

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA
VALPARAISO - CHILE



**“DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMA DE
REPORTABILIDAD PARA LOS KPI DE
MANTENIMIENTO DEL AREA DE TRANQUE
DE AGUA Y MINERODUCTO DE LA
COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE
COLLAHUASI”**

FRANCO DARIO ASTORGA ZAMORANO

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: ING. RAFAEL MENA YANSEN.

MARZO 2022

AGRADECIMIENTOS

La vida ha puesto a mi lado personas muy importantes para mí y que han estado en cada pequeño paso que he dado. Quisiera agradecer antes que todo a mis padres y hermanos que siempre fueron el pilar más firme al cual aferrarme, a mis amigos y compañeros de memoria con los que forje lazos que perduran en el tiempo y me han apoyado en todo el proceso.

Y finalmente a mi pareja y mi pequeña hija que llegaron a mi vida para darme las fuerzas de seguir adelante a pesar de todo y que han sostenido mi mano todo este tiempo, haciendo de mi mundo un lugar en el que amo estar.

RESUMEN

La gestión de disponibilidad de equipos pesados viene a ser la solución de los problemas de aprovechamiento de maquinaria en un tiempo acotado de uso, como también permite establecer un planeamiento, programación y organización adecuada para atender fallas en un tiempo oportuno. La manera de saber si la gestión de disponibilidad es llevada adecuadamente corresponde, en este caso, al uso de herramientas KPI, que proporcionaran valores establecidos que indiquen si los resultados obtenidos están dentro de parámetros esperados para la correcta administración de equipos.

Actualmente en la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, existe la gerencia de trabajo de tranque, aguas y mineroducto, incorporada recientemente al directorio minero, la cual no cuenta con herramientas de reportabilidad de KPI de mantenimiento de los equipos críticos de trabajo.

Conforme a ello, se desarrolla un Dashboard de trabajo en el programa Power BI, en el cual es posible mostrar de forma sencilla y concreta los KPI's solicitados, cumplimiento de actividades, horas hombres ocupadas por sobre las disponibles, disponibilidad, MTBF, MTTR. Para el logro de este objetivo se plantea un análisis previo de criticidad de todos los equipos a cargo del área, realizando una clasificación exhaustiva y una jerarquización de estos, con el fin de identificar todo modo de falla posible para cada equipo registrados en la base de datos. El análisis de KPI fue posible realizar por medio de la utilización del diagrama de Pareto, el cual contiene los diferentes tipos de fallas de los activos e indicadores de reprocesos.

A partir de la información recopilada y una conexión directa con softwares internos de manejo de datos de la compañía, se elabora un dashboard en un formato universal, donde todos los trabajadores de la compañía puedan acceder a la información desde su computadora o celular.

ABSTRACT

The availability management of heavy equipment comes to be the solution to the problems of utilization of machinery in a limited time of use, as well as it allows to establish an adequate planning, programming, and organization to deal with failures in a timely manner. The way to know if the availability management is carried out properly corresponds, in this case, to the use of KPI tools, which provide established values that indicate if the results obtained are within the expected parameters for the correct management of equipment.

Currently, in the Doña Inés de Collahuasi Mining Company, there is a dam, water, and pipeline work management, recently incorporated into the mining directory, which does not have KPI reporting tools for maintenance of critical work equipment.

In accordance with this, a work Dashboard is developed in the Power BI program, in which it is possible to show in a simple and concrete way the requested KPIs, fulfillment of activities, man-hours occupied over those available, availability, MTBF, MTTR. To achieve this objective, a prior analysis of the criticality of all the equipment in charge of the area is proposed, carrying out an exhaustive classification and a hierarchy of these, to identify all possible failure modes for each equipment registered in the database. data. The KPI analysis was possible using the Pareto diagram, which contains the different types of asset failures and reprocessing indicators.

Based on the information collected and a direct connection with the company's internal data management software, a dashboard is created in a universal format, where all the company's workers can access the information from their computer or cell phone.

GLOSARIO

Dashboard: Herramienta de gestión de la información que monitoriza, analiza y muestra de manera visual los indicadores clave de desempeño (KPI), métricas y datos fundamentales para hacer un seguimiento del estado de una empresa, un departamento, una campaña o un proceso específico.

HH (Horas hombre): unidad de medida empleada en gestión para medir los esfuerzos necesarios de cada trabajador para completar una tarea.

KPI (Key Performance Indicator): Indicador clave de desempeño, el cual mide el nivel de rendimiento de un proceso. Suele estar directamente relacionado con un objetivo establecido con anterioridad. Normalmente es expresado en unidades porcentuales.

MST (Maintenance Schedule Task): Mantenimiento o tareas programadas

Query: Pregunta o consulta, en términos informáticos, una query es una petición precisa para obtener información de una base de datos o sistema de información

Reproceso: Acción tomada sobre un producto o sistema no conforme para que cumpla con los requisitos.

WO (Work Order): Orden de trabajo proveniente de previa solicitud o work request.

WR (Work request): Solicitud de trabajo

INDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
INDICE.....	6
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 1. OBJETIVOS, ALCANCES Y LIMITACIONES.	11
1.1 Objetivo general.....	11
1.2 Objetivos específicos.	11
1.3 Alcances.	11
1.4 Limitaciones.....	12
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE LA COMPAÑÍA.....	13
2.1. Mercado	14
2.2. Visión, propósito y valores.	15
2.3. Operación, producción y ventas.	16
2.4. Ciclo de gestión de riesgos (CGR).	18
2.5. Respecto a la Gerencia Tranque, Aguas y Mineroducto CMDIC.	21
2.6. Situación Actual	23
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	24
3.1. Indicadores de gestión de mantenimiento.....	24
3.1.1. Disponibilidad	25
3.1.2. Utilización mano de obra.....	27
3.1.3. MTBF, tiempo medio entre fallas	28
3.1.4. MTTR, tiempo medio para reparar	29
3.1.5. Cumplimiento del plan de mantenimiento.....	29
3.2. Criticidad.....	30
3.2.1. Método cuantitativo: Diagrama de Pareto	30

3.2.2. Método cualitativo.....	30
3.3. Indicadores de reproceso.....	33
3.4. Gestión de mantenimiento.....	34
3.4.1. Mantenimiento preventivo	34
3.4.2. Mantenimiento correctivo	35
3.4.3. Mantenimiento predictivo	36
3.5. Herramientas de inteligencia.	36
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE SISTEMA DE REPORTABILIDAD DE KPI.....	38
4.1. Análisis de criticidad.....	39
4.2. Obtención de datos.....	39
4.3. Reporte cumplimiento de actividades	41
4.4. Ejecución de actividades.....	41
4.5. Control de horas hombre	43
4.6. Reporte de KPI'S de mantenimiento de equipos	44
4.6.1. Tiempo de detención mensual.....	46
4.6.2. Mean time to repair (MTTR).....	48
4.6.3. Mean Time Between failures (MTBF).....	49
4.6.4. Disponibilidad	50
4.6.5. Diagrama de Pareto.	52
4.6.6. KPI de reproceso.....	55
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	59
REFERENCIAS	61
ANEXOS.....	63
ANEXO 1. EXTRACTO DE TABLA DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD	63

INTRODUCCIÓN

La producción de cobre en el país es una de las principales fuentes de ingreso debido a la gran riqueza de mineral que predomina en las regiones del norte. Dada la extensión que las operaciones mineras tienen es imprescindible contar con una gran cantidad de personal competente en realizar labores del área, siendo esto el impulso para que la gran parte de las economías de la zona norte del país giren en torno a este rubro.

El proceso de extracción del cobre genera mayor gasto, debido a los procesos asociados al procesamiento físico-químico que es realizado sobre el mineral. Inicialmente mediante equipos de gran tamaño se trona la roca para obtener material de gran tamaño dispuesto a ser posteriormente reducido por medio de chancadores, los cuales depositan el mineral en correas transportadoras que terminan llevándolo a un stockpile, donde se extrae el material para alimentar a la planta concentradora en la cual se realiza una extracción parcial del cobre y molibdeno, por medio de la mezcla de agua extraída de pozos cercanos o agua desalinizada de mar, junto a químicos extractantes. De esta forma se obtiene el concentrado de cobre o pulpa, el cual es transportado a una planta de procesamiento ubicado cerca del punto de embarcación, donde se extrae el cobre fino y el molibdeno.

Estos últimos años, han aparecido nuevas técnicas y herramientas que, ayudan y mejoran la toma de decisiones respecto a temas de disponibilidad, incorporado en ello técnicas de predicción de fallas que permiten definir políticas preventivas de mantenimiento justificadas estadísticamente. A pesar de esto, pocas se preocupan realmente de contar con una implementación de una política de mantenimiento actualizada [1].

Existen industrias en particular donde hablar de mantenimiento corresponde a un factor clave dentro del desarrollo de una actividad económica, destacando en ello empresas del área minera y explotación de recursos naturales como petroleras, industria nuclear, aerolíneas o automotriz [2].

En minería, los equipos utilizados tanto para la extracción y procesamiento de los minerales obtenidos y recursos secundarios, producto de la explotación en faenas, son sumamente especializados y fundamentales para el correcto funcionamiento de la empresa, donde una falla de maquinaria o la falta de disponibilidad por no mantenimiento puede conllevar a la detención de producción y falta al plan de trabajo. De esta manera, resulta indispensable una buena prevención de disponibilidad y fallas en los equipos, mediante un correcto sistema de reportabilidad.

Compañía minera Doña Inés de Collahuasi es una empresa dedicada principalmente a la extracción y producción de cobre fino y molibdeno, siendo su meta poder obtener la mayor cantidad posible de material, dentro de lo que sus instalaciones permitan, es por esto por lo que es de vital importancia para la compañía poder mantener sus equipos funcionando en el mejor estado posible.

Dentro de sus instalaciones se encuentra la gerencia de tranque, aguas y mineroducto, donde se controlan todos los equipos relacionados con el tranque de relaves, abastecimientos de agua potable y no potable, bombas de desplazamiento positivo, mineroductos y desalinización de agua. Cada uno de los equipos controlados por esta área son de vital importancia para la continuidad en la cadena de producción de concentrado, por ello, su correcto mantenimiento debe ser una prioridad dentro de la gerencia.

Dando cuenta lo anterior, es que los KPI de mantenimiento toman un rol vital en la toma de decisiones de la gerencia con el fin de presentar la mayor disponibilidad posible de los equipos críticos y asegurar la continuidad en el proceso de generación de concentrado.

Este trabajo se ocupa particularmente en estudiar los equipos bajo el cargo de la gerencia y determinar a partir de una base de datos y registros históricos, los principales modos de falla, número de detenciones, reparaciones y sus respectivos tiempos asociados, para poder reunir la información y presentarla de manera sencilla en un dashboard accesible a toda la compañía. Además, se estudian las actividades asociadas

a los equipos para poder realizar reportes de cumplimiento diario y de horas hombres disponibles versus utilizadas, los cuales serán utilizados como herramientas de gestión de actividades por la gerencia.

CAPÍTULO 1. OBJETIVOS, ALCANCES Y LIMITACIONES.

1.1 Objetivo general.

Facilitar el monitoreo de los activos críticos de la Gerencia de Tranque, Agua y Mineroducto (GTAM) a través de una interfaz gráfica.

1.2 Objetivos específicos.

- Realizar análisis de criticidad y jerarquización de los equipos pertenecientes a GTAM.
- Realizar análisis funcional, identificación de fallas, modos de falla y efectos de éstas en los activos más críticos.
- Reconocer y obtener KPI's de mantenimientos de los equipos críticos con la ayuda de softwares de gestión de datos internos de la empresa.
- Administrar datos obtenidos y gestionar reportabilidad de estos en un formato universal.

1.3 Alcances.

Los alcances de este trabajo serán dados por la misma gerencia, dependiendo de la cantidad de KPI's que se estimen convenientes, esto incluye los más básicos como la disponibilidad, MTTR, MTBF, back logs y reproceso de los equipos que presenten una mayor criticidad. Obtenidos los datos necesarios, se construirán a partir de ellos, diagramas de Pareto y gráficos representativos que muestren de manera sencilla lo más esencial de cada equipo.

1.4 Limitaciones.

Las herramientas que serán creadas solo serán utilizables por gente de la empresa, es decir, al intentar abrir los archivos fuera de ella no será posible actualizar datos ni enlaces directos con los equipos debido a que se considera información confidencial de la compañía.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE LA COMPAÑÍA

Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), ubicada en la comuna de Pica, Región de Tarapacá, Chile, es una empresa minera dedicada a la extracción, explotación de minerales y producción de concentrado, cátodos de cobre, y concentrado de molibdeno como subproducto.

Si bien Collahuasi inicia su explotación en 1880, no es hasta 1999 que la compañía minera inaugura su explotación comercial dando origen a una de las minas más grandes en Chile y el mundo. Actualmente es la tercera operación minera de cobre más grande del país tras Escondida y Codelco, y la tercera a nivel mundial según el International Copper Study Group.

Este distrito minero cuenta con dos áreas operacionales siendo estos “Área Cordillera” y “Área puerto”, donde en la primera se encuentran los rajes Ujina, Huinquintipa y Rosario, de los cuales actualmente sólo se explota este último, mientras que en Área Puerto, ubicado en Punta Patache en Iquique, a 65 km al sur de la ciudad de Iquique, se procesa el concentrado obtenido durante el proceso de flotación, el cual es transportado por 203[km] de mineroducto hasta el puerto para luego ser filtrado y embarcado para su venta internacional posteriormente. La planta concentradora se ubica en el sector de Ujina.



Figura 1. Vista satelital rajes de Ujina y Rosario.

La Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi es la encargada de las operaciones de explotación del complejo minero. Además, es parte de una sociedad contractual que pertenece a:

- Anglo American (44%): La cual es una de las mayores compañías mineras del mundo, su casa matriz está en el Reino Unido y cotiza principalmente en la bolsa de Londres.
- Glencore (44%): Es una de las empresas de recursos naturales más grandes del mundo. Líder en la producción y comercialización de materias primas.
- Mitsui (12%): El consorcio japonés está encabezado por Mitsui & Co., Ltd., una de las mayores compañías de trading de la nación nipona.

En 2016, Collahuasi contó con una fuerza laboral total de 5.945 trabajadores, compuesta en un 36% por dotación propia y un 64% de colaboradores. Además, de la proporción de trabajadores propios, un 44,8% de estos provinieron de la Región de Tarapacá.

Para la Compañía la sustentabilidad constituye el eje central y marco rector de su actuar y aplica a todos los niveles de la organización: personas, proyectos, operaciones, instalaciones y productos.

Respecto de los costos, gracias a las mejoras operacionales y de gestión que se han implementado en los últimos años, poniendo foco en su cadena de valor y asegurando la eficiencia de sus procesos, se bajó el costo operacional a US\$1,14 la libra, cercano al primer cuartil de la industria. De esta forma, Collahuasi ha podido sortear el complejo escenario de precios que ha atravesado la industria los últimos años.

2.1. Mercado

La producción de concentrado y cátodos de cobre de Collahuasi se distribuye en diferentes países de Asia, Europa, Latinoamérica y Oceanía, siendo China el principal comprador de concentrado de cobre, adquiriendo un 33,4% del total de la producción, mientras que Corea es el principal receptor de cátodos, con un 79% del total producido

por la compañía. Cabe mencionar que un 23,8% de la producción de concentrado se comercializó en el mercado nacional.

El listado de países para venta de concentrado y cátodos de cobre es detallado a continuación:

- **Países venta de concentrado:**

China (33,4%), Chile (24,7%), India (11,4%), Japón (3,0%), Corea (6,8%), Rumania (0,0%), Brasil (3,1%), España (3,8%), Suecia (0,0%), Filipinas (2,7%), Finlandia (3,0%), Perú (2,8%), Rusia (1,6%), Bulgaria (1,6%), Alemania (0,9%), Australia (0,6%), Malasia (0,5%).

- **Países venta de cátodos:**

China (21%), Corea (79%).

En 2017, el 99,9% de las ventas realizadas fue representado por concentrado de cobre, mientras que el porcentaje restante correspondía a ventas de cátodos.

2.2. Visión, propósito y valores.

La visión de Collahuasi se enmarca en la estrategia global definida para el quinquenio 2015-2019, cuyo foco es el Desarrollo Sustentable de la compañía. Mientras que el propósito que ellos definen está orientado al liderazgo con pasión de un negocio de excelencia con la finalidad de construir una sociedad mejor, ya que entienden que la empresa es mucho más que cobre, esto implica reforzar y enfatizar la sustentabilidad sobre los siguientes ejes:

- Trabajar con foco en la gestión de riesgos, buscando la excelencia operacional.
- Fortalecer la gestión más allá de la empresa, afianzando la relación con las comunidades y los colaboradores.
- Que toda la organización entienda a cabalidad cuál es el propósito de la Compañía para concretarlo con pasión y entusiasmo.

- Acentuar el valor que tienen las personas para la organización, con énfasis en generar un compromiso e identificación de todos quienes son parte de Collahuasi.
- Ejercer un liderazgo que comparta y transmita el propósito de la Compañía, planteándolo con una mirada de largo plazo.

Por otro lado, la compañía minera basa su comportamiento operacional, humano y gestión en base a una carta de valores, la cual todo trabajador perteneciente a ella debe vivir día a día la carta de valores y representar por medio de acciones su compromiso hacia la institución. Los valores representativos de la compañía son:

- | | |
|-------------------|-------------------|
| ▪ Seguridad. | ▪ Respeto. |
| ▪ Honestidad. | ▪ Pasión. |
| ▪ Reconocimiento. | ▪ Responsabilidad |

2.3. Operación, producción y ventas.

La explotación se realiza a rajo abierto y actualmente está concentrada en el yacimiento Rosario, ubicado a 4600 msnm, y en menor medida en el yacimiento de Huinquantipa.

La compañía cuenta con dos procesos productivos en sus yacimientos, una línea destinada al procesamiento de sulfuros y otra para óxidos, las que producen cobre y molibdeno. Desde el año 2015 el proceso productivo para óxidos de cobre se encuentra detenido por razones de interés de la empresa, debido a la caída del precio del cobre y al elevado costo que presenta el proceso de lixiviación y electro refinación.

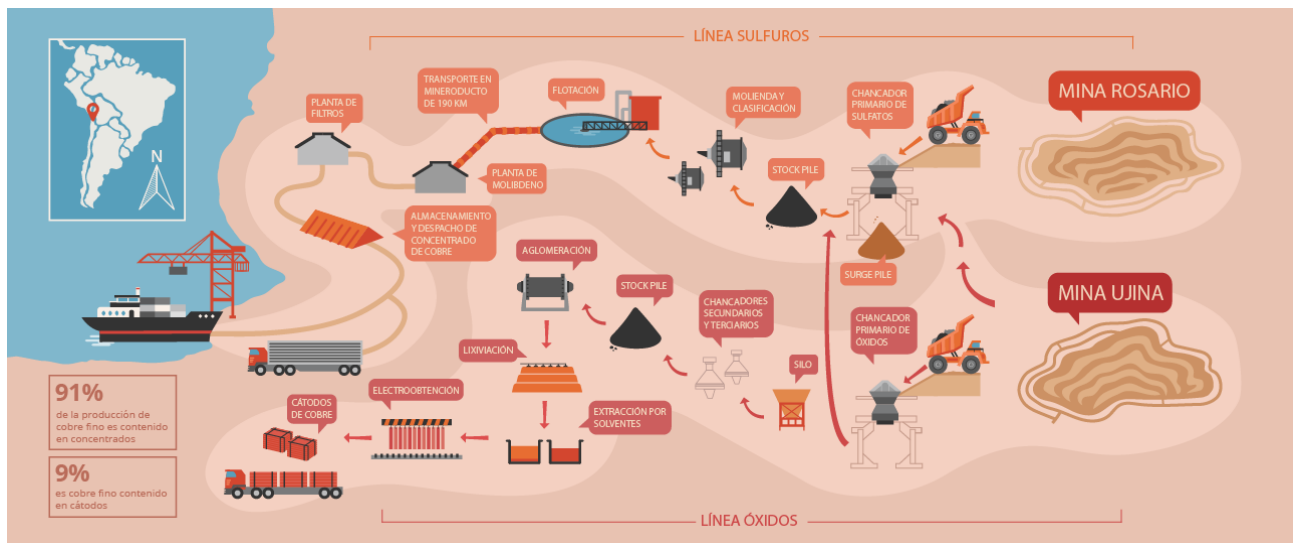


Figura 2. Proceso productivo de cobre fino y molibdeno.

En cuanto a producción y ventas, hacia el año 2017 Collahuasi produjo 523,982 mil toneladas de cobre fino, 2,893 mil toneladas de molibdeno, obteniendo ingresos de USD\$2286 millones, y un EBITDA de USD\$1811 millones. Dichos valores tienden a ir en aumento en el período 2015 – 2017.

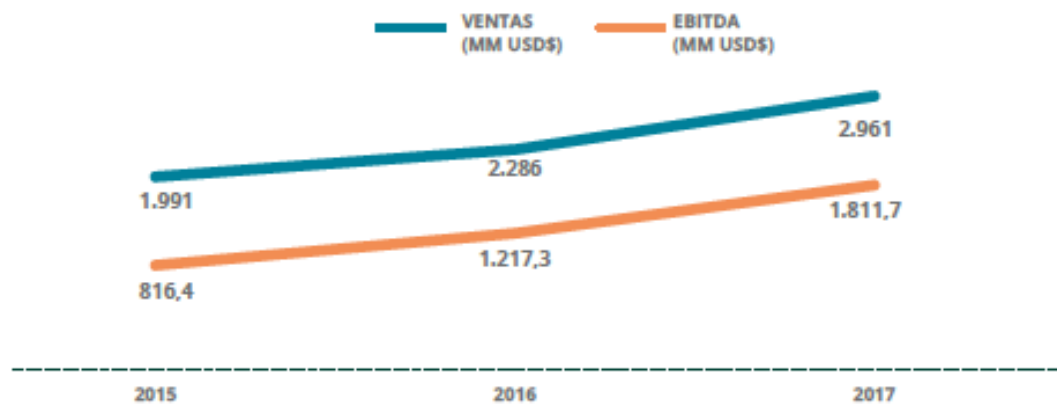


Figura 3. Curva de ventas y EBITDA periodo 2015-2017.

Tabla 1. Producción anual cobre fino y molibdeno periodo 2015-2017.

	2015	2016	2017
Producción cobre fino [ton]	455.328	506.534	523.982
Producción molibdeno [ton]	5.181	3.698	2.893

2.4. Ciclo de gestión de riesgos (CGR).

El ciclo de gestión de riesgos adoptado por la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi busca una mejora integral de la competitividad, productos y servicios, mejorando continuamente la calidad, reduciendo los costos, optimizando la productividad, reduciendo los precios, incrementando la participación del mercado y aumentando la rentabilidad de la empresa u organización. Este ciclo de gestión está basado principalmente en conocido “Ciclo de Deming” o ciclo PDCA, el cual corresponde a una estrategia de mejora continua de la calidad en cuatro pasos a realizar: planificar, hacer, controlar o verificar y actuar (ver Figura 4).

En este proceso de gestión, Collahuasi puso énfasis en que la organización estableciera con claridad la planificación de sus operaciones y de cada proceso realizado dentro de éstas, dado que es ahí donde se controlan los procesos y se genera el valor, palabras dichas por el Superintendente de Control de Gestión. Bajo este concepto establecieron su herramienta de gestión de riesgo, la que fue aplicada a todos los procesos.



Figura 4. Ciclo de Deming.

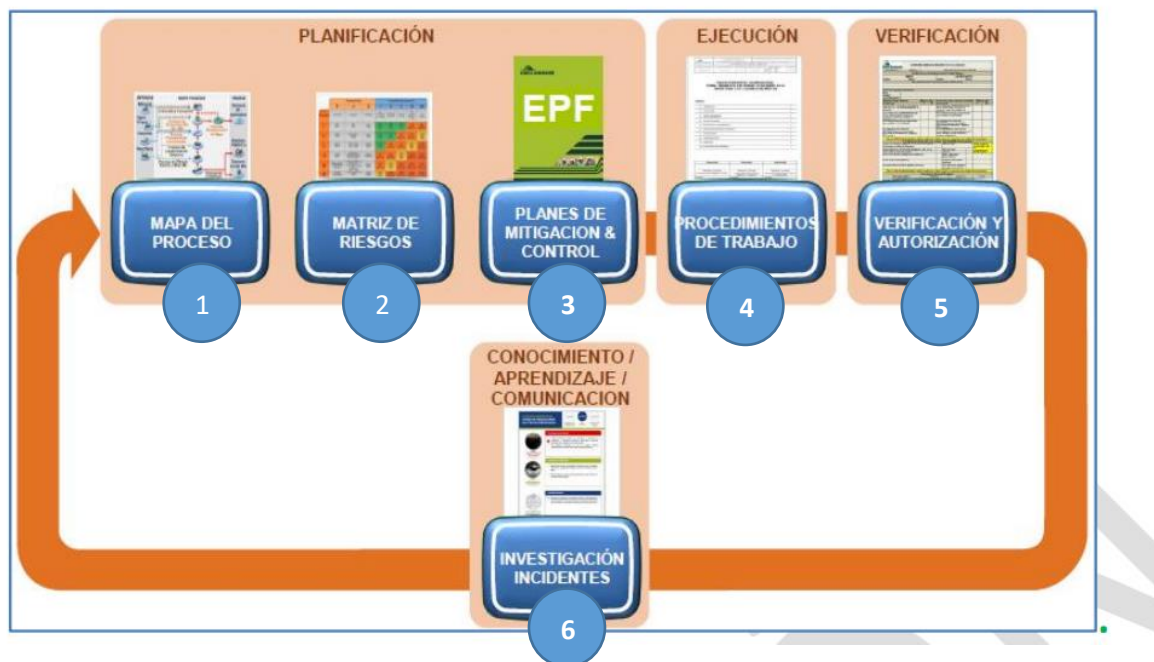


Figura 5. Ciclo de gestión de riesgos Collahuasi.

En cuanto al ciclo de gestión de riesgo, las etapas se organizan en seis bloques denominados “cajas”, los cuales se pueden apreciar en Figura 5 y que son descritos a continuación.

1. Mapa del proceso: Es la representación gráfica, simple y comprensible de un proceso de la compañía, diseñado por un gerente de área. En él se muestra proceso propiamente tal, los sub-procesos que lo componen y sus actividades relacionadas, con sus respectivas entradas y salidas.
2. Matriz de riesgos: Técnica que permite identificar el peligro y evaluar los riesgos a personas, operaciones, calidad, medioambiente, comunidad y finalmente a nuestro negocio. Se emplea una matriz 5x5, calculando el valor esperado de pérdida a través de la probabilidad y severidad expresado en riesgo puro y residual. Con ello califica, según corresponda, a una actividad o proceso como de alto, medio y bajo riesgo. Como parte de su rol, es responsabilidad del Gerente y Superintendente (este último especialmente en la modificación sistemática).
3. Planes de mitigación y control: Contiene los controles debidamente jerarquizados, para mitigar o eliminar los riesgos. Acá se ubican los de tipo administrativos, como equipo

protección personal, estándares para prevención de fatalidades, operacionales y los de Ingeniería (duros) tales como ingeniería de mitigación, reemplazo, aislamiento. Los define el Gerente respectivo.

Tabla 2. Estándares para la prevención de fatalidades.

Estándar	Descripción
EPF 1	Vehículos de carretera.
EPF 2	Equipos móviles de superficie.
EPF 3	Manejo de sustancias peligrosas.
EPF 4	Protecciones de equipos.
EPF 5	Aislamiento y Bloqueo.
EPF 6	Trabajo en altura.
EPF 7	Operaciones de Levante.
EPF 8	Control del Terreno.

4. Procedimiento de trabajo: Es el qué debe realizar un trabajador. Esto representado en las actividades y tareas que las componen, que se ejecutan teniendo especial énfasis en la aplicación de los controles antes definidos. Desde esta etapa nacen los Procedimientos e Instructivos de trabajo, cada actividad definida en los procesos debe contar con el registro escrito de lo que se ejecuta. Los construyen superintendentes, supervisores y trabajadores.
5. Verificación y autorización: Etapa en la cual se verifica que controles establecidos en la etapa de “Planificación” del Ciclo de Gestión de Riesgos permitan la ejecución de la actividad con los riesgos controlados. Las herramientas que permiten verificar los controles

establecidos son la Verificación Autorización Trabajo Seguro (VATS), aplicada sobre la planificación de la actividad y la Gestión de Riesgo en Terreno (GRT) que se desarrolla durante la ejecución de una actividad en terreno.

6. Conocimiento, Aprendizaje, Investigación de incidentes: Ésta última etapa reconoce y esfuerza el aprendizaje continuo. Provee información necesaria para identificar brechas de cambio o mejora en nuestros procesos (desde la Etapa número 1 de nuestro Ciclo, que es la Planificación)

2.5. Respecto a la Gerencia Tranque, Aguas y Mineroducto CMDIC.

El desarrollo de este proyecto de tesis se realizó en la Gerencia de Tranque, Aguas y Mineroducto (GTAM), bajo la supervisión del SI Luis López Gatica. La labor de GTAM consta en:

- a. Tratamiento de aguas servidas y de los pozos ubicados en Coposa Norte, Coposa Sur, Portezuelo.
- b. Distribución, transporte de agua fresca hacia los procesos de flotación y consumo humano.
- c. Desaguado de los yacimientos mineros Rosario y Ujina.
- d. Recuperación de aguas desde el tranque de relaves, para realizar su tratamiento.
- e. Transporte de concentrado de cobre impulsado por bombas GEHO, proveniente de la planta concentradora, mediante un mineroducto de 203 km de longitud hacia el Puerto Collahuasi, ubicado en Punta Patache, a 65 km al sur de Iquique.

A continuación, se presenta el organigrama de GTAM y diagrama EPS.

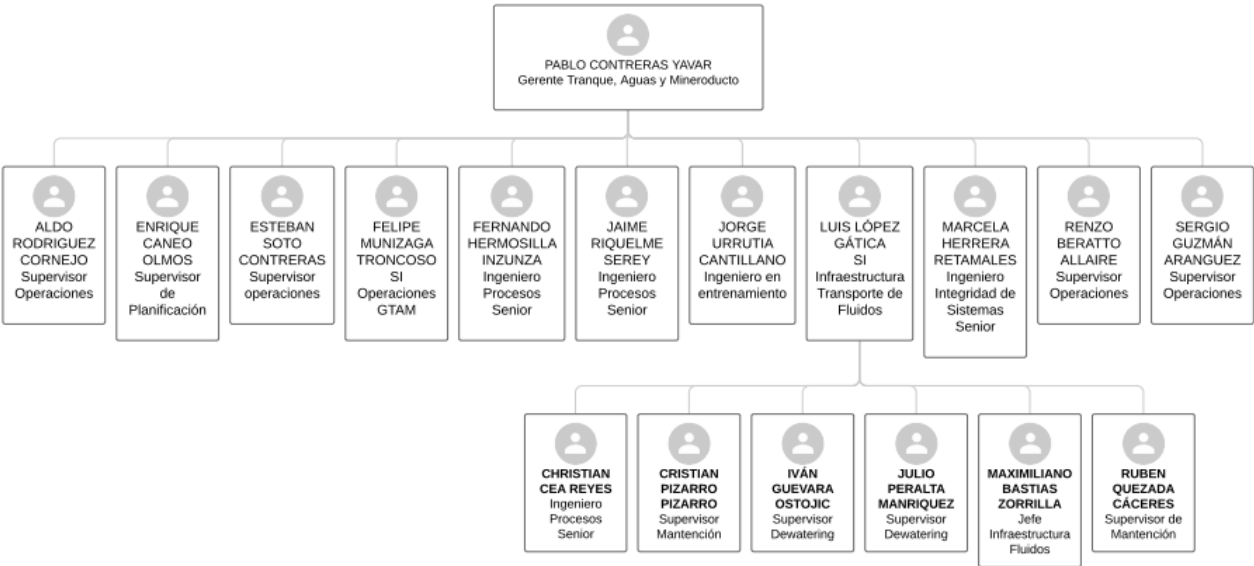


Figura 6. Organigrama GTAM.

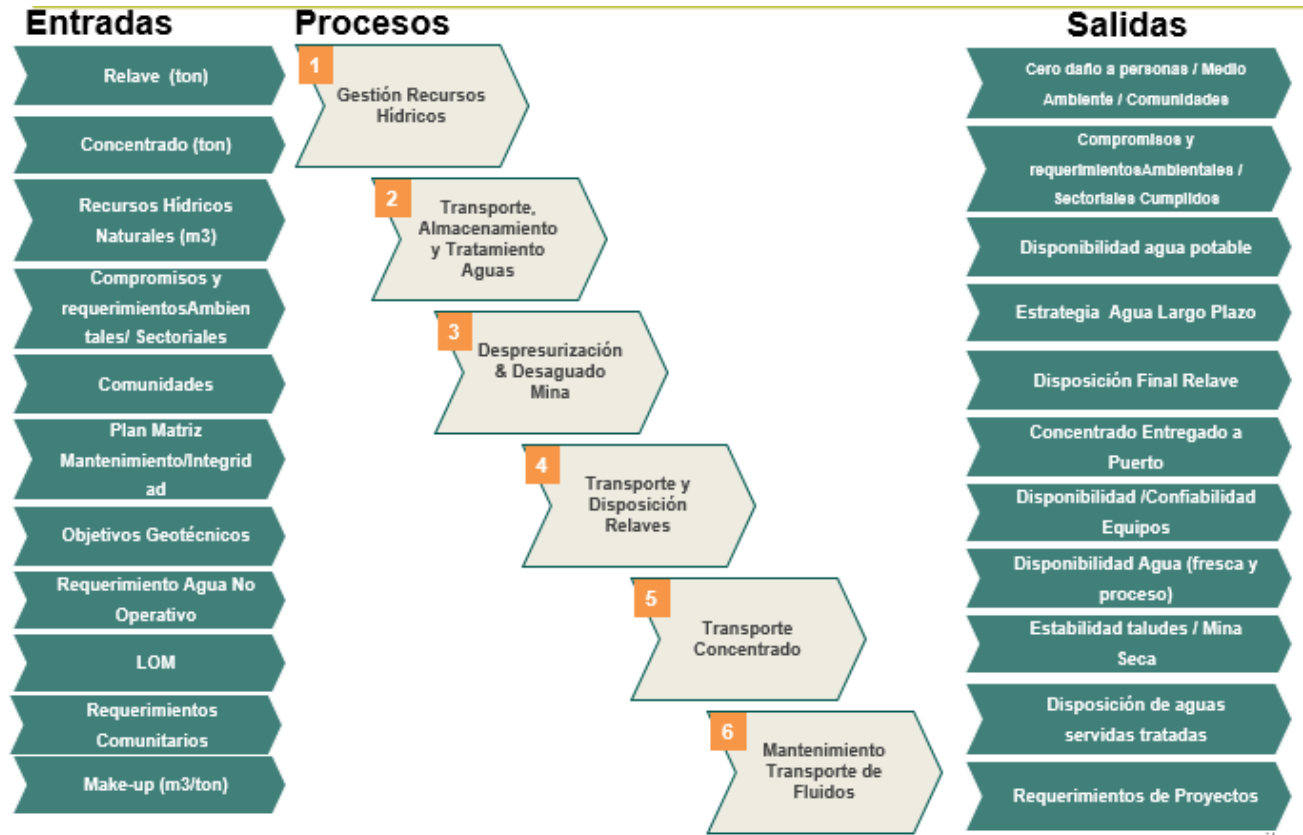


Figura 7. Diagrama EPS GTAM.

2.6. Situación Actual

En la actualidad en el área de agua, tranque y mineroducto no existe un sistema de información o reporte de indicadores de mantenimiento de los más de tres mil equipos existentes, esto se debe principalmente a que el área pertenecía con anterioridad a una gerencia de mayor magnitud llamada GSO (gerencia de servicios operacionales) la cual fue dividida en otras gerencias y sus funciones delegadas en ellas. La gerencia GSO contaba con algunos indicadores de mantenimiento de los equipos de máxima prioridad para ellos, pero al ser un área que abarcaba un rango mucho mayor de operaciones, la mayoría de los equipos con criticidades medias no eran considerados a la hora de realizar análisis temporales.

La separación de la gerencia GSO se traduce en problemas comunicativos entre las nuevas gerencias formadas, existiendo pérdida de información en el proceso. Debido a esto, cada requerimiento originado respecto a la información de equipos que se necesite debe llevar consigo una solicitud anexa la cual debe ser pedida a la GSO, a su vez es esta área la que recopila los datos del equipo solicitado y realiza actualización de indicadores de gestión; proceso el cual es lento y engorroso, sobre el cual debe realizarse una actualización y cambio de modalidad, causa principal del presente estudio.

CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.

El mantenimiento se define como un conjunto de acciones que tienen como principal objetivo asegurar la continuidad funcional de un activo. Estas acciones generan datos, muchas veces miles de ellos, por lo que un debido tratamiento de éstos puede resultar en información valiosa para futuros procedimientos. Con el debido cálculo y gestión de datos se puede obtener un valor numérico de ellos, este valor es mejor conocido como KPI.

Los KPI son métricas que ayudan a identificar el rendimiento de una determinada acción o estrategia, haciendo referencia a una serie de mediciones que se utilizan para sintetizar la información obtenida de estudio, con el fin de poder tomar decisiones y determinar aquellas más efectivas al momento de cumplir objetivos predeterminados en un proceso o proyecto [3].

No cualquier medición realizada puede convertirse en un KPI, debido a que deben cumplir con las siguientes características [4]:

- Medible: característica principal y mencionada con anterioridad. Tener esta característica permite realizar comparaciones, gestiones y mejoras.
- Específico: cada KPI debe estar centrado en un objetivo y área específica.
- Objetivo: los KPI deben ser creados en base a un objetivo, no se trata de realizar mediciones sin tener un propósito base, se mide con el fin de conseguir algo a mejorar.
- Temporal: se debe poder medir a lo largo del tiempo, para poder realizar comparaciones y establecer posibles mejoras.
- Relevantes: deben ser significativos para la empresa.

Las características anteriormente mencionadas, ayudarán a que los indicadores creados sean capaces de informar, establecer un control, gestión, evaluación y ayuden en la toma de decisiones importantes para un proceso y/o proyecto.

3.1. Indicadores de gestión de mantenimiento

Cada nivel dentro de una organización posee distintos indicadores para medir su gestión. Las gerencias no poseen el tiempo suficiente de analizar en su totalidad los indicadores comprendidos en todos los niveles de mantenimiento, por lo que es necesario escoger aquellos indicadores representativos que permitan evidenciar la obtención de resultados esperados y con ello poder

tomar decisiones estratégicas [5]. El número de indicadores a elegir debe ser reducido, debido a que el exceso de información puede generar problemas al momento de tomar decisiones. Normalmente un gerente es capaz de manejar entre 4-8 indicadores al mismo tiempo [6].

Cuando los indicadores de gestión de mantenimiento, KPI (*Key Performance Indicators*) están bien seleccionados, reflejan la situación y la evolución de un departamento de mantenimiento.

Es habitual agrupar estos indicadores en seis categorías, cada una de las cuales aporta una información útil en un determinado aspecto del mantenimiento:

- Indicadores que tienen relación con la disponibilidad de la instalación o una parte de ella, definida la disponibilidad como la proporción del tiempo que la instalación está disponible para producir, frente al tiempo total.
- Indicadores que tienen relación con la fiabilidad, es decir, con la posibilidad de que la instalación o una parte de ella sufra una avería inesperada que obligue a parar la producción
- Indicadores que tienen que ver con el coste del mantenimiento.
- Indicadores relacionados con los órdenes de trabajo y su gestión.
- Indicadores relacionados con la gestión de los materiales (repuestos y consumibles de mantenimiento).
- Indicadores relacionados con el personal y con su rendimiento.

Cada uno de ellos ofrece información útil para conocer el estado del mantenimiento de una instalación, la gestión que se realiza y su evolución, y todo ello para facilitar a los responsables de la instalación la toma de decisiones.

Algunos de los indicadores más usados en las empresas de clase mundial para el control de la gestión del mantenimiento de equipos pesados son los siguientes [5]:

3.1.1. Disponibilidad

En ingeniería de confiabilidad la disponibilidad se define como el tiempo en que un sistema, subsistema o equipo se encuentra en estado de funcionamiento u operable.

La medición de este indicador busca aumentar el rendimiento de activos y minimizar el tiempo muerto no programado, a través del mejoramiento de la fiabilidad del proceso y del equipo.

Comprender la frecuencia con la que fallan los diferentes elementos de equipos es clave para poder prevenir el tiempo muerto no programado.

La disponibilidad es posible mejorar a través de la detección temprana de variantes o irregularidades en los equipos y proporcionando el debido mantenimiento en tiempo real dependiendo de la situación actual del equipo. Además, un debido mantenimiento predictivo reduce la necesidad de programar el tiempo muerto para dar servicio preventivo, lo que garantiza una mayor disponibilidad [7].

Este indicador posee dos enfoques:

- Si se quiere conocer la “Disponibilidad Total” la ecuación de cálculo (1) debe contemplar en las “horas detenidas por mantenimiento” las horas programadas y las horas no programadas (todo tiempo de no operatividad del equipo).
- Si se quiere conocer la “Disponibilidad por Fallas” la ecuación de cálculo (1) debe contemplar en las “horas detenidas por mantenimiento” solamente las horas no planificadas (todo tiempo de no operatividad debido a fallos imprevistos).

En este caso particular la empresa solicita el enfoque de disponibilidad total. Para el cálculo de este indicador es necesario obtener el tiempo disponible, como resta entre el tiempo total y el tiempo por detenciones de mantenimiento programado y no programada. Una vez obtenido se divide el resultado entre el tiempo total del periodo considerado.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Horas totales} - \text{Horas detenidas por mantenimiento}}{\text{Horas totales}} \quad (1)$$

Este indicador por sí solo no es un buen referente para medir una gestión de mantenimiento, por lo que nada aporta respecto a lo que ocurre en el intervalo de medición [5].

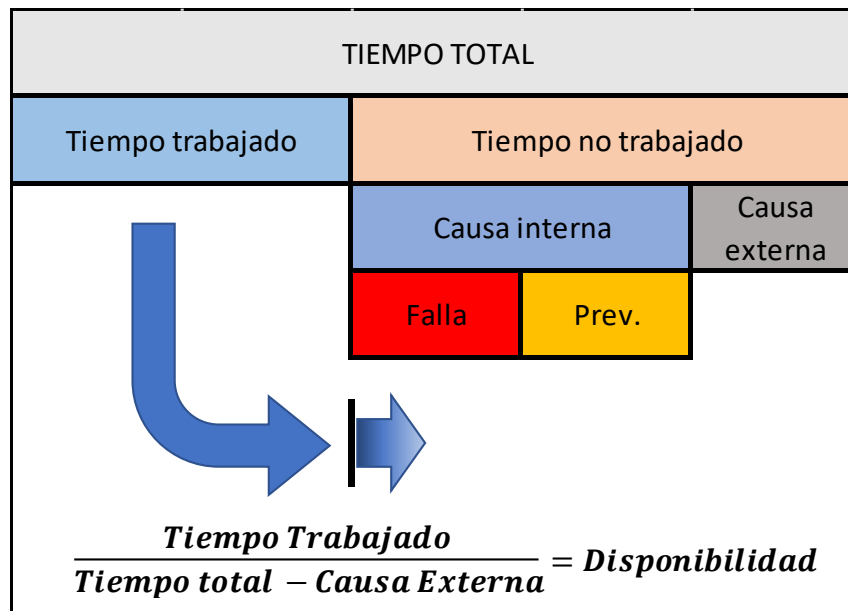


Figura 8. Representación disponibilidad.

3.1.2. Utilización mano de obra

Este indicador busca medir la efectividad con la que son utilizados los recursos humanos en actividades de mantenimiento. Su principal propósito es cuantificar y reducir ineficiencias en la planeación y la correcta utilización del personal disponible. También, en su medición se puede visualizar las horas de trabajo adicional no asignadas en el plan, por lo que, es más fácil distinguir en que actividades fuera de plan se ocupan mayores recursos humanos, por ende, donde se debe poner una mayor atención.

La manera de calcular este indicador es la siguiente:

$$\text{Mano de obra(\%)} = \frac{\text{horas reales mano de obra asignadas a OT's}}{\text{horas totales disponibles}} \times 100 \quad (2)$$

Este indicador debe ser medido a diario y su tendencia analizada cada semana. El propósito de esto es identificar cuanto tiempo se asigna a ordenes de mantenimiento y cuanto de este queda disponible para trabajos fuera del programa. Una baja o muy alta utilización de la mano de obra

indica una falta de control en las actividades programadas, por lo que se debe considerar optimizar tiempos de mantenimiento y distribución de tareas.

Para la correcta interpretación de este indicador es necesario que las horas reales de mano de obra incluyan los tiempos de todas las actividades asociadas a la tarea, como las horas de traslado del personal, horas de alimentación o retrasos por factores externos. Además, en las horas totales deben ser consideradas únicamente las del personal físicamente disponible, por lo que se deben restar las horas correspondientes a vacaciones, enfermedades, permisos y cursos.

3.1.3. MTBF, tiempo medio entre fallas

El indicador MTBF por definición es tiempo medio entre fallas, correspondiendo al tiempo medio o promedio que la máquina trabaja sin presentar alguna falla, dicho de otro modo, es el tiempo transcurrido entre una falla y la siguiente [5].

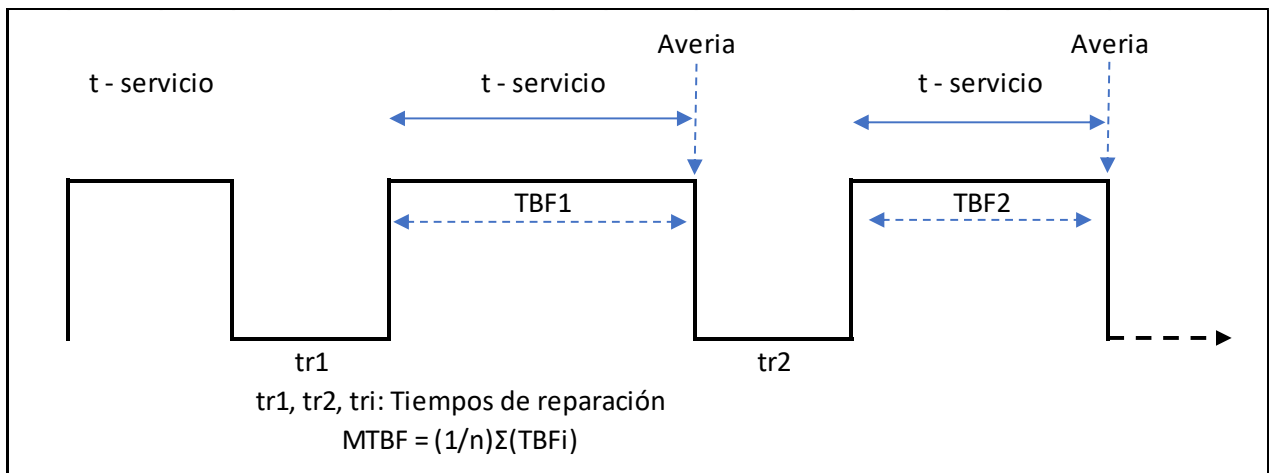


Figura 9. Representación esquemática de MTBF.

Matemáticamente, este indicador se expresa de la siguiente manera:

$$MTBF = \frac{\sum \text{Tiempos de buen funcionamiento}}{\text{numero de fallas.}} \quad (3)$$

Se debe tener en cuenta que mientras mayor sea la población de elementos estudiados, más cierta será nuestra media, por lo que es recomendable realizar el cálculo con datos históricos de los equipos a estudiar.

3.1.4. MTTR, tiempo medio para reparar

El tiempo medio para reparar es el tiempo promedio que toma reparar algo después de la falla. Este indicador toma en consideración los tiempos desde el momento en el que falla o se detiene el equipo hasta el instante en el que se puso nuevamente en funcionamiento, para luego calcular un promedio de estos.

Normalmente este indicador sigue algún tipo de distribución logarítmica debido a la gran cantidad de ensayos y similitud de los equipos, pero para un servicio de mantenimiento es suficiente con el cálculo de la media de los tiempos empleados.

La manera de calcularlo es la siguiente:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de inactividad del equipo}}{\text{Numero de fallas.}} \quad (4)$$

3.1.5. Cumplimiento del plan de mantenimiento

Como lo indica su nombre, su principal función es medir el cumplimiento de actividades del plan de mantenimiento.

La manera de calcular este indicador es la siguiente:

$$\text{Cumplimiento del plan (\%)} = \frac{\text{Horas planeadas estimadas completas}}{\text{Horas planeadas estimadas totales}} \times 100 \quad (5)$$

Para su correcta interpretación se debe tener presente que solo las tareas planeadas por adelantado deben ser incluidas en el cálculo, es decir, todas las actividades que no están en el plan y son consideradas como emergencias no deben ser consideradas en la fórmula.

Este indicador debe ser analizado diariamente y revisado semanalmente por la gerencia. Un nivel muy bajo de cumplimiento del plan junto con una alta utilización de mano de obra indica que el plan es irreal o no se está cumpliendo debido a emergencias, por lo que se debe proponer un replanteamiento del plan. En cambio, una alta tasa de cumplimiento del plan junto a alta utilización de mano de obra representa un plan apegado a la realidad que da como resultado la reducción de trabajos atrasados.

3.2. Criticidad.

Dentro del análisis de equipos para su eventual mantenimiento es posible aplicar el factor de criticidad, concepto importante el cual se entiende como nivel de importancia que posee un equipo para sostener labores productivas dentro de una compañía, de manera segura y eficiente. Para la resolución de este análisis es posible implementar dos métodos de evaluación, cuantitativo y cualitativo [8].

La criticidad de los equipos corresponde a un indicador clave en la optimización de tareas, permite la identificación de equipos críticos en términos de disponibilidad o funcionamiento.

3.2.1. Método cuantitativo: Diagrama de Pareto

Corresponde a un método cuantitativo de análisis de criticidad. El diagrama de Pareto es un método de análisis gráfico que nos permite discriminar entre las causas más importantes de un problema, así posteriormente poder organizar estas causas de forma práctica.

El Diagrama de Pareto permite identificar defectos, fallas o causas que se analizan por orden de importancia, permitiendo clasificarlos en problemas-causas vitales y triviales. Para ello, es necesario conocer la problemática a resolver, recolectar la información y clasificarla [9].

El principio de este método es la regla del 80/20, es decir el 80% de las consecuencias proviene del 20% de las causas. Se analiza por medio de un diagrama el cual consta de dos ejes verticales, donde se establece una escala porcentual de 0 a 100 y donde se escribe el número total acumulado iniciando desde cero. En el eje horizontal encuentra el número de clasificaciones que se requieren presentar. Dentro de esta gráfica se demarcan los porcentajes acumulados de cada una de estas causas obteniendo como resultado la curva acumulada o también llamada curva de Lorenz.

3.2.2. Método cualitativo

Es un método que propone un análisis en base a criterio de algún experto o basado en información establecida tal como costos, tiempos de falla, funcionalidad del equipo, entre otras características [8].

En este caso la criticidad puede ser expresada como:

$$\text{Criticidad} = \text{frecuencia} \times \text{consecuencia} \quad (6)$$

Donde la frecuencia está asociada al número de eventos de falla que presente el equipo en este caso y la consecuencia esta referida al impacto y flexibilidad operacional, costos de reparación e impactos en seguridad y ambiente. Siendo algunos de estos criterios fundamentales para la elaboración de un análisis de criticidad tales como:

- Frecuencia de falla.
- Costos de mantenimiento y operación.
- Tiempo promedio de reparación.
- Producción.
- Impacto ambiental.
- Impacto en seguridad.

Para poder determinar la criticidad de un equipo, se toman criterios ingenieriles, factores de ponderación y cuantificación, aplicando así un método definido basado en el cumplimiento de una guía, para ello se utiliza una matriz cuyos ejes representan la frecuencia y las consecuencias de las fallas que se puedan presentar en este.

Matriz de Criticidad						
Categoría de Frecuencia	5	M	M	A	A	A
	4	M	M	A	A	A
	3	B	M	M	A	A
	2	B	B	M	M	A
	1	B	B	B	M	A
		1	2	3	4	5
		Categoría de Consecuencias				

Niveles de Criticidad:	
B	Criticidad baja
M	Criticidad media
A	Criticidad alta

Figura 10. Matriz de criticidad.

La matriz tiene un código de colores que permite identificar la menor o mayor intensidad de riesgo relacionado con el Valor de Criticidad de la instalación, sistema o equipo bajo análisis.

La criticidad se determina de manera cuantitativa, por medio de la multiplicación de probabilidad o frecuencia de ocurrencia de una falla con la suma de las consecuencias de esta, estableciendo rasgos de valores para homologar los criterios evaluativos.

Según la matriz de criticidad, podemos dar valor a los niveles de probabilidad de fallas y consecuencias siendo:

Tabla 3. Valor niveles probabilidad y falla.

Nivel	Categoría de frecuencia	Categoría de consecuencias
1	Improbable	Leve
2	Remoto	Menor
3	Ocasional	Moderado
4	Probable	Mayor
5	Muy Probable	Severa

La definición y aprobación de criterios se realiza bajo el algoritmo presentado en Figura 11.

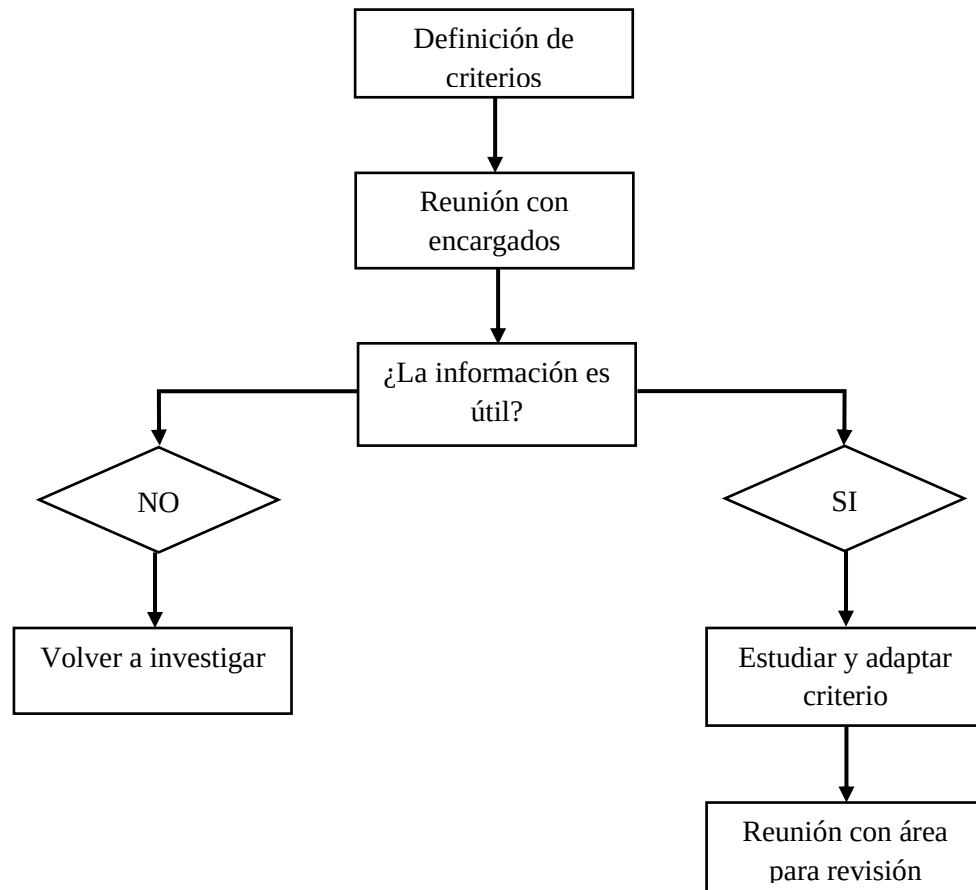


Figura 11. Algoritmo aplicado para definición de criticidad.

3.3. Indicadores de reproceso.

Reproceso es una acción tomada sobre un producto o servicio no conforme para hacerlo conforme con los requisitos [10]. Este puede ser inevitable en plantas de producción de bienes y servicios, busca corregir un defecto parcial o total en un equipo o producto para poder devolverle su estatus de conformidad.

Tanto su pertinencia, costo, impacto y otros factores dependen del tipo de industria y proceso de manufactura desde el cual se origina. De allí que algunas empresas invierten más o menos recursos en soluciones que eviten o disminuyan su aparición.

En el caso del sector minero, el reproceso podría llegar a ser muy costoso, sobre todo en procesos de gran valor agregado, como por ejemplo, el bombeo de concentrado; dependiendo del volumen de producción, frecuencia de ocurrencia, costos asociados, e impacto sobre el cliente, entre otros.

Pero, el tema del reproceso no pasa solamente por asunto teórico, sino por una necesidad real de mantener una gestión sostenida entre calidad y la productividad. De hecho, la idea es que, con los resultados de su estudio, se contribuya a disminuir el reproceso y por ende los costos asociados.

Para el caso de estudio, el indicador de reproceso será tratado como el “número de veces que se ha intervenido un equipo debido a la una causa puntual durante periodo determinado de tiempo”. Es decir, las veces que se repite una falla en un equipo en un periodo de tiempo predefinido, este periodo de tiempo será designado por el super intendente del área teniendo en cuenta la criticidad del equipo y el tipo de fallas que se puedan presentar.

3.4. Gestión de mantenimiento

La gestión del mantenimiento no es un proceso aislado, sino que es un sistema dependiente de factores propios de la gestión del mantenimiento, como también de factores internos y externos a la organización. De hecho, la situación más deseable es la completa integración de la gestión del mantenimiento dentro del sistema.

Un modelo de gestión del mantenimiento debe ser eficaz, eficiente y oportuno, con el propósito de minimizar los costos indirectos de mantenimiento asociados con las pérdidas de producción. A su vez, debe ser capaz de operar, producir y lograr los objetivos con el mínimo costo, generando a su vez actividades que permitan mejorar los indicadores claves del proceso de mantenimiento, asociados a mantenibilidad y confiabilidad. Además, para generar un modelo de mantenimiento robusto y eficaz se deben considerar factores relacionados con la disponibilidad de recursos y su respectiva gestión.

3.4.1. Mantenimiento preventivo

Tiene como función, permitir el conocimiento sistemático del estado de las máquinas y equipos para programar la tarea que debe realizarse, en los momentos oportunos y de menor impacto. Mantiene la función de los equipos mediante la supervisión de planes a realizarse en puntos específicos. Se trabaja con datos de fabricantes o estadísticas sobre las fallas más comunes de los equipos.

Este tipo de mantenimiento genera un conjunto de planes que deben realizarse en fechas previamente programadas, los cuales detallan materiales, herramientas y repuestos a

emplear en dicho mantenimiento, donde también se detalla el personal técnico y personal a cargo de la reparación. El mantenimiento preventivo evita paradas no programadas, que pueden ocurrir debido a falta de mantenimiento de un equipo en un largo periodo de tiempo.

Como medidas preventivas se pueden aplicar:

- Tareas de mantenimiento con el fin de evitar falla, realizando inspecciones visuales, lubricación de piezas, limpieza y ajustes sistemáticos.
- Mejoras y/o modificaciones de instalación, tales como cambios de materiales, cambios en el diseño de piezas, instalación de sistemas de detección de fallas, cambios en el diseño de instalación, entre otros.
- Cambios en procedimientos operacionales, tales como cambios en los que se realiza una operación o trabajo, invirtiendo así en capacitaciones apoyadas por supervisores.
- Cambios en procedimientos de mantenimiento, por medio de creación de procedimientos escritos, que incluyan datos de tolerancia, ajustes, ente otros. [11]

3.4.2. Mantenimiento correctivo

Corresponde a un mantenimiento de corrección de problemas detectados durante el mantenimiento preventivo en los equipos, a medida que los usuarios van comunicando las fallas con el fin de que el personal de mantenimiento actúe sobre estas. El mantenimiento correctivo está orientado en su totalidad a evitar los desperfectos imprevistos que requieran de una rápida atención.

Existen diferentes tipos de mantenimientos correctivos tales como:

- Correctivo planificado, el cual se realiza cuando se sabe de antemano que el equipo debe ser reparado, para que así se pueda comenzar desde el principio de forma controlada.
- Correctivo no planificado, realizado cuando los equipos o maquinas no funcionan o en caso de alguna emergencia. Este tipo de actividad siempre es de carácter urgente y difícil de controlar, pudiendo resultar en un gran costo. [12]

3.4.3. Mantenimiento predictivo

Es realizado tras el seguimiento de variables importantes de los equipos. Son medidas en intervalos de tiempo definidos, con el fin de pronosticar posibles fallas de los sistemas y realizar mantenimiento antes de que ocurra la parada no programada.

Variables como temperatura, presión, cantidad de partículas existentes en el aceite usado, ruido, vibración, viscosidad de aceite, ensayos no destructivos, ultrasonido, son importantes de monitorear, con el fin de crear indicadores que ayuden a la lectura de un mantenimiento.

Este tipo de mantenimiento ayuda al ahorro energético, mejora de productividad, reducción de trabajos de mantenimiento reiterativos y promueve trabajos rápidos y fáciles de mantención, a su vez prolonga la vida útil del equipo, reduciendo el periodo de recambio de equipos.

3.5. Herramientas de inteligencia.

La inteligencia de negocios (BI) es un conjunto de métodos y técnicas por medio de las cuales es posible transformar datos y convertirlos en información entendible para empresas, la cual posteriormente se convierte en conocimiento valioso que permite establecer una toma de decisiones para la mejora futura de una empresa, proyecto y/o proceso [10].

La información a partir de la que se obtienen los datos puede ser interna (proceso productivo, índices anuales) como también externa (estudios, datos económicos). El objetivo final es convertir esta información en algo que pueda ser analizado y comparado, que permita a empresas e instituciones dar soporte a la toma de decisiones, generando una ventaja competitiva [11].

Dentro de las herramientas que facilitan el manejo de datos e información se encuentran:

- **Power BI:** servicio de análisis de empresarial perteneciente a la empresa Microsoft, la cual permite visualizar datos y compartir información, desde plataformas creadas por un usuario final. Esta plataforma puede ser gestionada en una Nube o desde una interfaz de escritorio. Es en esta interfaz donde el usuario puede crear informes interactivos con análisis de objetos y paneles de control por sí mismo [12].

- **Qlik:** plataforma analítica y de integración de datos, capaz de trazar todas las relaciones posibles entre sus datos, encontrando y destacando automáticamente los conocimientos para que los usuarios puedan explorar, permitiendo con ello la exportación de data a Microsoft Office. Se pueden importar datos desde fuentes como Salesforce, Teradata y Hive [13].

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE SISTEMA DE REPORTABILIDAD DE KPI.

Esta investigación está orientada a identificar los KPI de mantenimiento más importantes para la medición de desempeño de mantenimiento y ubicarlos dentro de un proceso de gestión mejorado en cuanto a su reportabilidad. El desarrollo del documento se estructura en base a análisis previo de criticidad y posterior análisis e identificación de KPI's que permitan por un lado identificar los equipos cuyos tiempos de no funcionamiento generan o podrían generar discontinuidad en la cadena de producción de la compañía, además de costos asociados elevados; por otro lado, mantener el control de las actividades que deben ser realizadas y aquellas que presentan retrasos con sus respectivas horas hombre asociadas.

Para poder identificar los KPI a usar se realizaron varias reuniones, en las cuales se proponía como objetivo contar con la disponibilidad de equipos en línea, cuya información esté al alcance y de forma inmediata. Tomando esto en cuenta, se definieron variables que pudiesen ser controladas y que afectaban la disponibilidad de equipos necesarios.

Los KPI presentados son todos del tipo cuantitativos, donde las variables utilizadas son del tipo numérico. Al contar con datos históricos, se logra trabajar con el máximo provecho de data, presentando junto a ésta, la variable temporal agrupada por mes.

Para una mejor comprensión y análisis de todas las variables se opta por representaciones graficas de todos los KPI, y estas a su vez buscan una mejor visualización de los datos a través de divisiones, colores y enlaces directos con las tablas de información.

Para iniciar el reporte de los datos se necesita realizar un filtrado de información, ya que la totalidad de ella colapsaría los sistemas. Por esto, el primer filtro que se realiza es el de los equipos a trabajar, como se mencionó con anterioridad, no todos los equipos son de vital importancia para la continuidad de la cadena productiva, debido a esto es que solo se trabaja con equipos con criticidad media o alta, y para conseguir esto, se necesita antes que todo, un análisis y estudio de criticidad.

4.1. Análisis de criticidad

Actualmente en la Gerencia de Tranque de agua y Mineroducto tiene una base de datos actualizada con el análisis de criticidad de los equipos. Este análisis se encuentra disponible en línea, con los equipos ya clasificados en base a detenciones no programadas, disponibilidad de equipo, operatividad del equipo, entre otros factores.

A partir de esta se obtiene la totalidad de equipos existentes en el área (más de 3500), los cuales se encuentran clasificados de la siguiente manera:

1) Alta 2) Media 3) Baja 4) Nula

Para el caso de estudio sólo se trabajará en base a equipos con criticidad Alta y Media. El listado de equipos se encuentra en ANEXO I, quedando a disposición de análisis 2034 equipos pertenecientes en su mayoría al sector de Tranques de agua.

4.2. Obtención de datos

Como se mencionó anteriormente, solo se trabajará en este proyecto con los equipos que posean una criticidad media y alta.

Para poder realizar un análisis completo de estos y poder generar la cantidad de KPI's solicitados por el área, se necesita la mayor cantidad información posible relacionada con las detenciones de estos equipos, ya sean detenciones programadas o mantenimientos correctivos. Para esto, se recurre a los registros históricos de cada máquina, los cuales contienen información sobre las detenciones de cada uno, el tipo de detención (mantenimiento preventivo, predictivo, overhaul o correctivo), las fechas y, horas de cada parada y puesta en marcha, que nos ayudara al momento de calcular tiempos de detención o reparación, terminando con el motivo de la detención, donde se señala el componente que la provocó y el tipo de falla que este presentó.

Los datos para analizar se obtienen en su mayoría de la base de datos de un programa de monitoreo interno de la compañía llamado PI System, el cual mantiene un control del funcionamiento de los equipos de mayor importancia en el proceso productivo.

Su principal función es detectar cuando un equipo deja de funcionar, generar una alarma a los trabajadores de la sala de control y llevar un registro de fecha y hora de la detención como también

la de reactivación del funcionamiento del equipo. Además, el programa muestra datos de flujos, alturas de llenados de estanques, presiones y temperaturas de los diferentes procesos presentes en el área.

En cuanto al motivo de las detenciones, estos deben ser ingresados manualmente por los técnicos que van a revisar el equipo, es aquí donde se genera un retraso importante en la obtención de datos, ya que la mayoría de las veces los técnicos no suben a la plataforma de PI System el motivo detectado, teniendo solo un registro en un libro de notas. Debido a esto, al momento de la obtención de datos, se tuvo que establecer una relación entre la información entregada por el programa y la entregada por los libros de notas con el fin de completar los datos faltantes.

Para poder realizar la consulta de datos desde el programa de monitoreo PI System hasta el equipo de trabajo personal (PC), fue necesario expandir los conocimientos personales sobre interacciones con bases de datos o queries, para la generación de reportes completos y en línea, como también capacitar al personal de la gerencia respecto al uso y actualización de datos.

En la Figura 12 encontramos la representación de la impulsión de concentrado de cobre hacia el puerto de embarque en el programa PI System.

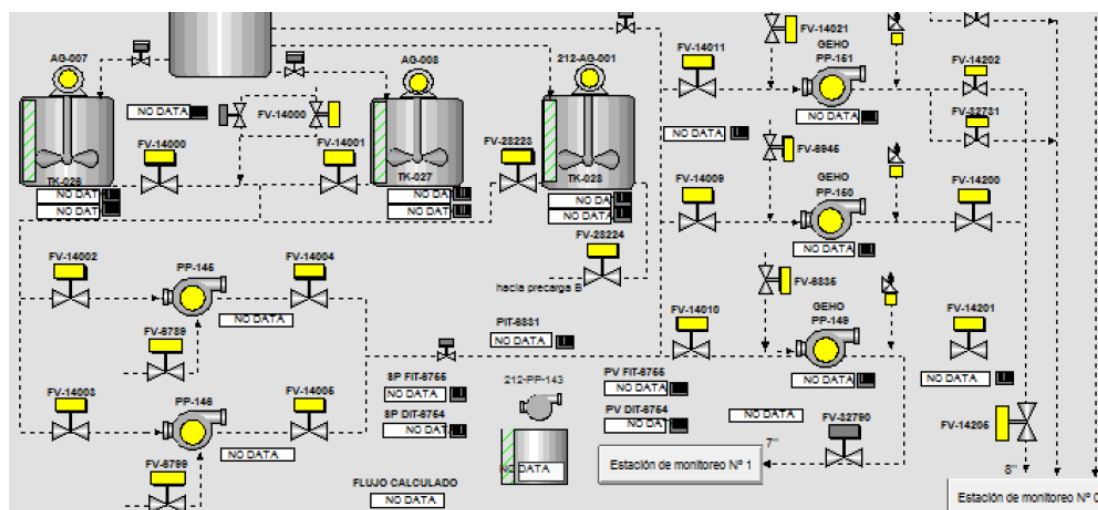


Figura 12. Sistema de impulsión de concentrado mostrado en PI system.

4.3. Reporte cumplimiento de actividades

Este reporte muestra la información disponible de las actividades que se ejecutan semanalmente por el área, ya sea en tranque, aguas o mineroducto. Con más detalle, el informe contiene todas las actividades a realizar, la procedencia de ellas (ya sea work request o work order), el lugar en que se deben ejecutar, acciones se deben llevar a cabo, empresa contratista a cargo de su ejecución, día de inicio de tareas y las horas hombre que se ocuparan en dicha ejecución.

La información disponible se ocupa para llevar un control del cumplimiento de actividades programadas, separado por empresas y fechas. Además, el reporte generaba un aporte a los planificadores del área ya que se les muestra la cantidad total de horas hombre disponible por empresa y el máximo de actividades que se podían programar por día para no sobrepasar ese límite.

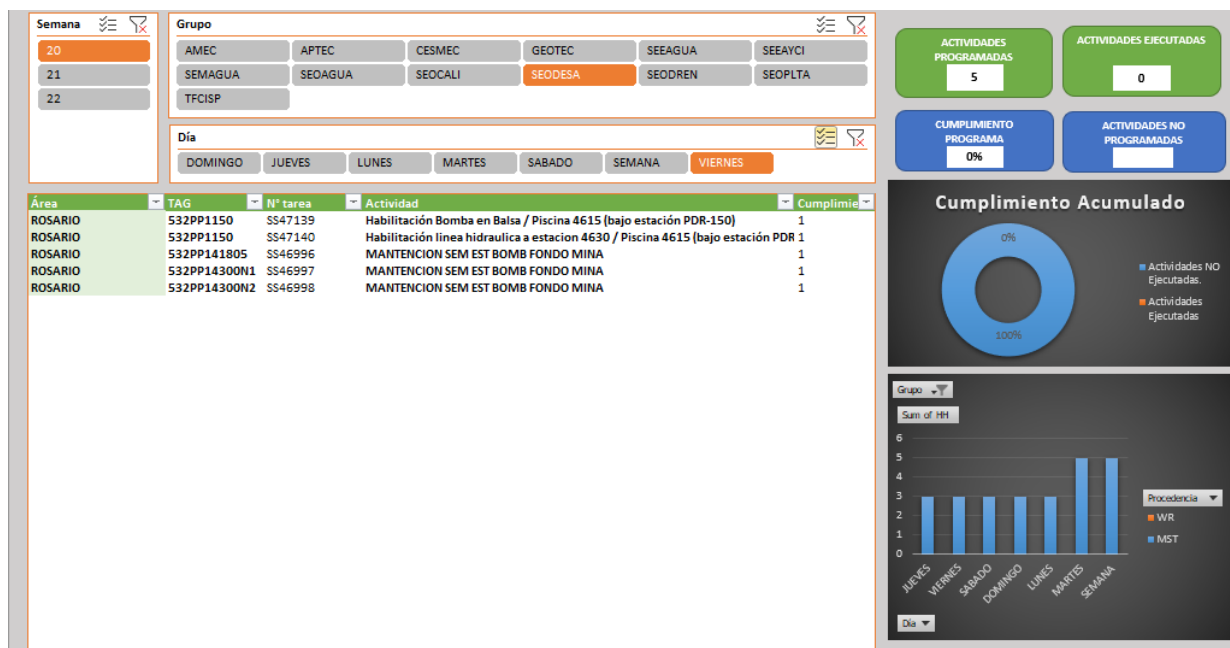


Figura 13. Reporte de cumplimiento de actividades.

4.4. Ejecución de actividades

El cumplimiento de actividades del reporte se expresa en un gráfico de torta en porcentajes.

La gráfica refleja el cumplimiento basado en las horas hombres que se estima que dure cada actividad, es decir, si una actividad tiene una duración de 10 horas hombres y solo se han completado 5, el reporte muestra el cumplimiento del 50% de la actividad. Además, tiene la opción

de mostrar el cumplimiento por día de la semana seleccionado o mostrar el cumplimiento acumulado hasta el día en el que se realiza la consulta, lo cual facilita el control de actividades programadas y permite saber el retraso y/o adelanto que lleva el plan semanal.

Para una mayor precisión del reporte, este se conecta directamente a la base de datos interna de la compañía a través de una query, de tal manera que el porcentaje de cumplimiento siempre se encuentra actualizado al día de la revisión de datos.

La conexión se realiza con la planilla de ordenes de trabajo de la empresa (WO) por lo que al momento de ser cerrada una de ellas se reporta de inmediato como tarea completada en el porcentaje.

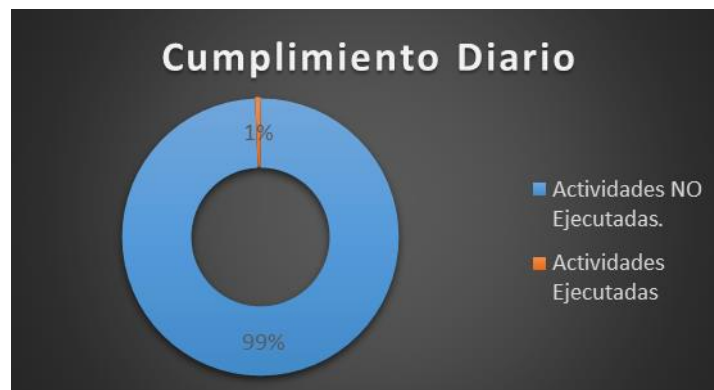


Figura 14. Gráfica del cumplimiento de actividades diarias.



Figura 15. Gráfica del cumplimiento de actividades acumulado de la semana.

4.5. Control de horas hombre

En el mismo reporte es posible llevar un control de las horas hombres estimadas por empresa, clasificadas por día de semana. Para que esto tenga un seguimiento en línea y real es necesario actualizar semana a semana la cantidad de personal disponible por cada empresa contratista, junto al cálculo de horas hombres correspondientes. Esta herramienta es una de las más útiles para el equipo de planificación del área, ya que facilita la distribución de tareas diarias sin sobrepasar el rango máximo de horas disponibles.

Es importante destacar que, cada día se proyecta un 10% de la totalidad de horas hombres como “horas hombre libres” en caso de que ocurran actividades no programadas en el plan.

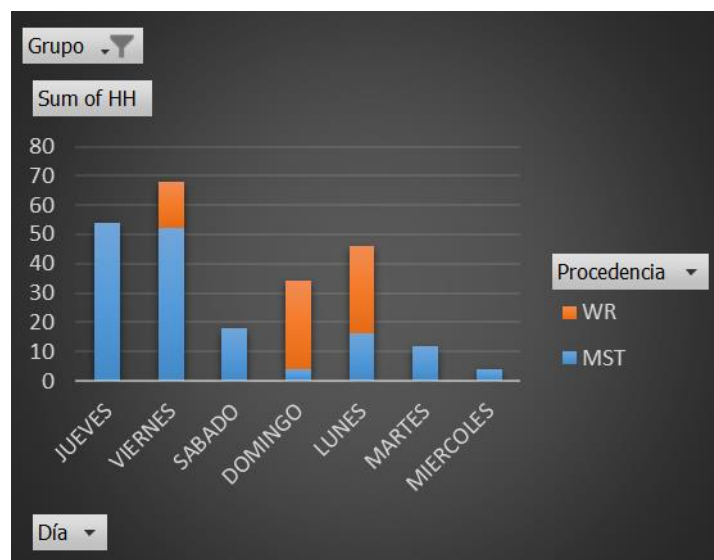


Figura 16. Gráfica de procedencia y utilización de horas hombre

En la Figura 16 observamos que la denominación en el eje Y corresponde a la totalidad de horas disponibles por grupo de trabajo, donde las barras azules muestran la cantidad de horas hombre utilizadas en actividades provenientes de mantenencias programadas de equipos MST (maintenance scheduling task), mientras que las barras naranjas indican la cantidad de horas hombres ocupadas en actividades provenientes de WR (work request), en palabras simples son aquellas actividades no planificadas con anticipación, las cuales pueden ser mantenencias correctivas, predictivos o actividades irregulares.

4.6. Reporte de KPI'S de mantenimiento de equipos

Este reporte muestra los KPI's solicitados por el área de la compañía, vale decir, disponibilidad, MTTR, MTBF, tiempo de detención por mes y un indicador particular de reproceso, adicionalmente se proporciona un diagrama de Pareto de las causales de las detenciones de los equipos.

Como se mencionó en los puntos anteriores, el rango de trabajo en equipos abarca a aquellos cuya criticidad sea media y alta, dándonos un total de 2034 equipos.

Para realizar las gráficas se levantaron los datos de todas las detenciones de los equipos escogidos a través de una consulta (query) al sistema de reportes interno de la compañía (PI System) del año 2019, esto debido a que llevar al sistema datos más antiguos podría causar colapso debido a la cantidad de data. Cabe destacar que si se necesita revisar el reporte de años anteriores se puede cambiar la fecha en la consulta de datos, pero el lapsus de tiempo no puede superar el año, es decir, si se quiere ver el reporte de 2017 se configura para ver las detenciones desde el primero de enero 2017 hasta el 1 de enero 2018.

De los equipos escogidos se eliminaron los errores o duplicados que se hayan generado por errores en el ingreso manual de información a la data de la compañía y se construyeron las gráficas de la manera más simple y entendible posible. El KPI de reproceso al ser un poco más complejo en su análisis se realizó en una pestaña aparte de los demás.

Como se observa en Figura 17, el dashboard generado dispone en la parte superior de dos casillas de selección múltiple, en una de ellas se puede indicar el área de trabajo de los equipos (agua dewatering, agua suministro, bombas GEHO, mineroducto), mientras que en la siguiente se selecciona el equipo que se necesita analizar. En el instante en el que el equipo es seleccionado todos los gráficos cambian y adaptan sus parámetros para representar los KPI's solicitados. Cabe recordar que la base de datos del dashboard se actualiza cada vez que se vuelve a abrir el archivo, por lo que los KPI's estarán siempre actualizados.

En la parte inferior izquierda del dashboard se observan 4 graficas que representan el tiempo de detención, MTBF, MTTR (todos ellos en minutos) y disponibilidad del equipo seleccionado, mientras que en la parte derecha de la planilla se observa un diagrama de Pareto con las principales causales de las detenciones que pueda tener el equipo.

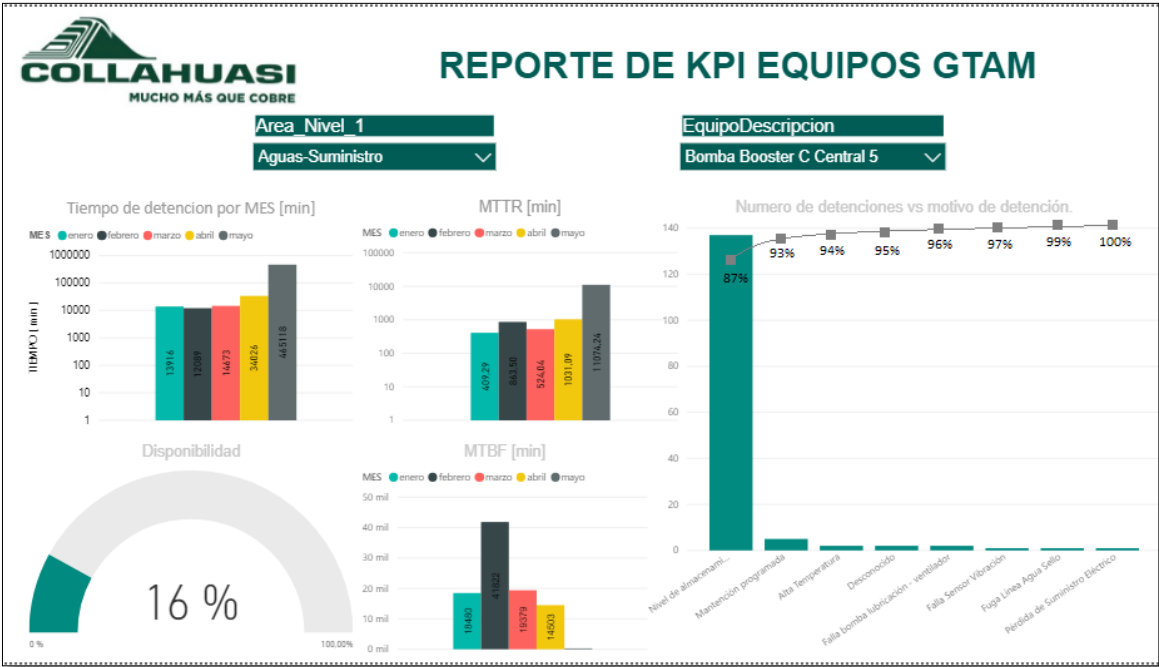


Figura 17. Dashboard de KPI's de equipos.

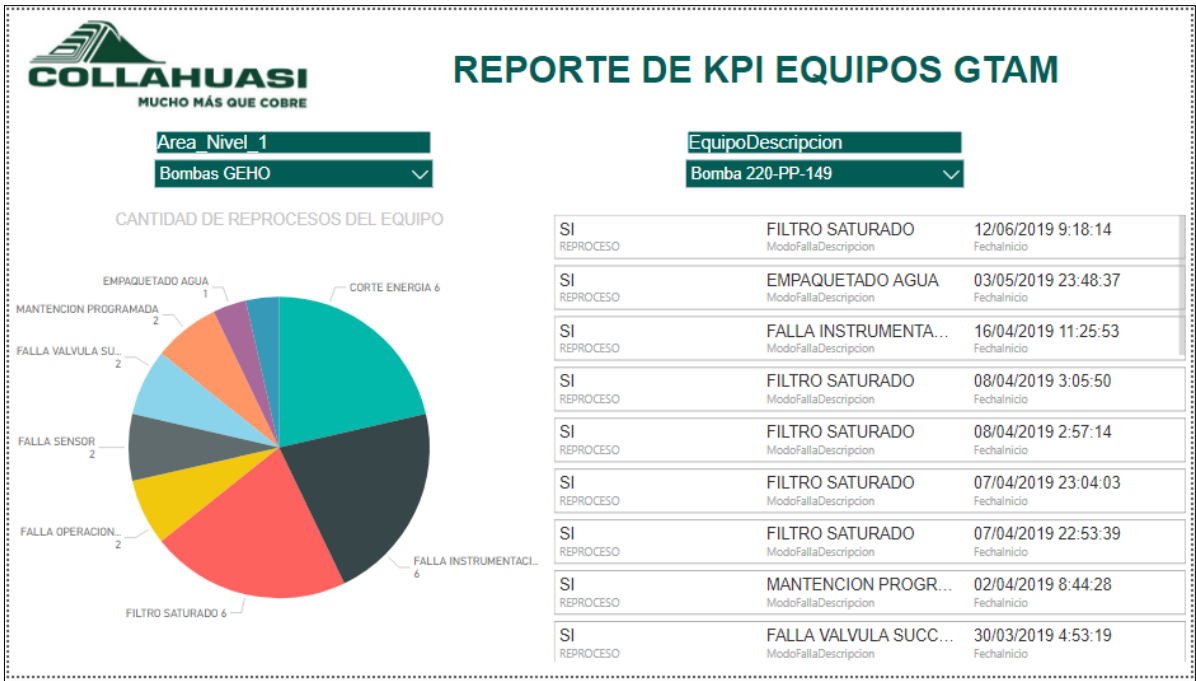


Figura 18. Dashboard de KPI de reproceso de equipo.

En la otra página del dashboard se analiza el KPI de reproceso cuya función es mostrar si un equipo ha sido detenido más de una vez por la misma razón en un periodo determinado, lo que contribuye al área a la hora de analizar los tipos de mantenciones que se realizan al equipo y su correcta ejecución.

4.6.1. Tiempo de detención mensual

En el cálculo de los KPI's, este indicador es el más sencillo de obtener debido a que los datos son en su mayoría entregados por los informes de detenciones históricas de los equipos.

En este caso el tiempo de detención se calculó de la siguiente manera.

$$\text{tiempo de detención [min]} = \text{tiempo total transcurrido [min]} - \text{tiempo funcional del equipo [min]} \quad (7)$$

Cabe mencionar que en los tiempos de detención no están considerados los tiempos en Standby del equipo debido que no son de utilidad para los requisitos del área, donde se solicitaba saber los tiempos en los que el equipo se encuentra efectivamente no operante. El cálculo de este indicador se programó de tal manera que el resultado fuese mostrado por meses para poder generar un registro histórico de los equipos.

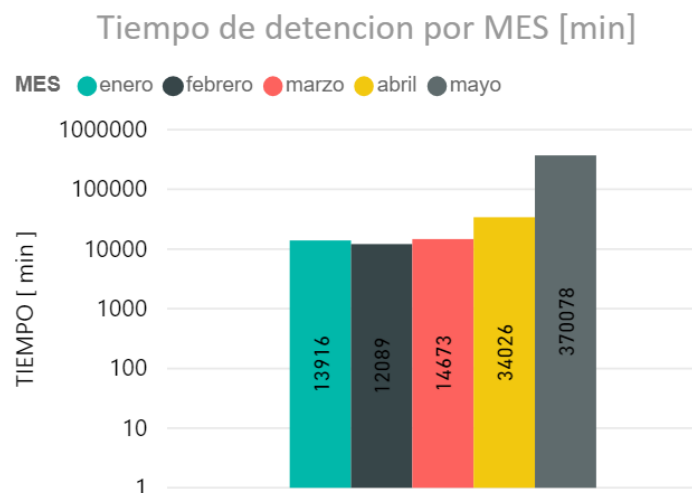


Figura 19. Gráfica mensual de tiempos de detención del equipo.

Para este y los siguientes tres indicadores trabajados, se selecciona un equipo, en este caso la bomba **220PP150** y sus datos de falla entre las fechas **01/06/2019** y **07/06/2019** correspondientes a una semana en la cual este equipo en particular tuvo muchos problemas operacionales, por lo que es útil para nuestro análisis. Recordar que los indicadores en el dashboard fueron calculados de manera mensual, lo que se explicará a continuación es solo para ejemplificar el procedimiento.

A continuación, se muestra una tabla con las fallas del equipo en esa semana y se procederá a explicar cómo se calcula el indicador.

Tabla 4. Detalle de fallas del equipo 220PP150 entre los días 1 y 7 de junio del 2019.

FechaInicio	FechaFin	EquipoDescripcion	ModoFallaDescripcion	Tiempo de falla
7/6/2019 16:52	8/6/2019 14:17	Bomba 220-PP-150	DISPONIBLE	21:25:19
7/6/2019 15:43	7/6/2019 16:06	Bomba 220-PP-150	DISPONIBLE	00:23:18
4/6/2019 20:37	4/6/2019 20:45	Bomba 220-PP-150	DISPONIBLE	00:07:11
4/6/2019 07:00	4/6/2019 08:29	Bomba 220-PP-150	ROTURA VALVULA CAMARA	01:29:54
4/6/2019 04:11	4/6/2019 07:00	Bomba 220-PP-150	FALLA VALVULA SUCCION	02:48:54
2/6/2019 08:55	2/6/2019 17:36	Bomba 220-PP-150	EMPAQUETADO CONCENTRADO	08:41:06
1/6/2019 19:00	1/6/2019 19:26	Bomba 220-PP-150	DISPONIBLE	00:25:47

Como se observa en Tabla 4, se agrega una columna en la que se calcula el tiempo transcurrido en la detención del equipo dependiendo del tipo de falla. Según lo que se mencionó con anterioridad, para el cálculo del indicador no se contemplan los tiempos en el que el equipo está en standby, es decir, cuando el modo de falla indica “disponible”.

Para el cálculo del tiempo de detención (de esta semana en específico) solo se suman los tiempos de falla reales que en este caso serían:

Tabla 5. Cálculo de tiempo de detención semanal.

FechaInicio	FechaFin	EquipoDescripcion	ModoFallaDescripcion	Tiempo de falla
4/6/2019 07:00	4/6/2019 08:29	Bomba 220-PP-150	ROTURA VALVULA CAMARA	01:29:54
4/6/2019 04:11	4/6/2019 07:00	Bomba 220-PP-150	FALLA VALVULA SUCCION	02:48:54
2/6/2019 08:55	2/6/2019 17:36	Bomba 220-PP-150	EMPAQUETADO CONCENTRADO	08:41:06
			Suma total	12:59:54

Con lo que el tiempo total de detención en esta semana nos da un valor de 13 horas aproximadamente o 780 minutos que es la variable con la que trabajaremos.

4.6.2. Mean time to repair (MTTR)

Este indicador, al igual que el anterior se representó en un gráfico de barras dividido en meses, buscando ser visiblemente sencillo y además generar un registro histórico mensual.

Para su cálculo fue necesario recopilar todas las detenciones de los equipos, luego de esto se descartó la suma de los tiempos generados a partir de equipos en standby y las detenciones para realizar mantenimiento programado.

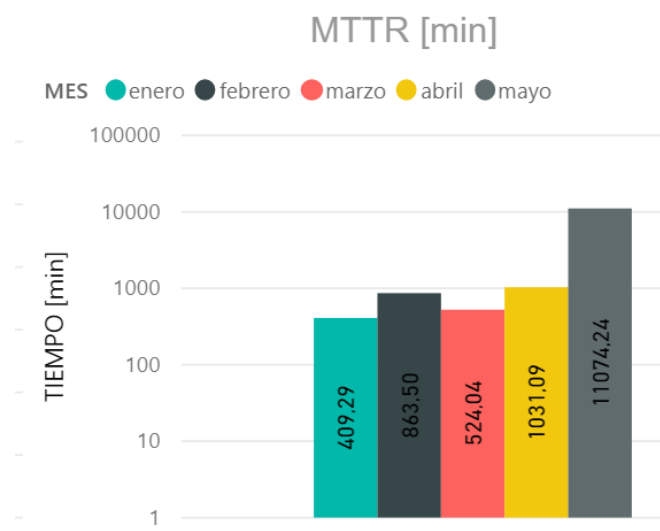


Figura 20. Tiempo total de inactividad del equipo respecto al número de fallas

A modo de ejemplo se sigue trabajando con el equipo **220PP150** y la tabla con los modos y tiempos de falla (ver tabla 4), además, para el cálculo de este indicador se utiliza la formula (4) descrita con anterioridad.

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de inactividad del equipo}}{\text{Numero de fallas.}} \quad (4)$$

Ya sabemos que el tiempo de inactividad del equipo se obtiene sin considerar los tiempos en standby, y que además ya lo obtuvimos en el indicador anterior, el cual eran 780 minutos

aproximadamente. Ahora solo nos queda obtener el número de fallas el cual se observa a simple vista en la tabla 5, obteniendo de esta manera lo siguiente.

$$MTTR = \frac{780 \text{ [min]}}{3 \text{ [fallas]}} = 260 \left[\frac{\text{min}}{\text{falla}} \right]$$

Lo anterior indica que por cada falla en el equipo existe un tiempo medio de reparación de 260 minutos en este. Lo importante es intentar mantener el MTTR lo mas bajo posible para aumentar el tiempo de disponibilidad del equipo, para esto es indispensable el mantenimiento correctivo.

4.6.3. Mean Time Between failures (MTBF)

Como se estudió en el marco teórico el tiempo medio entre fallas es el promedio de tiempo entre dos fallas en un equipo, esto implica que entre mayor sea este indicador mayor es la fiabilidad y disponibilidad del equipo.

Para el cálculo se tomó la sumatoria del tiempo de buen funcionamiento, para esto es más conveniente tomar todo el tiempo disponible del equipo y restarle el tiempo de inactividad, es decir, los tiempos de detención por fallas o por actividades de mantenimiento, los tiempos en standby del equipo se considera como tiempo de buen funcionamiento ya que se asume que el equipo este operativo. Esto se divide por el registro total de las fallas del equipo y obtenemos el tiempo medio entre fallas. Cabe destacar que este cálculo se realizó de manera separada para los meses del año y se plasmó en el dashboard de diferentes colores para una sencilla comprensión.

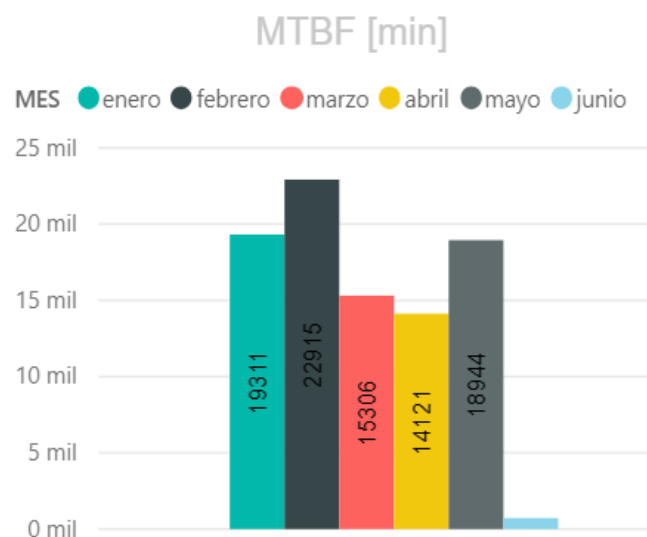


Figura 21. Tiempo medio entre fallas del equipo separado por meses.

Continuando con el ejemplo del equipo **220PP150**, tenemos los datos de la tabla 4 y además la fórmula para el cálculo del tiempo medio entre fallas, la cual se muestra nuevamente a continuación.

$$MTBF = \frac{\sum \text{Tiempos de buen funcionamiento}}{\text{numero de fallas.}} \quad (3)$$

Como se mencionó anteriormente el tiempo de buen funcionamiento se puede obtener restándole al tiempo total el tiempo de inactividad. Para el ejemplo el tiempo de inactividad lo obtuvimos cuando calculamos el tiempo de detención el cual eran 780 minutos. El tiempo total disponible en este caso en particular son los 7 días con los que estamos trabajando.

$$7 [\text{dias}] = 168[\text{horas}] = 10.080[\text{minutos}]$$

Por lo que obtenemos:

$$\text{Tiempo de buen funcionamiento} = 10.080 [\text{min}] - 780[\text{min}]$$

$$\text{Tiempo de buen funcionamiento} = 9300[\text{min}]$$

Al reemplazar este valor en la ecuación 3 junto con el número de fallas mencionado en el indicador anterior obtenemos:

$$MTBF = \frac{9300[\text{min}]}{3[\text{fallas}]} = 3100 \left[\frac{\text{min}}{\text{falla}} \right]$$

Esto nos indica que entre cada falla que presenta el equipo tenemos un tiempo promedio de 3100 minutos. Este valor nos sirve como referente a la disponibilidad ya que es directamente proporcional, y además nos indica que tan fiable es el equipo, por lo que se debe intentar mantenerlo lo más alto posible.

4.6.4. Disponibilidad

La disponibilidad constituye uno de los principales patrones de comportamiento medibles en los equipos. Para el cálculo solicitado se consideró el tiempo total en el cual el equipo debe estar operativo y se le resta el tiempo detenido, en este último se incluyen las mantenciones programadas y no programadas del equipo (recordar que la empresa solicito el indicador “disponibilidad total”), para luego dividirla por el tiempo total mencionado con anterioridad.

Es importante recordar que las unidades de tiempo deben ser las mismas para no provocar datos falsos en los resultados. Además, el cálculo de la disponibilidad total es el acumulado desde el inicio de la consulta de datos hasta la fecha actual o hasta un lapso de un año desde la fecha de inicio de la consulta (recordar que se utiliza como límite un año de consulta debido a la gran cantidad de datos que puede colapsar el sistema).

Para la representación gráfica de este indicador se optó por un gráfico de medio anillo con porcentaje, ya que por un lado es más sencillo de comprender y por otro lado ocupa menos espacio que otros tipos de gráficos.

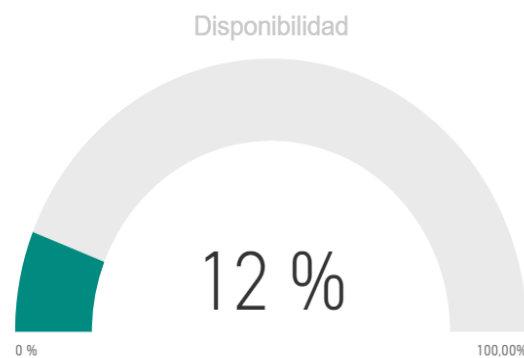


Figura 22. Disponibilidad total del equipo.

Para finalizar con el ejemplo del equipo 220PP150, tenemos los datos de la tabla 4 y la fórmula de disponibilidad descrita en el marco teórico.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Horas totales} - \text{Horas detenidas por mantenimiento}}{\text{Horas totales}} \quad (1)$$

Los datos que se necesitan para el cálculo ya son conocidos y solo debemos reemplazar en la fórmula. Se debe recordar que como se pide disponibilidad total se deben considerar los mantenimientos programados y no programados como tiempos indisponibles.

Por lo tanto, al reemplazar los datos obtenemos:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{168[\text{hrs}] - 13[\text{hrs}]}{168[\text{hrs}]} = 0.922 = 92.2\%$$

Esto nos indica que, del total del tiempo disponible para la operación, este equipo estará operativo o listo para operar un 92% de ese tiempo. Este indicador es de suma importancia y se debe intentar

mantener lo mas elevado posible. Tiene directa relación con el tiempo medio entre falla (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), lo que se puede ver en la siguiente fórmula.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (8)$$

Lo cual se puede demostrar reemplazando los valores obtenidos con anterioridad.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{3100[\text{min}]}{3100[\text{min}] + 260[\text{min}]} = 0.922 = 92.2\%$$

4.6.5. Diagrama de Pareto.

Para la realización de este diagrama y el KPI de reproceso que se detallará mas adelante se tuvo que realizar otro tipo de consulta diferente a la de los KPI mencionados con anterioridad. Debido a que estos KPI trabajan directamente con la falla y la causa de esta, es que se deben traer de la base de datos interna de la compañía otra tabla en donde se detalla el origen de las detenciones de los diferentes equipos analizados, la fecha de inicio y termino de la detención y el equipo involucrado, quedando una tabla como la que se muestra a continuación.

Tabla 6. Base de datos para diagrama de Pareto y KPI de reproceso.

FechaInicio	FechaFin	EquipoNombre	EquipoDescripción	Area_Nivel_1	Area_Nivel_2	ModoFallaDescripción
martes, 1 de enero de 2019	5/1/2019 14:43:49	536PP3593	Bomba Booster C Norte	Aguas-Suministro	Booster Coposa Norte	Rotura Ducto Descarga
jueves, 3 de enero de 2019	3/1/2019 13:57:29	531-PP-002	Pozo RPW-03	Aguas-Suministro	Campo Pozos Michinc	Pérdida de Suministro Eléct
jueves, 3 de enero de 2019	3/1/2019 17:58:01	531-PP-002	Pozo RPW-03	Aguas-Suministro	Campo Pozos Michinc	Pérdida de Suministro Eléct
jueves, 3 de enero de 2019	3/1/2019 14:50:08	531-PP-002	Pozo RPW-03	Aguas-Suministro	Campo Pozos Michinc	Pérdida de Suministro Eléct
jueves, 3 de enero de 2019	3/1/2019 13:27:27	531-PP-002	Pozo RPW-03	Aguas-Suministro	Campo Pozos Michinc	Pérdida de Suministro Eléct
jueves, 3 de enero de 2019	3/1/2019 13:31:30	531-PP-002	Pozo RPW-03	Aguas-Suministro	Campo Pozos Michinc	Pérdida de Suministro Eléct
martes, 5 de febrero de 2019	5/2/2019 19:35:12	536-PP-3590	Pozo PPC 21	Aguas-Suministro	Campo Pozos Coposa	AJUSTE DERECHOS
martes, 5 de febrero de 2019	5/2/2019 19:23:16	536-PP-3590	Pozo PPC 21	Aguas-Suministro	Campo Pozos Coposa	AJUSTE DERECHOS

Ya realizada la consulta de datos se puede comenzar a construir el diagrama, en total se realizan un total de 5 pasos detallados a continuación. Cabe mencionar que para efectos prácticos se elige un equipo en específico, y a partir de este se construirá el diagrama explicado paso a paso.

- 1) Separar la base de datos traída por equipos y diferenciar los modos de falla de cada uno, quedando la tabla de esta manera (cabe destacar que solo se muestran pequeños extractos de las tablas para ejemplificar el procedimiento). En este caso particular se trabajará a modo de ejemplo con la bomba Booster 5 de suministro de agua.

Tabla 7. Tabla de un equipo en específico con sus diferentes modos de falla.

FechaInicio	FechaFin	EquipoNombre	EquipoDescripción	Area_Nivel_1	Area_Nivel_2	ModoFallaDescripción
lunes, 21 de enero de 2019	22/1/2019 01:30:25	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Mantenición programada
lunes, 21 de enero de 2019	21/1/2019 10:22:10	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Mantenición programada
miércoles, 8 de mayo de 2019	15/5/2019 13:13:00	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Mantenición programada
lunes, 27 de mayo de 2019		530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Falla bomba lubricación - ve
domingo, 28 de abril de 2019	28/4/2019 02:51:00	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Pérdida de Suministro Eléctri
lunes, 15 de abril de 2019	15/4/2019 07:06:30	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Mantenición programada
lunes, 15 de abril de 2019	23/4/2019 10:43:45	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Falla Sensor Vibración
lunes, 15 de abril de 2019	15/4/2019 15:39:00	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Mantenición programada
miércoles, 22 de mayo de 2019	23/5/2019 14:55:10	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Alta Temperatura
domingo, 5 de mayo de 2019	8/5/2019 12:35:04	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Falla bomba lubricación - ve
martes, 21 de mayo de 2019	22/5/2019 13:13:00	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Alta Temperatura
jueves, 21 de febrero de 2019	24/2/2019 12:15:50	530PP539	Bomba Booster C Centra	Aguas-Suministro	Booster Coposa Centr	Fuga Línea Agua Sello

- 2) Luego de tener los datos ordenados y divididos por equipos, se realiza un conteo para calcular la frecuencia con la que ocurren los distintos eventos, cabe destacar que esta tabla no se puede ver en la pantalla principal del dashboard ya que el objetivo final es el diagrama de Pareto, por lo que solo se muestra este último.

La tabla formada con la frecuencia se puede ver a continuación.

Tabla 8. Frecuencia de las causas de detención del equipo.

Equipo 220PP149	
Causa	Frecuencia
Nivel de almacenamiento	110
Mantenición programada	8
Alta temperatura	2
Desconocido	2
Falla bomba ventilador	2
Falla sensor vibración	1
Fuga línea agua sello	1
Perdida suministro eléctrico	1

- 3) Luego de tener el dato de las frecuencias de las diferentes causas de detención del equipo, se calcula el porcentaje individual de cada uno de ellos con la siguiente fórmula.

$$\text{Porcentaje individual} = \frac{\text{Frecuencia}}{\sum \text{Frecuencias}} \times 100 \quad (6)$$

Obteniendo así una tabla como la siguiente:

Tabla 9. Porcentajes individuales de las causas de detención.

Equipo 220PP149		
Causa	Frecuencia	Porcenta
Nivel de almacenamiento	110	87%
Mantenión programada	8	6%
Alta temperatura	2	2%
Desconocido	2	2%
Falla bomba ventilador	2	2%
Falla sensor vibración	1	1%
Fuga linea agua sello	1	1%
Perdida suministro eléctrico	1	1%

- 4) Se calcula el porcentaje acumulado de cada uno de los ítems de la tabla, esta se obtiene simplemente sumando el porcentaje respectivo con la suma de todos los porcentajes anteriores al dato analizado, se debe recordar que el porcentaje acumulado final no puede ser mayor que 100.

Luego de realizar la suma de los porcentajes se presenta una tabla como la siguiente.

Tabla 10. Porcentaje acumulados de las causas de detención del equipo.

Equipo 220PP149			
Causa	Frecuencia	Porcenta	P. Acumulado
Nivel de almacenamiento	110	87%	87%
Mantenión programada	8	6%	93%
Alta temperatura	2	2%	94%
Desconocido	2	2%	95%
Falla bomba ventilador	2	2%	96%
Falla sensor vibración	1	1%	97%
Fuga linea agua sello	1	1%	99%
Perdida suministro eléctrico	1	1%	100%

- 5) Finalmente, con los porcentajes acumulados y los datos de frecuencia de las diversas causas de detención del equipo elegido como ejemplo se construye el diagrama de Pareto como un gráfico de barras donde aparecen las causas de detención en el eje X y la frecuencia de estas causas en el eje Y.

Además, se agrega un gráfico de puntos encima del gráfico ya mencionado con los porcentajes acumulados de cada una de las causas para poder identificar de manera más

clara donde se presenta el 20% de las causas que provocan el 80% de las fallas. De lo anterior podemos tener un diagrama como el siguiente.

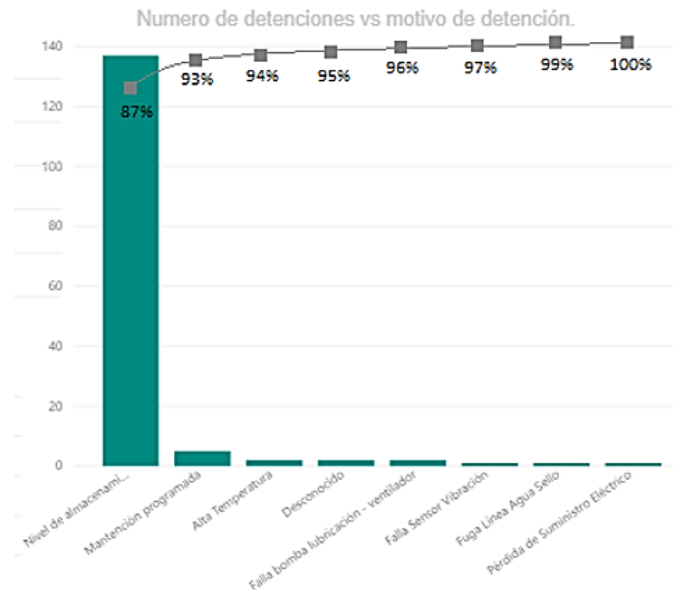


Figura 23. Diagrama de Pareto de Bomba Booster 5.

4.6.6. KPI de reproceso

Como se mencionó en los antecedentes bibliográficos de esta memoria, este KPI puede ser definido de variadas maneras y trabajado según sea más conveniente para el usuario. En este caso en particular se tomará el KPI de reproceso como la intervención de un equipo de manera repetitiva causada por el mismo tipo de falla durante un tiempo definido de tiempo, esto para encontrar las fallas más recurrentes de un equipo en el corto o mediano plazo. Lo anterior puede llevar a investigaciones de falla, reemplazo de piezas o ajustes en la operación dependiendo de la constancia de las fallas y de la causa de esta.

Para desarrollar este KPI se trabaja con la tabla mencionada en el diagrama de Pareto, ya que esta muestra las fallas de los equipos, motivos y fechas en las que se producen (ver Tabla 6). Cabe mencionar que debido a que este KPI requiere un tiempo mayor de implementación se resolvió trabajar solo con los equipos de criticidad “alta” los cuales llegan a un número de 735 equipos.

Los equipos para trabajar fueron categorizados de la siguiente manera:

- Bombas dewatering
- Bombas suministro
- Bombas GEHO
- Estanques
- Instrumentación y control
- Pozos
- Válvulas (check, globo, mariposa, compuerta)

A cada una de las categorías se les dio un tiempo definido en el cual hacer el análisis de reproceso, es decir, un tiempo en el que no debería volver a ser intervenido un equipo por una misma falla ya resuelta con anterioridad. Estos tiempos fueron definidos por los superintendentes e ingenieros senior del área dando como resultado lo siguiente:

Tabla 11. Equipos y su tiempo de análisis para KPI de reproceso.

Equipos	Tiempo de análisis reproceso [meses]
Bombas dewatering	6
Bombas suministro	6
Bombas GEHO	2
Estanques	24
Instrumentación y control	6
Pozos	3
Válvulas	6

Una vez definidos los tiempos de análisis podemos realizar el análisis de falla de los equipos, en adelante se menciona el proceso para un equipo en particular a modo de ejemplo, pero cabe recordar que el proceso fue realizado para 735 equipos a través de una macro que nos permite repetir el proceso con todos los demás equipos en Excel e importar los resultados a nuestro dashboard en Power BI.

Para el ejemplo se escoge la bomba **220PP149** que es una de las 3 bombas impulsoras de concentrado hacia el puerto de Iquique, por lo que su criticidad y análisis son de alta importancia.

Lo primero que se realiza es llevar todos los datos de falla a una planilla de Excel con sus respectivos tiempos de inicio y final en donde son ordenados por fecha de la más reciente a la más antigua. A continuación, se agregan 3 columnas con los siguientes análisis.

- 1°Columna “Última falla”. Esta columna nos mostrara cual fue la última fecha en presentarse una falla con la misma descripción que la analizada en la fila.
- 2°Columna “Días”. Ya encontrada la fecha más cercana en la que se presenta la misma falla simplemente se realiza una resta de fechas y se muestra la cantidad de días de distancia entre ellas.
- 3° Columna “Reproceso”. En esta última columna se realiza un análisis con la función “IF”, donde se establece que si el tiempo de la segunda columna es menor al tiempo previamente establecido (tabla 9) se mostrará un SI para acusar que ese tipo de falla ya se había presentado en un lapso de días no permitido.

Todo lo anterior se puede ver de la siguiente manera en Excel.

Tabla 12. Análisis de reproceso para equipo 220PP149.

FechaInicio	FechaFin	EquipoNombre	ModoFallaDescripcion	Ultima falla	DIAS	REPROCESO
27/1/2019 00:22	7/1/2019 00:28	220PP149	FALLA INSTRUMENTACION Y CONTROL	10/7/18 0:28	112	
26/1/2019 08:53	8/1/2019 16:46	220PP149	MANTENCION PROGRAMADA	9/8/18 16:46	140	
24/1/2019 11:54	13/1/2019 12:04	220PP149	SOBRECARGA	5/13/18 12:04	256	
23/1/2019 00:13	23/1/2019 00:18	220PP149	FALLA OPERACIONAL	1/11/19 4:06	12	SI
11/1/2019 04:06	23/1/2019 04:06	220PP149	FALLA OPERACIONAL	9/23/18 4:06	110	
9/1/2019 20:26	23/1/2019 20:35	220PP149	CORTE ENERGIA	1/8/19 20:35	1	SI
8/1/2019 20:35	23/1/2019 20:50	220PP149	CORTE ENERGIA	8/23/18 20:50	138	
1/1/2019 09:21	29/1/2019 19:17	220PP149	EMPAQUETADO AGUA	6/29/18 19:17	186	

La tabla anterior solo muestra una parte de la base de datos total del equipo para una mejor comprensión.

Finalmente, los datos son importados a nuestro dashboard para ser mostrados gráficamente de la siguiente manera.

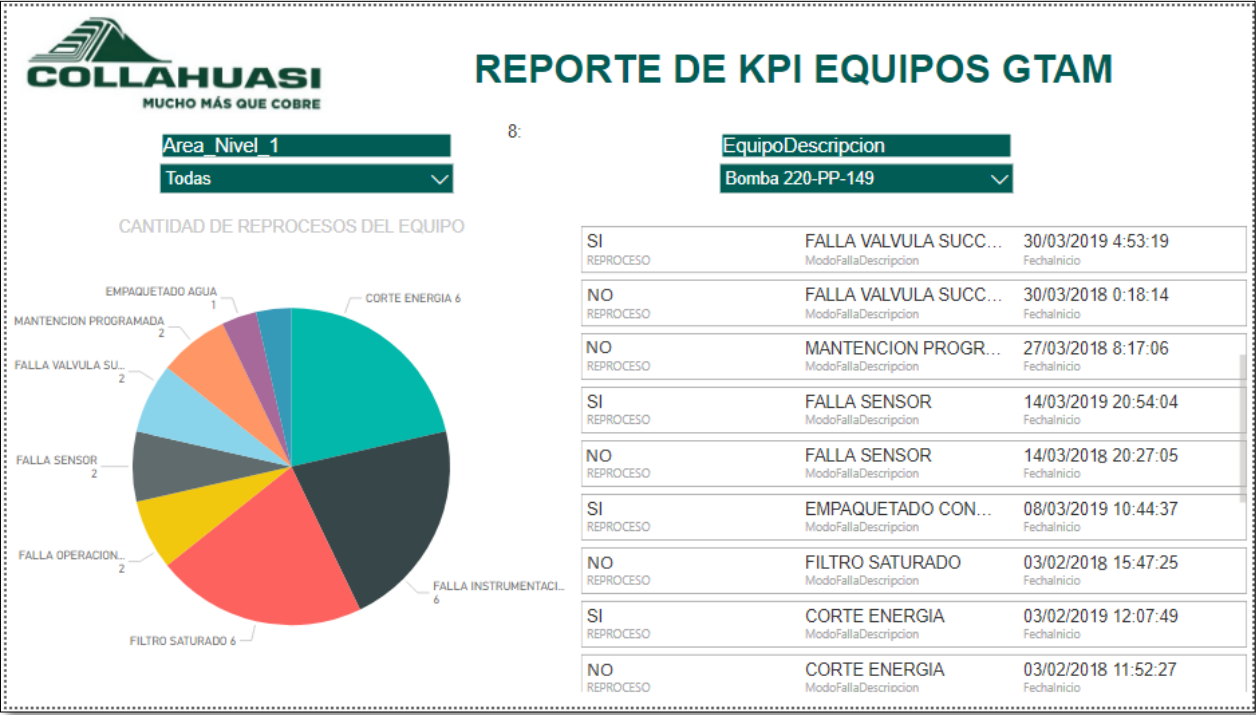


Figura 24. Diseño del indicador de reproceso.

En la parte superior del reporte se pueden ver dos pestañas desplegables en donde se pueden escoger el área y el equipo a estudiar. Seguido de esto, en el costado inferior izquierdo de la imagen se puede ver un gráfico de torta que muestra todos los tipos y cantidad de fallas que ha tenido el equipo en cuestión, este se escogió por su facilidad de análisis ya que le da al usuario una idea rápida de la distribución proporcional de los datos. Y por último en el costado derecho se puede ver una tabla con tres columnas en donde se señala si existe un reproceso, el tipo de falla que lo causaría y la fecha en la que se presentó la última falla del mismo tipo respectivamente.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En la industria minera se requiere de un correcto manejo respecto a la disponibilidad de equipos críticos evitando la falta al plan de trabajo, previendo fallas y administrando los tiempos de mantenciones realizadas.

La incorporación de un sistema de reportabilidad de KPI en línea y actualizado implica dar continuidad a la cadena productiva de concentrado, identificando oportunamente fallas y frecuencia con la que ocurren estos incidentes.

Por otro lado, permite el poder contar con un sistema de monitoreo y seguimiento en línea respecto a la totalidad de los equipos disponibles en la GTAM, pudiendo facilitar la tarea de análisis de los trabajadores del área, teniendo en un solo lugar y de manera automática la disponibilidad de equipos, nivel de criticidad, considerándose esta vez equipos de mediana criticidad los cuales con anterioridad eran descartados. Se lleva a cabo la optimización de la ruta comunicativa entre las nuevas gerencias formadas, facilitando la portabilidad de datos, recopilación y actualización de estos.

Los indicadores incluidos en el dashboard del reporte de KPI's permiten obtener una previsión de cuánto tiempo están indisponibles los equipos en cuestión. Además, proporcionan herramientas de decisión a los ingenieros expertos del área para realizar predicciones de producción, mantenimiento y el costo asociado a la prevención de fallas. Lo anterior conlleva a la toma de decisiones en respuesta a la búsqueda constante de mantener la disponibilidad del equipo lo mas alta posible, tanto reduciendo el tiempo medio de reparación como aumentando el tiempo medio entre fallas. Estas decisiones se basan principalmente en el mantenimiento preventivo para evitar la falla antes de que esta se produzca o la optimización del mantenimiento correctivo, lo que implica aumentar la velocidad de reacción ante un problema imprevisto, ya sea teniendo un inventario actualizado de repuestos críticos del equipo o manteniendo un equipo de reemplazo en bodega.

Por otro lado, los indicadores incluidos en el reporte de cumplimiento de actividades permiten llevar un control mas preciso de la planificación de actividades por parte del ingeniero a cargo, ya sea optimizando los tiempos de trabajo, la distribución homogénea de actividades a las empresas contratistas o la distribución de actividades según horas hombres disponibles en cada día de la semana. Lo anterior tiene como objetivo el mayor cumplimiento de actividades posibles dentro de

los días planificados, manteniendo siempre un margen de error el cual es afectado en gran parte por los mantenimientos correctivos o no planificados.

Dado que los indicadores de mantenimiento dependen en su totalidad de la base de datos interna de la compañía, se instruye a los trabajadores para realizar subida de información a la plataforma de todas las actividades y mantenimientos realizados con la mayor cantidad de detalles posibles con el fin de mantener los reportes actualizados en todo momento y evitar distorsión de los datos mostrados. Además, como consecuencia de esto, se solicita la digitalización de los datos que se presentan en libros de anotaciones del área de operaciones para completar el registro de equipos que no presentaban información en la base de datos.

Actualmente el reporte se sigue utilizando y se mantiene actualizado gracias a las gestiones de los ingenieros senior que quedaron a cargo de este nuevo sistema. Como consecuencia de la implementación, se han optimizado los mantenimientos preventivos de los equipos críticos y son atendidas con especial cuidado las partes que producen el reproceso de estos. Además, en el área de planificación se realiza de manera semanal el reporte para la distribución de actividades de manera equitativa y se optó por utilizar el mismo reporte para dar a conocer a los contratistas las actividades que les serían asignadas en la semana, por lo que al menos una persona de ellos debería hacer uso de la herramienta Power BI.

En general, y según lo informado, se ha cumplido con los objetivos de este proyecto, los cuales eran principalmente aumentar la disponibilidad de los equipos más críticos del área de tranque, agua y mineroducto como el cumplimiento de actividades tanto internas como externas.

Dada la implementación de un sistema de reportabilidad y seguimiento actualizado, se recomienda capacitar al personal en lo que respecta al uso de la plataforma Power BI, redactar un estándar de uso e interpretación de datos, como también de responsables de la plataforma incorporada en cuestión.

REFERENCIAS

- [1] A. Lattero, «Mantenimiento Mundial: Optimización del inventario de repuestos e insumos,» 2004. [En línea]. Available: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/Lattero.pdf>.
- [2] A. Parida, «DOCTORAL THESIS Development of a Multi-criteria Hierarchical Framework for Maintenance Performance Measurement Concepts , Issues and Challenges,» 2006.
- [3] R. Espinosa, «Indicadores de gestión: ¿Que es un KPI?,» 08 09 2016. [En línea]. Available: <https://robertoespinosa.es/2016/09/08/indicadores-de-gestion-que-es-kpi>. [Último acceso: 09 01 2020].
- [4] L. B. a. t. w. a. one, «KPI's ¿Qué son, para qué sirven y por qué y cómo utilizarlos?,» 2017. [En línea]. Available: <https://blog.es.logicalis.com/analytics/kpis-qu%C3%A9-son-para-qu%C3%A9-sirven-y-por-qu%C3%A9-y-c%C3%B3mo-utilizarlos>. [Último acceso: 09 01 2020].
- [5] M. Zegarra, «Indicadores para la gestión del mantenimiento de equipos pesados,» Universidad Alas Peruanas, 2016.
- [6] U. Kumar, D. Galar, A. Parida, C. Stenström y L. y Berges, «Maintenance PerformanceMetrics : A State of the Art Review. Número Kelly 1989.,» 2013.
- [7] p. m. Emerson, «www.PlantWebUniversity.com,» 2002. [En línea]. Available: <http://www.emerson.com/document/automation>.
- [8] S. y. G. M. Cavalieri, «A decision-making framework for managing maintenance spare parts.,» de *Production Planning*, 2008, pp. 379-396.
- [9] Minitab, «Soporte Minitab 19,» [En línea]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/supporting-topics/pareto-chart-basics/>. [Último acceso: 09 01 2020].

- [10] U. I. d. Valencia, «VIU Universidad,» 21 03 2018. [En línea]. Available: www.universidadviu.com/business-intelligence-cuales-aspectos-clave/. [Último acceso: 09 01 2020].
- [11] I. E. d. Posgrado, «SUMMA University,» [En línea]. Available: www.iep.edu.es/index.php?c=2§ion=37331.
- [12] Microsoft, «Power BI,» Microsoft, [En línea]. Available: powerbi.microsoft.com/es-es/what-is-power-bi/. [Último acceso: 09 01 2020].
- [13] Qlik, «Qlik,» [En línea]. Available: www.qlik.com/es-es. [Último acceso: 09 01 2020].

ANEXOS

ANEXO 1. EXTRACTO DE TABLA DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD

EQUIP_NO	ITEM_NAME	Frecuencia	Consecuencia	Criticidad
530DI011	CÁMARA DESCARGA RESER 501	3	2	B
530DI012	CÁMARA DESCARGA RESER 502	4	2	M
530DI013	CÁMARA CAJON DISTRIBUIDOR	2	1	B
220SM1	ESTACION DE MONITOREO SM1 MINERODUCTO 7"	3	1	B
220SM1-1	SPOOL SM1	1	1	B
220SM1-2	VALVULAS SM1	2	2	B
220SM1-3	INSTRUMENTACIÓN SM1	3	2	M
220SM2	ESTACION DE MONITOREO SM2 MINERODUCTO 7"	3	3	M
220SM2-1	SPOOL SM2	3	3	M
220SM2-2	VALVULAS SM2	2	2	B
220SM2-3	INSTRUMENTACIÓN SM2	1	1	B
220TES	ESTACION TERMINAL TS1 MINERODUCTO 7"	1	1	B
220TS1-1	SPOOL TS1	2	1	B
PRINCIP_TS1	RAMA PRINCIPAL TS1	2	2	B
TS1-EAU04-1	SPOOL VS-EAU-04-1	3	2	M
TS1-EAU04-10	SPOOL VS-EAU-04-10	3	1	B
TS1-EAU04-11	SPOOL VS-EAU-04-11	4	2	M
TS1-EAU04-12	SPOOL VS-EAU-04-12	4	2	M
TS1-EAU04-13	SPOOL VS-EAU-04-13	3	1	B
TS1-EAU04-14	SPOOL VS-EAU-04-14	2	1	B
TS1-EAU04-2	SPOOL VS-EAU-04-2	2	1	B
TS1-EAU04-3	SPOOL VS-EAU-04-3	2	1	B
TS1-EAU04-4	SPOOL VS-EAU-04-4	3	1	B
TS1-EAU04-5	SPOOL VS-EAU-04-5	4	1	M
TS1-EAU04-6	SPOOL VS-EAU-04-6	4	1	M
TS1-EAU04-7	SPOOL VS-EAU-04-7	2	1	B
TS1-EAU04-8	SPOOL VS-EAU-04-8	3	1	B
TS1-EAU04-9	SPOOL VS-EAU-04-9	3	1	B
TS1-EAU22	SPOOL VS-EAU-22	3	1	B
TS1-EAU23	SPOOL VS-EAU-23	2	3	M
TS1-EAU24-1	SPOOL VS-EAU-24-1	2	3	M
220BV1157961	VALVULA BV-1-15-7961	4	4	A
220BV1157963	VALVULA BV-1-15-7963	5	4	A
220BV2157960	VALVULA BV-2-15-7960	5	3	A
220BV2157962	VALVULA BV-2-15-7962	4	4	A
220BV2157964	VALVULA BV-2-15-7964	3	3	M
220SM2A	ESTACION MONITOREO SM2A MINERODUCTO 8"	2	4	M
220SM2A-1	SPOOL SM2A	4	2	M
15EAH702	SPOOL 15-EAH-702	5	2	A