8
Programado	0
A(t)	88%
MTBF [Promedio]	175
MTTR [Promedio]	25,87
A(t)	87%
MTBF [Weibull]	196,20
MTTR [Weibull]	40,89
R (2016)	29,8%
A(t)	83%

Tabla 24 Indicadores Campaña N°3

La disponibilidad de la campaña N°3 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 88% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 87% a su vez el MTBF por distribución de Weibull y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 83%.

Causa Aparente	TTR	%Acc
C326KI01	352	72%
C323CY52	51	82%
C324VS01	35	89%
C328ES02	28	95%
C327MC13	10	97%
C327CC01	8	99%
C326KP03	3	99%
C324TW01NZ01	2	100%
C323CY54	2	100%
C324FA02	0	100%
C326	0	100%
CO Alto	0	100%
Total	492	

Tabla 25 Detenciones Campaña N°3

Las causas más significativas de la campaña N°3 son:

- C326KI01: Horno N°9 en el cual se desarrollan un total de cinco eventos en esta campaña relacionados con dos caídas de ladrillos refractarios (208 hrs.), un cambio de polín tercera base de soportación (105 hrs.) y dos fugas de material desde sello de alimentación (39 hrs.).
- C323CY52: Ciclón N°52 el cual se encuentra en la torre de precalcación en donde su causa se relaciona a “atollos” (sobre acumulación de material en la fase de precalcación).

El fin de esta campaña consideró un total de 720 horas de mantenimiento mayor (30 días) entre el 02 de abril del 2018 y el 02 de mayo del mismo año y que tiene como actividad relevante el remplazo de 42 metros de ladrillo refractarios, dando inicio a la cuarta campaña.

9.4 Campaña N°4 del 02 de mayo del 2018 al 29 de septiembre del 2019

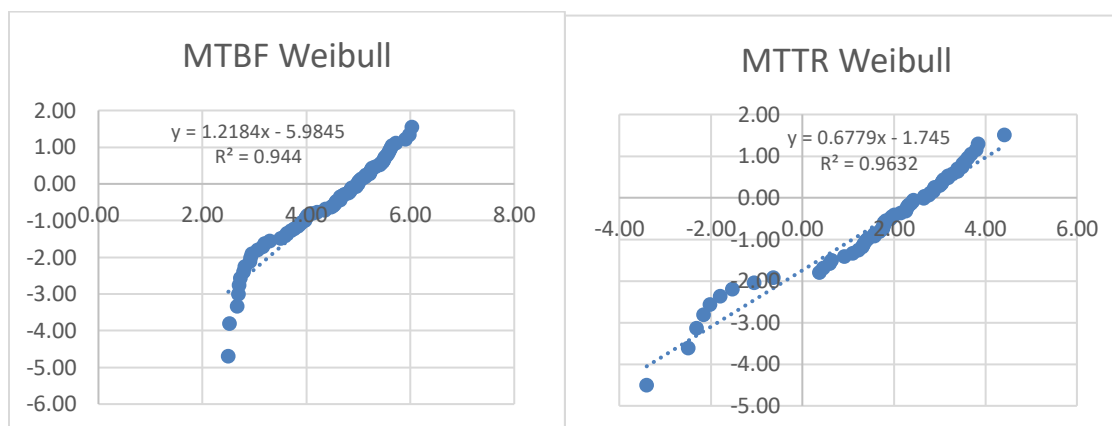


Gráfico 14 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Campaña N°4	12.379
TBF	9.709
TTR	868
Circunstancial	1.781
Programado	2
A(t)	92%
MTBF [Promedio]	126
MTTR [Promedio]	14
A(t)	90%
MTBF [Weibull]	127,33
MTTR [Weibull]	17,14
R (2016)	14,4%
A(t)	88%

Tabla 26 Indicadores Campaña N°4

La disponibilidad de la campaña N°4 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 92% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 90% a su vez el MTBF y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 88%.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C327HU01	122	14%	14%
C324FA02	121	14%	28%
C323CY54	89	10%	38%
C327	83	10%	48%
C327CC01	68	8%	56%
C326BP01	46	5%	61%
Inestabilidad Horno	35	4%	65%
C324ES01	30	3%	68%
C327HU01PU03	30	3%	72%
C322PS01	29	3%	75%
C323CY51	28	3%	79%
C309BC01	27	3%	82%
C324DG01	24	3%	84%
C323	21	2%	87%
C323CY53	18	2%	89%
Horno detenido	18	2%	91%
C407CM01	18	2%	93%
C326KI01	16	2%	95%
C324CM01	16	2%	97%
C327CR01	11	1%	98%
C323CY52	5	1%	98%
C324PU03	4	0%	99%
C322DC03RA01	3	0%	99%
C326DR01PU01	2	0%	99%
C309VN01	2	0%	100%
C324CM02	2	0%	100%
Sensor	1	0%	100%
Trip Magnético VDF	0	0%	100%
C309BE01	0	0%	100%
CO Alto	0	0%	100%
C832TF04	0	0%	100%
Total	868		

Tabla 27 Detenciones Campaña N°4

Las causas más significativas de la campaña N°4 son:

- C327HU01: Enfriadera con un total de 6 eventos en el año y que el factor común se asocia al sistema hidráulico por fugas de aceite el cual impide el movimiento de las parrillas móviles (mecanismo de movimiento en traslación para el transporte de clinker).
- C324FA02: Ventilador de tiro principal con un total de 18 eventos en esta campaña y con factor común asociado a vibraciones altas con síntomas de desbalanceo y variador d frecuencia en su minoría.
- C323CY54: Ciclón 54 con un total de 3 eventos en esta campaña y que el factor común de los tres eventos es “atollo” (sobre acumulación de material en la fase de precalcinación).
- C327: Pared caliente la cual se encuentra en la salida del horno N°9 y que producto de acumulación de material (clinker) supera el nivel térmico aceptable generando roturas.
- C327CC01: Enfriadera con un total de 4 eventos en el año y que el factor común se asocia al sistema hidráulico para el movimiento de las parrillas móviles (mecanismo de movimiento en traslación para el transporte de clinker).
- C326BP01: Coriolis de MP el cual se desarrolla un reemplazo por un total de 46,4 hrs.
- Inestabilidad Horno: EL evento indica anomalías en precalcinador y quemador
- C324ES01: Filtro electroestático cámara N°1, ubicado en sector aguas debajo de horno N°9 el cual se utiliza para la captura de polvo fino de clinker , el modo de falla se relaciona a control eléctrico.
- C327HU01PU03: Bomba hidráulica de enfriadera asociada a falla en fuga de aceite.
- C322PS01: Válvula de alimentación de bomba transportadora “Flux”.
- C323CY51: Ciclón 51 ubicado en sector de precalcinación la cual tiene como evento un “atollo”.
- C309BC01: Cinta transportadora de materia prima la cual tiene como evento un “atollo”.

El fin de esta campaña consideró un total de 1.233 horas de mantenimiento mayor (51 días aproximadamente) entre el 29 de septiembre del 2019 y el 20 de noviembre del mismo año en el cual se desarrollaron actividades relacionados con proyectos estratégicos que contribuyen al performance del horno en cuanto a su utilización y a su vez el reemplazo de 35 metros de ladrillo refractario, dando inicio a la quinta campaña.

9.5 Campaña N°5 del 20 de noviembre del 2019 al 28 de junio 2020

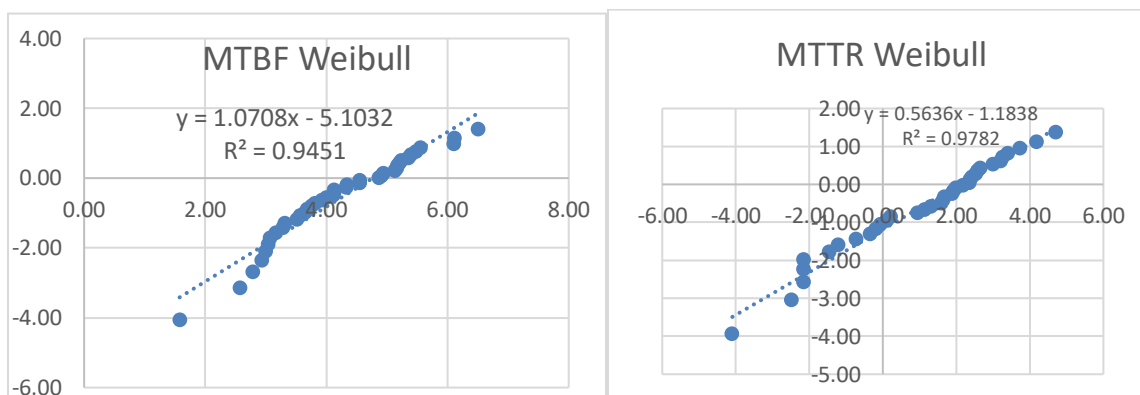


Gráfico 15 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Campaña N°5	5.301
TBF	4.839
TTR	453
Circunstancial	9
Programado	0
A(t)	91%
MTBF [Promedio]	121
MTTR [Promedio]	13
A(t)	91%
MTBF [Weibull]	114,35
MTTR [Weibull]	13,41
R (2016)	12,3%
A(t)	90%

Tabla 28 Indicadores año 2016

La disponibilidad de la campaña N°5 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 91% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 91% a su vez el MTBF por distribución de Weibull y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 90%.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C323CY54	177	39%	39%
C327FT01	66	14%	54%
C324DC01DG01	30	7%	60%
C324TW01VV01	26	6%	66%
C327CR01	21	5%	71%
C309	20	4%	75%
C327CC01	20	4%	79%
Investigando causa	19	4%	84%
C322WF01	15	3%	87%
C613SC02	11	3%	90%
C327HU01PU01	11	2%	92%
C324DC01DG02	7	2%	94%
C324FA02	7	2%	95%
C324VS01TF01	5	1%	96%
C326KI01	5	1%	97%
C320PL02	5	1%	99%
C32	3	1%	99%
C324FA01	2	0%	100%
C322PS01	1	0%	100%
C324VS01	0	0%	100%
C328	0	0%	100%
C324TW01DG01	0	0%	100%
C324DC01	0	0%	100%
Total	453		

Tabla 29 Detenciones Campaña N°5

Las causas más significativas de la campaña N°5 son:

- C323CY54: Ciclón 54 con un total de 3 eventos en esta campaña y que el factor común de los tres eventos es “atollo” (sobre acumulación de material en la fase de precalcinación).
- C327FT01: Pared del Hood la cual se encuentra en la salida del horno N°9 sector superior, el evento se asocia desprendimiento de refractario.
- C324DC01DG01: Rastra transportadora en la cual se indica un corte de cadena.
- C324TW01VV01: válvula reguladora de agua para filtro principal la cual genera un alza de temperatura de este filtro.
- C327CR01: Chancador el cual tiene 4 eventos en esta campaña, el evento se asocia a cambio de correas y atollos (exceso de material).
- C309: Falla simultanea de equipos asociados a logica de control.
- C327CC01:Enfriadera con 2 eventos en esta campaña asociado a fallas en sistema hidraulico.

El fin de esta campaña consideró un total de 419 horas de mantenimiento mayor (17 días aproximadamente) entre el 28 de junio del 2020 y el 15 de julio del mismo año en el cual se desarrolla el reemplazo de uno de los polines de soportación del horno N°9 y otras actividades relevantes, dando inicio a la sexta campaña.

9.6 Campaña N°6 del 17 de julio del 2020 31 de agosto 2021

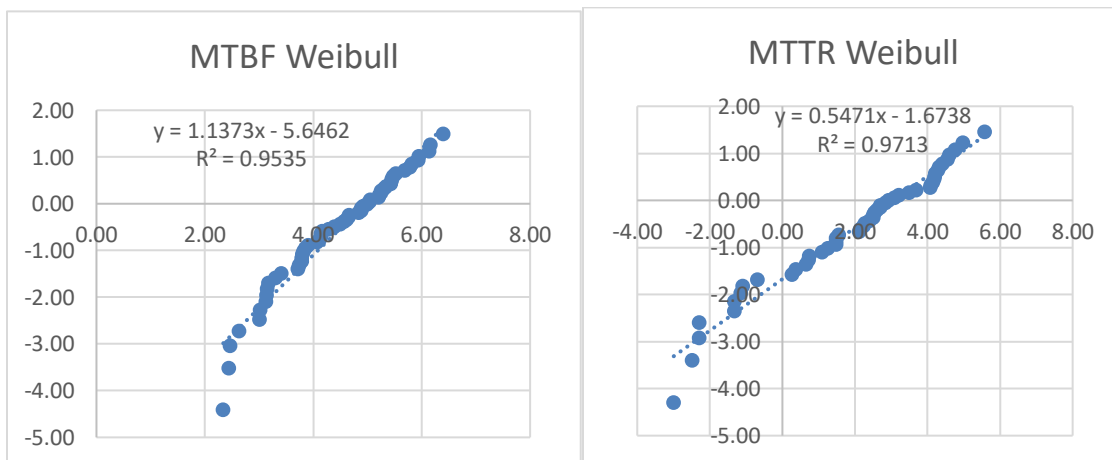


Gráfico 16 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Campaña N°6	9.881
TBF	8.136
TTR	1.647
Circunstancial	98
Programado	0
A(t)	83%
MTBF [Promedio]	140
MTTR [Promedio]	32
A(t)	81%
MTBF [Weibull]	136,78
MTTR [Weibull]	36,59
R (2016)	17,4%
A(t)	79%

Tabla 30 Detenciones Campaña N°5

La disponibilidad de la campaña N°6 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 83% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 91% a su vez el MTBF por distribución de Weibull y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 90%.

La Campaña N°6 involucra un hito no recurrente, pero a su vez catastrófico, ya que cambia el rumbo de la disponibilidad del Horno N°9. El 04 de diciembre, producto de una falla operacional se inicia el calentamiento sin giro del horno, lo que ocasiona un sobre calentamiento (“Loica”), generando una deformación del casco de forma permanente, ante esta condición el activo inicia un ciclo de fallas sistémicas hasta el potencial reemplazo de virola que se concreta el 22 de Julio del año 2022.



Figura 23 “Loica” no controlada horno N°9 (fuente, Melón 2023)

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C326KI01	1222	75%	75%
C327CC01	141	9%	83%
C322BE02	40	2%	86%
Giros	34	2%	88%
Bajo stock de material	33	2%	90%
C324FA02	30	2%	92%
C328DG02	19	1%	93%
C612DG01	17	1%	94%
C324FA01	15	1%	95%
C832TF02	13	1%	96%
C324CM01	12	1%	96%
C322PS01	12	1%	97%
C322BE01	11	1%	98%
C323CY52	9	1%	98%
C323CY54	9	1%	99%
C327CR01	6	0%	99%
C831BI01	4	0%	100%
C831SU02	4	0%	100%
C327FA03	2	0%	100%
C327FA02	1	0%	100%
C322SC01	0	0%	100%
Sin Clasificar	0	0%	100%
C324DC01	0	0%	100%
C326PU03	0	0%	100%
C324PU03	0	0%	100%
Otro	0	0%	100%
Total	1632		

Tabla 31 Detenciones Campaña N°6

Las causas más significativas de la campaña N°6 son:

- C326KI01: Horno N°9 el cual representa el 75% de las horas de falla con un total de 1.222 hrs y 16 eventos en esta campaña de los cuales 10 eventos tienen relación con caída de ladrillos refractarios ,2 eventos por corte de pernos y polín relacionados con los descansos de soportación del horno ,2 eventos por fuga de material desde el sello de alimentación y un evento por avalancha de material.
- C327CC01: Enfriadera con 5 eventos en esta campaña en la cual se asocian eventos referentes a problemas del tipo componentes mecánico y sistema hidráulico.

El fin de esta campaña consideró un total de 460 horas de mantenimiento mayor (19 días aproximadamente) entre el 31 de agosto del 2021 y el 19 de septiembre del mismo año en el cual se realiza el reemplazo de 30 metros de ladrillo refractario, dando inicio a la séptima campaña.

9.7 Campaña N°7 del 19 de septiembre del 2021 al 22 de julio 2022

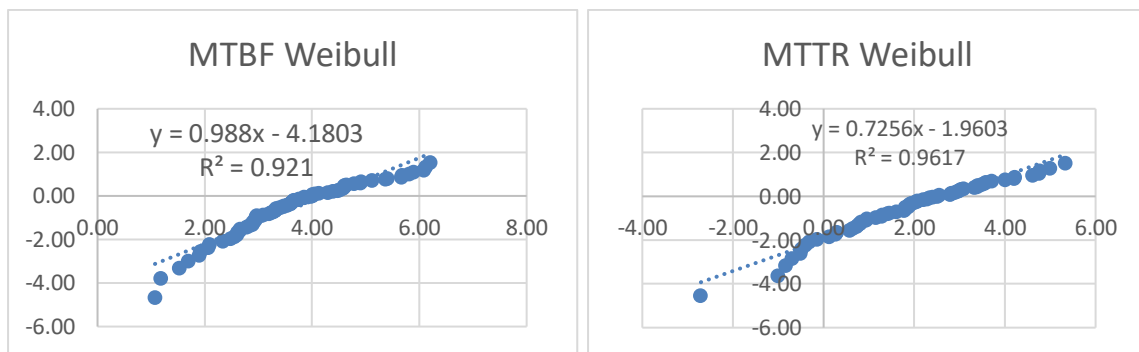


Gráfico 17 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Año Calendario	7.350
TBF	5.865
TTR	1.431
Circunstancial	53
Programado	0
A(t)	80%
MTBF [Promedio]	79
MTTR [Promedio]	22,0
A(t)	78%
MTBF [Weibull]	69,15
MTTR [Weibull]	18,25
R (2016)	3,5%
A(t)	79%

Tabla 32 Indicadores Campaña N°7

La disponibilidad de la campaña N°7 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 80% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 78% a su vez el MTBF por distribución de Weibull y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 79%.

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C327CC01	528	40%	40%
C326KI01	421	32%	71%
C323CY54	117	9%	80%
C326DR01MT01	67	5%	85%
C327CR01	39	3%	88%
C322DC03	34	3%	91%
C324DC01DG03	22	2%	93%
C309CB01	21	2%	94%
Corte de energía interno	18	1%	95%
C324FA02	15	1%	97%
Mantenición programada	13	1%	98%
C322CY01RA01	8	1%	98%
C322PP01	7	1%	99%
C326KP03	7	1%	99%
C322PS01	4	0%	99%
Roturas	2	0%	100%
C328FA02	1	0%	100%
C309BE01	1	0%	100%
C322DC01RA01	1	0%	100%
C324DC01YT02	1	0%	100%
C326WF01	0	0%	100%
C324SC03	0	0%	100%
Total	1327		

Tabla 33 Detenciones Campaña N°7

Las causas más significativas de la campaña N°7 son:

- C327CC01: Enfriadera con un total de 19 eventos en esta campaña relacionados con problemas de componentes mecánicos.
- C326KI01: Horno N°9 con un total de 10 eventos en esta campaña relacionados con alzas de temperaturas en los descansos de soportación del horno.

- Ciclón 54 con un evento por caída de ladrillos refractarios.

El fin de esta campaña consideró un total de 1.045 horas de mantenimiento mayor (43 días aproximadamente) entre el 22 de julio del 2022 y el 04 de septiembre del mismo año en el cual se realiza el reemplazo de 18,8 metros de virola y 42 metros de ladrillo refractario dando inicio a la octava campaña.

9.8 Campaña N°8 del 04 de septiembre del 2021 al 31 de julio 2023

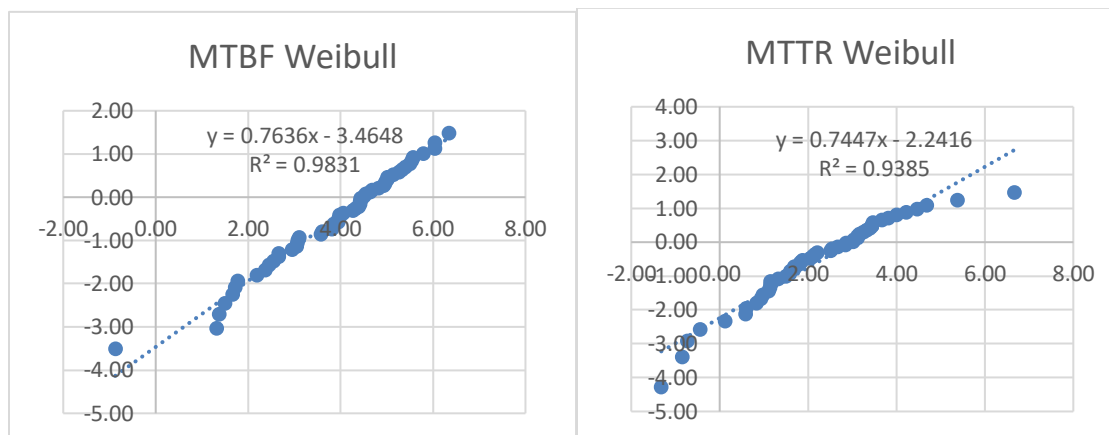


Gráfico 18 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Campaña N°8	7.688
TBF	5.782
TTR	1.884
Circunstancial	51
Programado	0
A(t)	75%
MTBF [Promedio]	101
MTTR [Promedio]	37
A(t)	73%
MTBF [Weibull]	109,66
MTTR [Weibull]	24,30
R(t)	17,5%
A(t)	82%

Tabla 34 Indicadores campaña N°8

La disponibilidad de la campaña N°8 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 75% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 73% a su vez el MTBF por distribución de Weibull y MTTR por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 82%.

La octava campaña se vio afectada por el mantenimiento mayor desarrollado a partir del 22 de Julio en el cual producto del reemplazo de 18,8 metros de virola y recuperación de una de las bases al momento de iniciar el régimen de operación se produjo en el 23 de noviembre una fisura en uno de los tramos cambiados en el mantenimiento mayor el cual tuvo un tiempo de reparación equivalente a 786,4 horas.



Figura 24 fisura horno N°9

Causa Aparente	TTR	%	%Acc
C326KI01	1343	71%	71%
C322PS01	84	4%	76%
C323CY52	68	4%	79%
C328SC03	55	3%	82%
C323CY54	53	3%	85%
C322DC03	39	2%	87%
C327CR01	35	2%	89%
Molino 18 y 19	30	2%	91%
C323WF01	28	1%	92%
C327CC01	28	1%	94%
C327CY54	26	1%	95%
C612DG01	21	1%	96%
Rastra	21	1%	97%
Soplador Axial	14	1%	98%
C322WF01	13	1%	99%
C324CM01	9	0%	99%
Corto Circuito	7	0%	99%
C324FA02	5	0%	100%
C327FA02	3	0%	100%
C326WF01	2	0%	100%
C324DC01DG03	0,4	0%	100%
Total	1884		

Tabla 35 Detenciones campaña N°8

- C326KI01: Horno N°9 el cual representa el 71% de las horas de falla con un total de 1343 hrs. de los cuales existe un evento significativo no solo de la campaña en cuestión sino de todo el periodo analizado en donde acontece después de un mantenimiento mayor de 43,5 días en el cual se realiza un reemplazo de virola una fractura en una de las soldaduras realizadas para dicho efecto teniendo una reparación de 786,4 hrs. al final del último trimestre del año 2022, además durante

el periodo se observan 11 eventos relacionados con alzas de temperaturas en descansos de soportación del horno por 283,93 hrs. Problemas en corona por 219,06 hrs , un reemplazo de polín de soportación del horno por 45,6 hrs y otros eventos menores equivalentes a 8 hrs.

- C322PS01: Bomba Flux de materias primas asociadas a fallas en válvulas de control con un total de 4 eventos en esta campaña.
- C323CY52 Ciclón 52, ubicado en el sector precalcinación en el cual se realiza la preparación de crudo y que su modo de falla se relaciona con sobrellenado y “atollo” de material.
- C328SC03: Rosca de recuperación de polvo de clinker trabada.

10 Análisis de los Costos Globales

A continuación, se presenta una tabla de resumen que explica los costos globales desde el año 2016 al 2023 proyectado.

Año	OPEX [MM\$]	CAPEX [MM\$]	CI Total [MM\$]	Costo Global [MM\$]	A(t) %	Producción de clinker [Kt]	M\$/Tclinker	TTR	CI [M\$/h]
2016	\$2.974	\$1.727	\$135	\$4.836	95	607	\$7,965	378	\$ 0,36
2017	\$2.277	\$1.002	\$212	\$3.491	91	417	\$8,367	624	\$ 0,34
2018	\$3.023	\$2.657	\$259	\$5.939	89	443	\$13,420	690	\$ 0,37
2019	\$3.132	\$1.249	\$249	\$4.630	92	454	\$10,208	599	\$ 0,42
2020	\$3.170	\$5.064	\$443	\$8.677	86	571	\$15,207	1169	\$ 0,38
2021	\$3.925	\$2.627	\$487	\$7.039	87	549	\$12,814	1033	\$ 0,47
2022	\$5.017	\$2.465	\$1.722	\$9.204	66	374	\$24,622	2656	\$ 0,65
2023	\$4.444	\$3.271	\$355	\$8.070	92	580	\$13,913	689	\$ 0,51

Tabla 36 Resumen costos Globales

La tabla indica un nivel de costo global óptimo que ocurrió el año 2016 equivalente a \$4.836.000.000 y con un costo por tonelada de clinker producida que corresponde a \$7.965, a su vez se observa el costo global más alto en el año 2022 el cual fue de \$9.204.000.000 y un costo por tonelada de clinker producida de \$24.622.

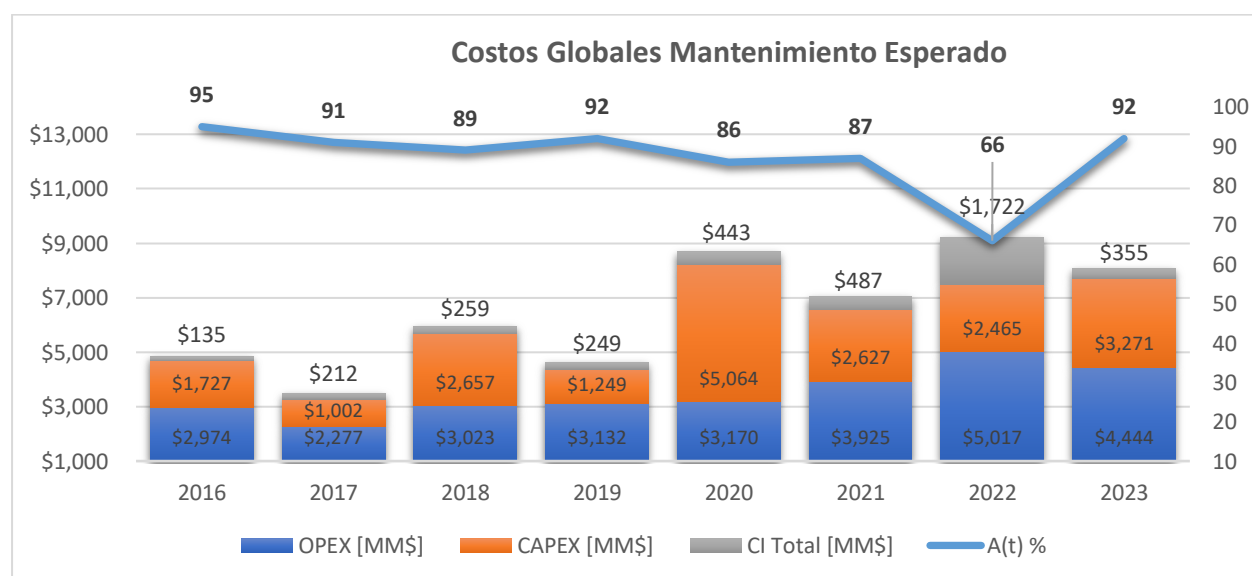


Gráfico 19 Costos Globales Mantenimiento

La gráfica actual permite observar el nivel de costo global conformado por Capex, Opex y costo de ineficiencia el cual fue impactado en el año 2022 propio del nivel de disponibilidad que tuvo ese año en particular en el cual su nivel de funcionamiento se vio afectado por el equipo enfriadera y horno respectivamente, ahora bien, el año 2022 fueron atendidos estos eventos ya indicados los que favorecieron el alza en la disponibilidad para el año 2023.

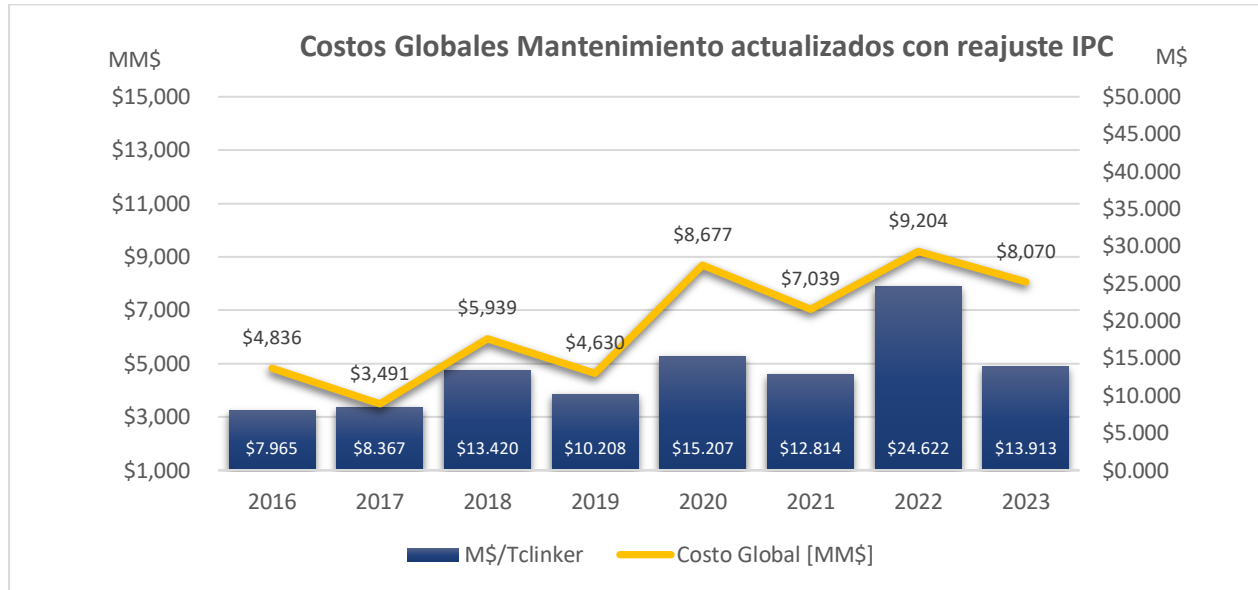


Gráfico 20 Costos Globales Mantenimiento

En esta gráfica se puede observar el costo global y su costo por tonelada de clinker producida en la cual se indica una proyección para el año 2023 favorable respecto a los periodos posteriores al año 2016.

10.1 Análisis de Costos Globales actualizados con reajuste IPC

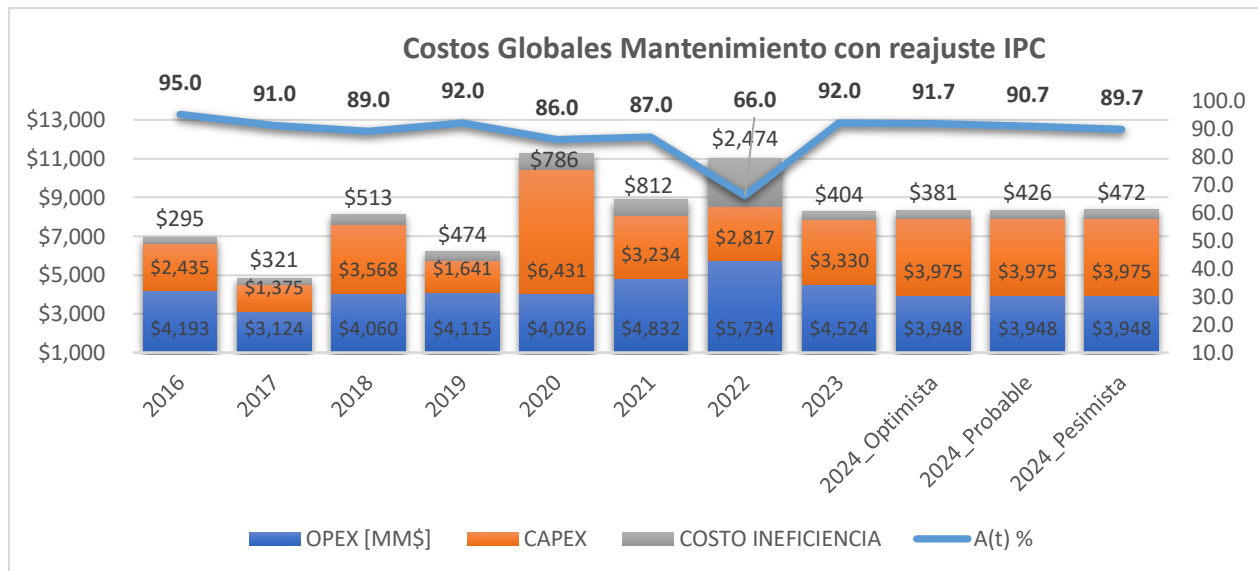


Gráfico 21 Costos Globales de Mantenimiento actualizados con reajuste IPC

La gráfica actual permite observar el nivel de costo global conformado por Capex, Opex y costo de ineficiencia con reajuste de IPC. Este gráfico permite indicar que la proyección del año 2023 mantiene una condición favorable al año 2020,2021 y 2022 respectivamente.



Gráfico 22 Costos Globales Mantenimiento actualizados con reajuste IPC

En esta gráfica se puede observar el costo global y su costo por tonelada de clinker producida en la cual se indica una proyección para el año 2023 favorable respecto a los periodos posteriores al año 2020 y 2018.

11 Modelo y Simulación de Funcionamiento-Reparación Horno N°9

Respecto de la base histórica se utiliza el año 2023 desde el 01 de enero al 11 de septiembre y que corresponde al periodo más cercano y representativo en cuando a los modos de falla para el año 2024.

Horizonte	6.074
TBF	5.395
TTR	463
Programado	161
Circunstancial	56
A(t)	92,1%

MTBF [Promedio]	149,87
MTTR [Promedio]	15,42
A(t)	90,7%
MTBF [Weibull]	164,30
MTTR [Weibull]	15,35
A(t)	91,5%

Tabla 37 Indicadores año 2023

La disponibilidad del año 2023 de acuerdo a los datos históricos depurados es de un 92,1% y en base a los MTBF y MTTR promedio la disponibilidad indica un 90,7% a su vez el MTBF por distribución de Weibull indica un nivel de disponibilidad de 91,5% por lo que permite el desarrollo de un modelo de simulación del activo.

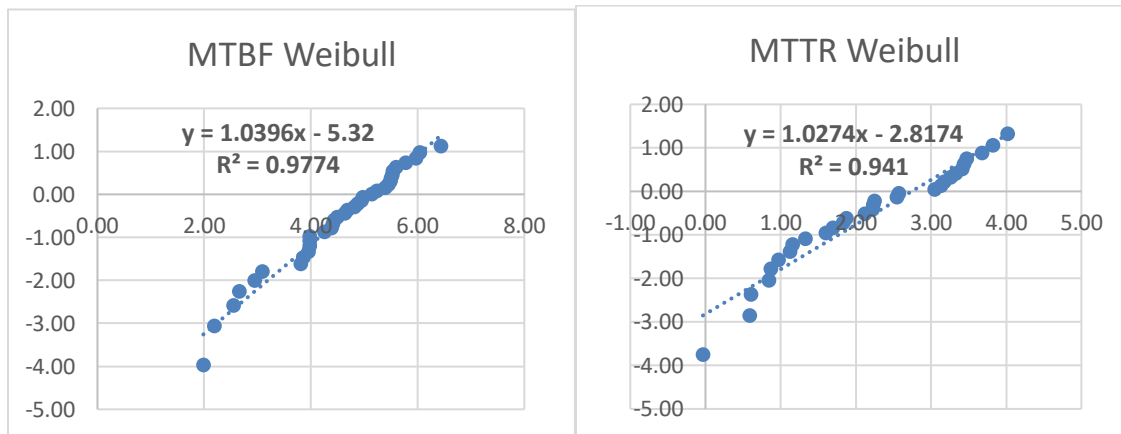


Gráfico 23 MTBF y MTTR por distribución Weibull

Confiabilidad Weibull		Mantenibilidad Weibull	
β	1,04	β	1,02
α	166,89	α	15,52
MTBF	164,30	MTTR	15,35

Tabla 38 Confiabilidad y Mantenibilidad Weibull

Respecto de la variable $\beta = 1,04$ indica una tasa de falla constante en el ciclo de vida útil del activo

Al utilizar la formula: $A_t = \frac{MTBF}{(MTBF+MTTR)}$

La disponibilidad esperada es: 91,46%

Respecto de los datos simulados se proyecta un horizonte de 182.815 hrs. las cuales corresponden a periodo 01 de enero 2024 hasta el 08 de noviembre del 2044 y que permite también confirmar MTBF, MTTR y A(t) simuladas cercanas a la base histórica:

Datos Simulados	
MTBF	167,14
MTTR	15,67
Horizonte	182.815
Inicio	01-01-2024 0:00
Fin	08-11-2044 7:27
DT	15.672
A Sim	91,43%

Tabla 39 Datos Simulados

Año	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	Anual para Año 2024
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Horizonte	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8.784
UT	666	650	738	707	727	707	704	603	615	690	595	672	8.073
DT	78	46	6	13	17	13	40	141	105	54	125	72	711
Disponibilidad Esperada	89,5%	93,4%	99,2%	98,2%	97,8%	98,1%	94,6%	81,0%	85,4%	92,7%	82,7%	90,3%	91,9%

Tabla 40 Iteración "1" año 2024

La tabla N°39 resume la simulación correspondiente a una proyección (iteración “1”) para el año 2024 en el cual se indica una disponibilidad esperada del 91,9% siendo el mes con menor disponibilidad agosto (81%) y el con mayor disponibilidad marzo (99,2%).

A continuación, se desarrolló un total de 1.000 iteraciones del modelo para el año 2024 indicando el siguiente histograma en el cual hay concentraciones significativas en los estratos [90,7-91,2] , [91,2%-91,7%] y [91,7%-92,3%].

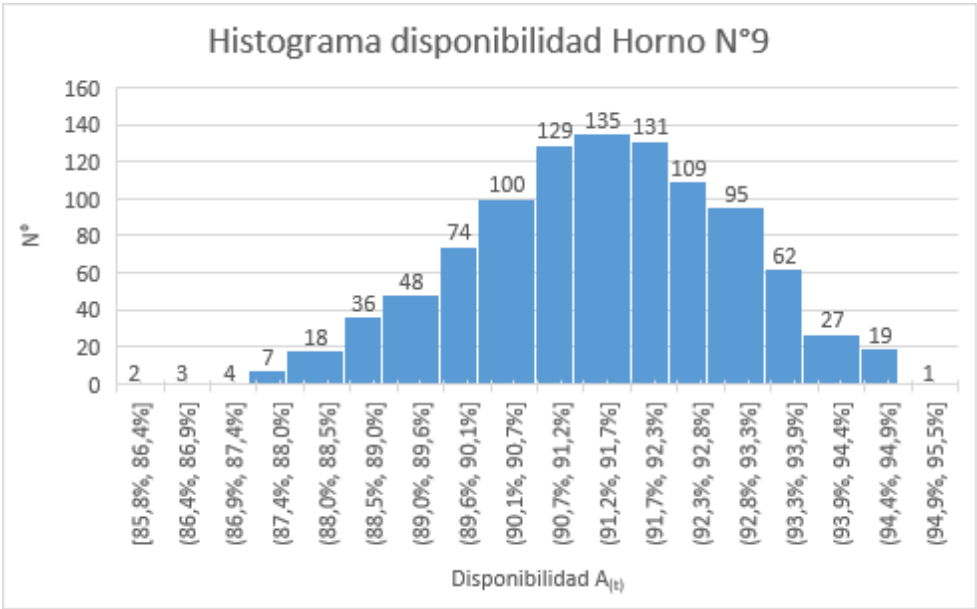


Gráfico 24 Histograma Simulación Horno N°9

Respecto de la probabilidad de lograr estos indicadores de disponibilidad:

Estratos A(t)	Probabilidad
[90,7-91,2]	P [69,6%-57,6%]
[91,2%-91,7%]	P [57,6%-45,1%]
[91,7%-92,3%]	P [45,1%-30%]

Tabla 41 Estrato y Probabilidad

A continuación, se indica el nivel de disponibilidad comprometida y que será utilizada para la producción anual esperada en el año 2024

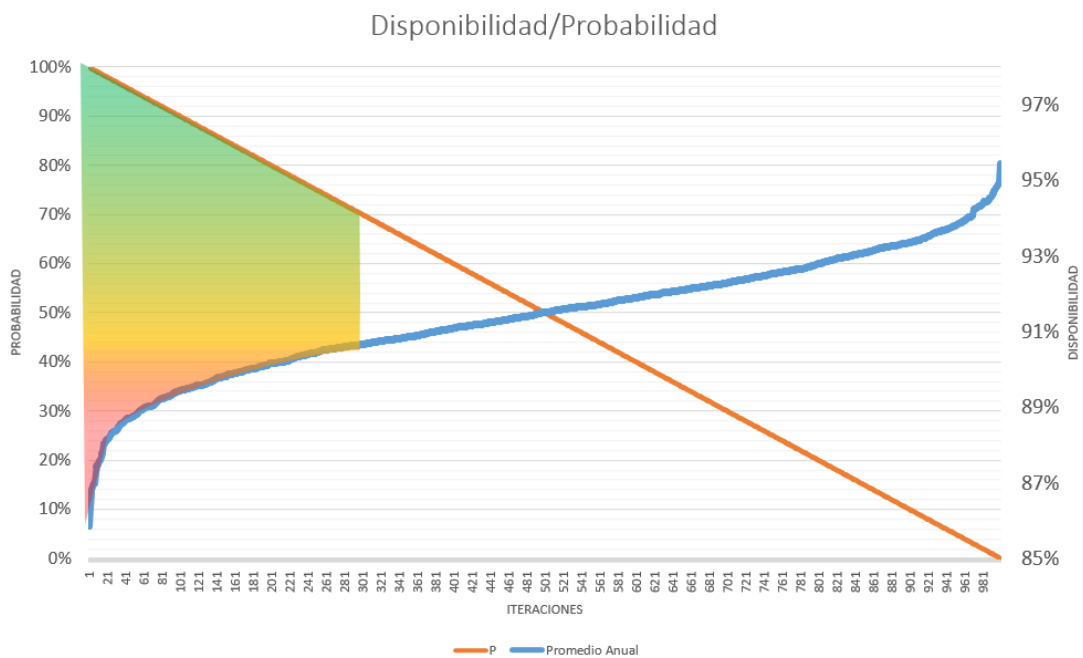


Gráfico 25 Disponibilidad/Probabilidad

La disponibilidad comprometida es de un 90,7% con una probabilidad de ocurrencia del 70% y con ello evaluaremos el nivel de producción anual para el año 2024 con diferentes tasas de producción.

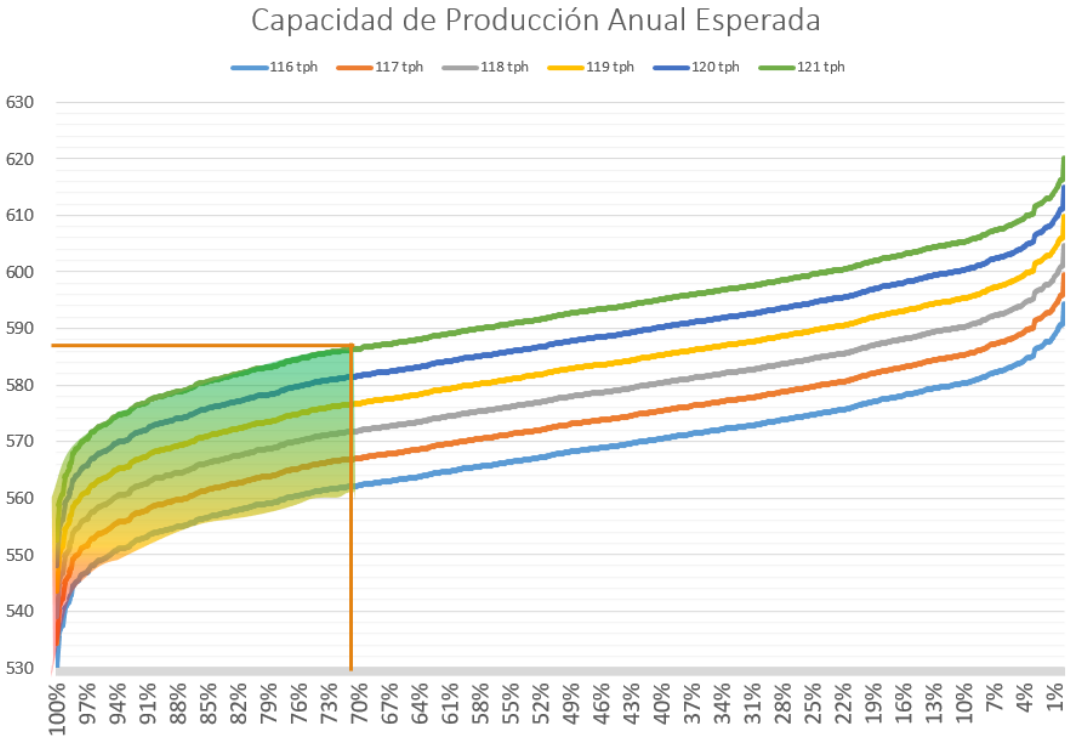


Gráfico 26 Capacidad de Producción Anual Esperada

El gráfico 26 indica un nivel de capacidad máxima equivalente a 569.000 T con un 70% de probabilidad

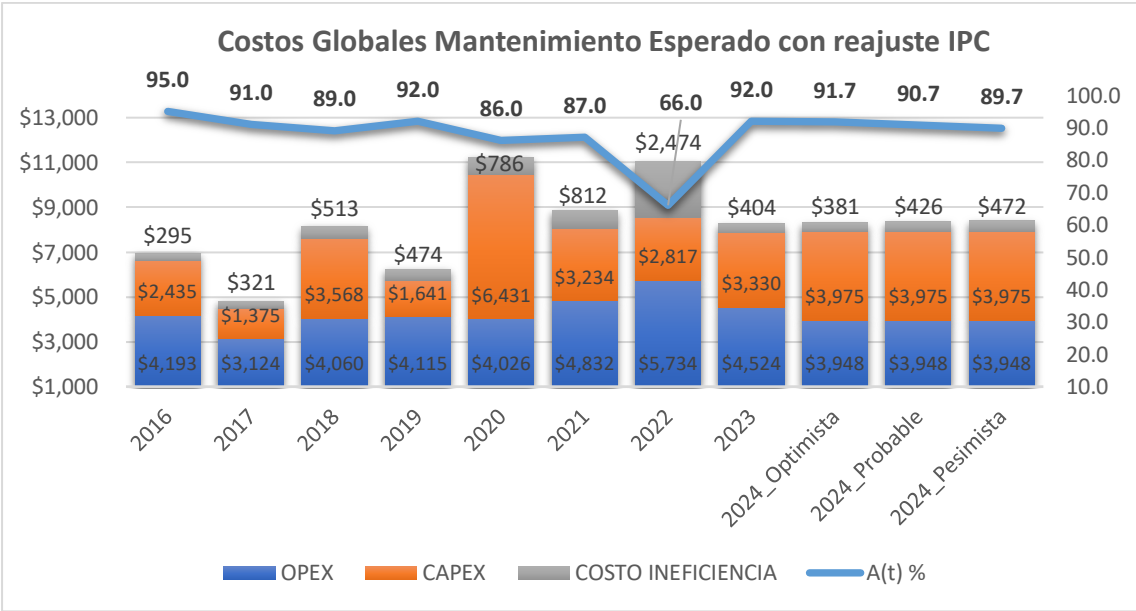


Gráfico 27 Costos Globales de Mantenimiento Esperado

El gráfico 27 indica 3 escenarios de costos globales para el año 2024 en el cual es posible

deducir un régimen estable y controlado de los costos de ineficiencia en base a sus respectivos niveles de disponibilidad.

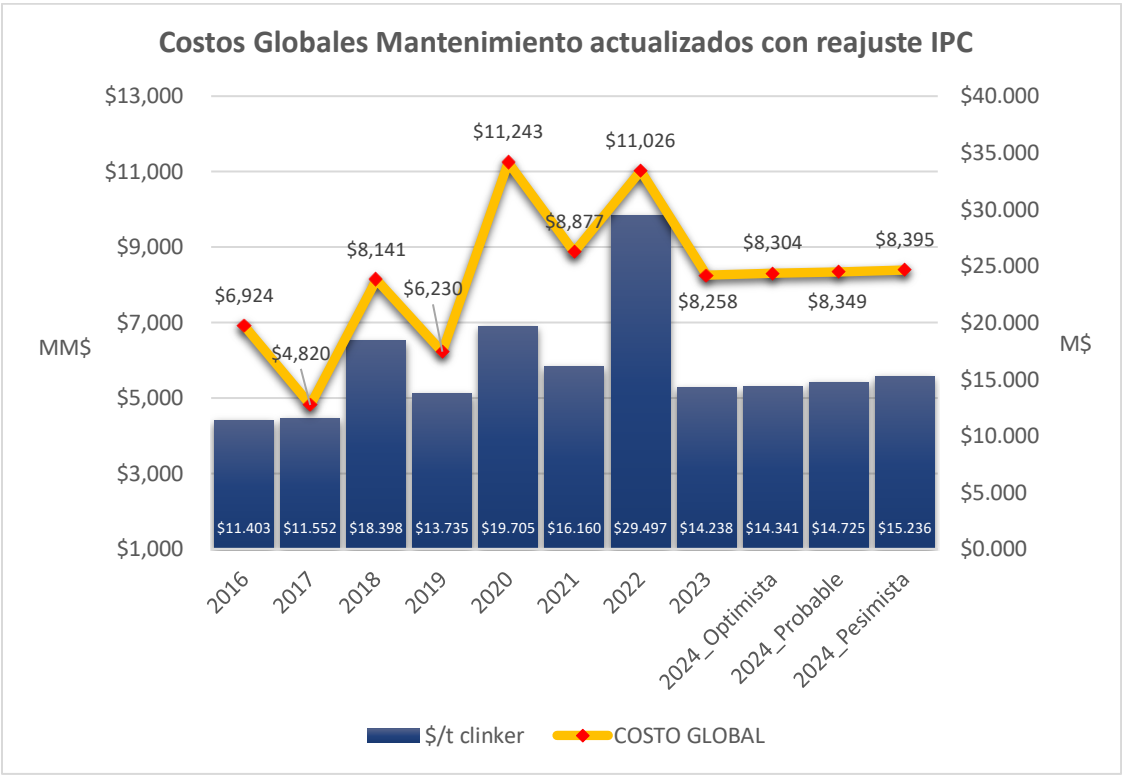


Gráfico 28 Costos Globales actualizados con reajuste IPC

El gráfico 28 desarrolla una proyección de costos globales y el costo por tonelada de clinker producida en la cual se observa 3 escenarios probables en base a la disponibilidad simulada y que mantiene un régimen estable y controlado respecto del año vigente.

12 Conclusiones

12.1 Respetto del análisis de datos de tiempo de funcionamiento y reparación del Horno

Nº9

El análisis de datos permite indicar una alta variabilidad de los tiempos de funcionamiento y reparación del horno Nº9 en donde al realizar en una primera instancia la depuración de los datos inicialmente se identifican reparaciones “anidadas” en donde existen funcionamiento de hasta 1 hora (inclusive menor) y que como primer análisis existe la condición de tasa de falla prematura en la cual se encuentra condiciones de entrega fallida ocasionando ineficiencias en la producción de clinker, es por ello que este factor es clave reforzar dentro del área de mantenimiento en donde deben existir parámetros de entrega de equipo así como también modificar la lógica del sistema de gestión de paro (SGP) que logre identificar un criterio de funcionamiento mayor a 12 horas.

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
β	0,54	0,63	0,48	0,71	0,42	0,55	0,43	0,37
Campaña	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	Nº7	Nº8
β	0,52	0,56	0,62	0,52	0,55	0,61	0,60	0,36

Tabla 42 Parámetros Beta antes de la depuración

Respetto de los años 2017 y 2018 cabe señalar que fueron afectados por variables de mercado (sobre stock de clinker en acopio) y condiciones de recepción de materias primas (inconvenientes para la continuidad de producción de clinker) respectivamente y que por ello se observa un bajo nivel de producción de clinker por lo que estas variables no son parte del análisis y en consecuencia se ve afectada la disponibilidad y capacidad de producción de la Planta fuertemente en estos años, sin embargo es oportuno señalar que este efecto produjo una disminución de los costos operativos (Opex) y de capital (Capex) del año 2017 siendo el más significativo del periodo analizado y que permite minimizar a su vez el costo global propio del efecto baja demanda.

El fin de la campaña Nº2 (02 de octubre del 2017) no consideró en su mantenimiento mayor el reemplazo de ladrillos refractarios ocasionando en la campaña Nº3 un total de 208 horas de eventos por caídas de ladrillos refractarios y 39 horas por fugas de material en el sello de alimentación del mismo horno.

En el caso del fin de la campaña Nº5 (28 de junio 2020) tampoco consideró el reemplazo de ladrillos refractarios ocasionando un total de 225 horas de eventos relacionados por caída de

ladrillos. Ambas campañas tuvieron un total de 15 y 22 meses respectivamente teniendo el factor común en la siguiente campaña reemplazo y/o parche por caída de ladrillos.

Esto condición indica una definición clave para el siguiente régimen de funcionamiento del horno en el cual se sugiere un reemplazo cada 12 meses.

El año 2020 y 2022 se observan eventos no recurrentes y de alto impacto al indicador de disponibilidad en el cual acontecieron en ambos periodos observados fallas operacionales tanto de producción como de mantenimiento no solo para el periodo en cuestión sino también para el periodo siguiente por lo que es prudente señalar que deben existir herramientas de investigación para el análisis de causa raíz y su vez mantener visible la historia con sus respectivos planes de acción no solo para la dotación vigente ,sino también para las generaciones que ingresaran a trabajar a la compañía con la finalidad de señalar las lecciones aprendidas, seguimiento del régimen de control establecido y evaluar procesos de mejora continua como parte de la cultura a mantener.

Respecto de las campañas analizadas es posible señalar que, de las 8.024 horas de reparación del periodo observado, 5.072 horas se concentran en Horno, enfriadera, ciclón 54, Variador de frecuencia de ventilador principal y ventilador principal, por lo que es recomendable tener un régimen de mantenimiento especial de estos equipos tanto para el año como para la campaña a desarrollar de funcionamiento del horno.

Causa Aparente	TTR	%	% Acc
C326KI01	3339	55%	55%
C327CC01	857	14%	69%
C323CY54	552	9%	78%
C324VS01	173	3%	80%
C324FA02	151	2%	83%
C327HU01	122	2%	85%
C322PS01	108	2%	87%
C200CN01	85	1%	88%
C327	83	1%	89%
C326WF01	79	1%	91%
C328SC03	67	1%	92%
C323CY52	51	1%	93%
C326BP01	46	1%	93%
C324ES02	46	1%	94%
C328ES01	39	1%	95%
Giros	34	1%	95%
C322DC03	34	1%	96%
C324DC01DG01	30	0%	96%
C324ES01	30	0%	97%
C323CY51	28	0%	97%
C328ES02	28	0%	98%
C309BC01	27	0%	98%
C324TW01VV01	26	0%	99%
C327CR01	23	0%	99%
Molino 18 y 19	22	0%	99%
C323	21	0%	100%
C323WF01	21	0%	100%
Total [horas]	6.122		

Tabla 43 Equipos con mayor tiempo de reparación acumulado

12.2 Respetto del Análisis de los Costos Globales

Considerando los costos globales con reajuste IPC es posible observar un año 2016 óptimo en donde existe un costo por tonelada de clinker de \$11.403, posteriormente y como se indicó en el punto 11.1 los años 2017 y 2018 se vieron beneficiados por factores externos. Para el año 2019 puede considerarse como un año positivo, no obstante, a partir del año 2020 y hasta el año 2022 se considera el escenario más negativo en términos de costos globales, siendo el año 2022 el periodo más significativo en costo de ineficiencia.

Ahora bien, el año 2023 permite establecer un régimen dentro de los parámetros y propone a través del modelo de simulación un complemento para establecer el costo global proyectado para el año 2024.

12.3 Respetto del Análisis del Modelo y Simulación de Funcionamiento-Reparación Horno N°9

El modelo es robusto, ya que permite establecer parámetros de funcionamiento en base a su data histórica más reciente, no obstante, es necesario indicar que es mejorable estableciendo componentes en bloque RBD para una mejor condición de simulación, ahora bien, esta herramienta permitirá a la compañía diseñar un cambio en los modelos deterministas y considerar la variabilidad como parte del proceso y toma de decisiones.

Esta herramienta indica un nivel de capacidad de producción anual esperada para el año 2024 de 569.000 T lo que no cumple con el presupuesto y que hoy abre una discusión respecto de los mantenimientos mayores, plan operacional, rendimiento en funcionamiento y niveles de presupuesto tanto en inversión como costos operacionales.

Esta memoria se encuentra hoy aportando en la táctica del año 2024.

13 Referencias

- Melón (1985) Revista 75° aniversario
- Moubray, J., (2004). Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-centered Maintenance. Argentina: Buenos Aires. España: Madrid.
- Fernández A., (2005). Optimización del mantenimiento. Implementación de la metodología RCM en máximo. España: Madrid.
- Crespo, A., (2007). The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems. Inglaterra: Londres.
- Parra C., (2008). Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-centered Maintenance. Inge Con. España: Sevilla.
- Melón (2009) Libro 100 obras en nuestros primeros 100 años
- Gil Sánchez, D. J. (2012). Desarrollo de un modelo analítico para la evaluación y optimización estructural de hornos rotatorios de clinkerización.
- Ahmad R. y Kamaruddin S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. Computers & Industrial Engineering, 135-149.
- García Palencia, O (2013). Gestión Moderna de Activos, base de la Excelencia Operacional.
- Mejía C., (2013). *Indicadores de efectividad y eficacia*. Colombia: Medellín
- Zio E. (2013). Evaluating maintenance policies by quantitative modelling and analysis. Reliability Engineering and System Safety, 53-65.
- Segura Miranda, S., & Cruz Estrada, F(2015). Aplicación de mantenimiento centrado en la confiabilidad en una empresa productora de cementos y concretos para la industria de la construcción.
- ISO 14224 (2016). Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. United Kingdom.
- Cano, M (2016) impacto de la Confiabilidad en el desempeño de un aerogenerador de gran potencia. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile
- Beltrán, M (2019) Herramienta de Control para cuantificar la efectividad de un Plan de mantenimiento. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile
- Briones, A., Oliva, I., & Hernández, K. R. (2020). Industria del Cemento en Chile: CBB y su mirada al futuro. *Estudios de Administración*, 27(2).
- Tirado, J. L. C., Alarcón, M. A. O., & Valencia, P. A. O. (2022). Horno cementero rotatorio:

una revisión al control mediante sistemas expertos. *Tecnológicas*, 25(55), e2391-e2391.

Melón (2021) Proyecto de Excelencia Operacional