

Mejora del nivel de imputaciones en la Planta de Cátodos de la mina Spence

Benjamín Baltazar Núñez Marín

Ingeniería Civil Industrial

5 de diciembre del 2023

Resumen ejecutivo

En el presente informe se aborda la problemática de un bajo porcentaje de imputación de detenciones en la Planta de Cátodos de la mina Spence desde la perspectiva de la empresa Rmes Analytics. Esta última presta servicios de analítica avanzada para la confiabilidad de activos mineros mediante su software de creación propia, Rmes Suite.

La imputación es un proceso vital para la empresa ya que a partir de este se alimenta con información al software. Imputar implica clasificar las detenciones de los equipos mineros completando determinados campos como la duración, tipo de detención, modo de detención, entre otros. Un bajo nivel de imputación genera que no se consideren todas las pérdidas de tiempo operacional que ocurren, poniendo en riesgo la precisión del cálculo de indicadores y análisis más complejo que realiza el aplicativo.

Al indagar en las posibles causas de esta problemática se encontró que los catálogos de modos de detención eran muy extensos, que el proceso no se encuentra debidamente estandarizado, y que la clasificación de eventos se realiza de forma casi manual para algunos campos. Lo anterior hace que el proceso en general sea poco ágil.

Se planteó como objetivo incrementar el porcentaje de imputación de la Planta de Cátodos a un 25% para diciembre del 2023. Para ello se llevan a cabo 3 soluciones: la automatización de imputaciones, la definición de un filtro de tiempo para omitir algunos eventos poco significativos, y la generación de lógicas de autocompletado de detenciones para que al momento de clasificar una detención sea posible expandirla a los equipos cercanos.

Los resultados mostraron ser positivos para las tres propuestas pero en distintos niveles. La automatización de las clasificaciones fue la que mostró un desempeño más débil, aumentando la métrica de este proyecto en un 0,1%. El filtro de tiempo de detenciones mostró ser capaz de liberar una gran cantidad de Horas-Hombre al ahorrar 337,78 horas en el proceso. Mientras que el autocompletado de detenciones fue la que obtuvo mejores resultados logrando incrementar el porcentaje de clasificación en un promedio de 24,48%.

Estos resultados no solo ayudan a disminuir la probabilidad de no renovación del software por parte de los clientes, sino que también genera la oportunidad de que adquieran un servicio mejor. Lo que se traduce en mayores ingresos para Rmes.

Abstract

This report addresses the issue of a low percentage of stoppage input in the Spence Mine Cathode Plant from the perspective of Rmes. Rmes provides advanced analytics services for the reliability of mining assets through its proprietary software, Rmes Suite.

Inputting is a vital process for the company as it feeds information into the software. Inputting involves classifying the stoppages of mining equipment by completing certain fields such as duration, type of stoppage, stoppage mode, among others. A low level of inputting results in not considering all operational downtime, jeopardizing the accuracy of the application's indicators and more complex analyses.

When investigating the possible causes of this issue, it was found that stoppage mode catalogs were too extensive, the process was not adequately standardized, and event classification was almost manually performed for some fields. This makes the overall process less agile.

The objective was set to increase the input percentage of the Cathode Plant to 25% by December 2023. To achieve this, three solutions were implemented: automation of inputting, defining a time filter to omit some insignificant events, and generating input autocompletion logics to expand stoppages to nearby equipment when classifying a stoppage.

The results were positive for all three proposals but at different levels. The automation of classifications showed the weakest performance, increasing the project metric by 0.1%. The stoppage time filter proved capable of saving a substantial number of man-hours, saving 337.78 hours in the process. Meanwhile, the autocompletion of stoppages yielded the best results, increasing the classification percentage by an average of 24.48%.

These findings not only decrease the risk of clients opting not to renew their software subscriptions, but also present the potential for them to access an enhanced service, leading to increased revenues for Rmes.

Índice

Contexto.....	5
Problema.....	11
Objetivo y medidas de desempeño	16
Objetivo general:	16
Objetivos específicos:	17
Análisis de causas	18
Máquinas (software Rmes Suite): Catalogo de modos de falla	19
Métodos: Proceso de imputación no estandarizado	20
Métodos: imputación de forma manual	20
Estado del arte	22
Antofagasta Minerals.....	22
Sistemas de supervisión, control y adquisición de datos	23
Sistema de registro de datos vía identificación por radiofrecuencia	25
Sistema de registro de detenciones en planta concentradora	27
Soluciones	28
Reducción de catálogo de modos de detención	28
Automatización de imputaciones	28
Filtro de tiempo para detenciones	30
Autocompletado de detenciones	31
Selección de soluciones	32
Tiempo de desarrollo e implementación	32
Coste económico.....	33
Potenciales beneficios	34
Grado de automatización	34
Matriz de decisión	35
Metodología.....	36
Impacto sobre el porcentaje de imputación	38
Evaluación económica	39
Análisis de riesgos.....	42
Nuevo mapa del proceso.....	44
Plan de desarrollo e implementación	45
Desarrollo.....	47
Automatización de imputaciones	47
Filtro de tiempo para detenciones	51

Autocompletado de detenciones	56
Resultados.....	61
Automatización de detenciones.....	61
Filtro de tiempo para detenciones	62
Autocompletado de detenciones	63
Resultados generales.....	65
Conclusiones y recomendaciones	67
Referencias.....	69
Anexos.....	70

Contexto

Rmes Analytics es una empresa tecnológica que se especializa en aplicar analítica avanzada y modelos digitales para mejorar la disponibilidad y rendimiento de los activos críticos en procesos complejos. Con 25 años de experiencia en el sector minero, emplea su propio software, RMES Suite®, para proporcionar servicios a destacados operadores, logrando que 7 de los 10 principales productores de cobre mundial utilicen su aplicación. Las operaciones que lo utilizan en Chile representan el 70% de la producción de cobre mundial. Sus clientes mineros incluyen a Codelco, BHP, Antofagasta Minerals, Teck, Southern Copper, Anglo American, entre otros. Además, Rmes ofrece sus servicios a diversas compañías de otras industrias, como Boston Consulting Group, Fluor, ABB, Chilquinta, AES, Metro de Santiago, Agrosuper, Leonardo, Toshiba, entre otras.

La propuesta de valor del servicio ofrecido por Rmes es mejorar la disponibilidad y capacidad de activos industriales para funcionar de manera efectiva y eficiente. RMES Suite se ofrece mediante una suscripción anual que incluye usuarios ilimitados para el cliente, soporte permanente, posibilidad de cambios en el modelo digital y apoyo en el proceso de adopción. Dentro de los servicios que Rmes ofrece se pueden distinguir los servicios Spots (se prestan de manera puntual) y los recurrentes. Ambos se muestran en las siguientes tablas:

Servicios Spots
Estudio de mantenibilidad y confiabilidad
-Ingeniería de perfil
-Ingeniería conceptual
-Ingeniería de factibilidad básica
-Ingeniería de detalle
Análisis T-RAM
Análisis OEE (Planta/Flota)
Análisis Full Potential (Planta/Flota)
Planes de mantenimiento
Plan matriz de mantenimiento
Diagnóstico de gestión de activos
Diagnóstico de gestión de mantenimiento
Estudio de dotación de mantenimiento
Modelos de tercerización

Tabla 1: Servicios puntuales prestados por Rmes.¹

¹ Fuente: Elaboración propia. Información recuperada de presentación Power Point productos Rmes.

Servicios recurrentes
Planificación y programación de mantenimiento (SAP PM)
Depuración de datos desde cualquier fuente
Creación de objetos técnicos (SAP PM u otros)
FMECA (Identificación de modos de falla)
RCM (FMECA + acciones de mantenimiento)
Ingenieros de performance
Ingenieros de análisis de fallas
Capacitación en múltiples materias asociadas a la ingeniería
Diplomados y Magíster en conjunto con la PUCV

Tabla 2: Servicios recurrentes prestados por Rmes.²

La empresa se compone de 75 personas que trabajan en distintas áreas, las cuales se muestran en el siguiente organigrama:



Diagrama 1: Organigrama Rmes.³

Durante su pasantía, Benjamín Núñez se incorporó al área de Customer Success, encargada de asegurar que los clientes con suscripción activa obtengan el máximo valor posible del aplicativo. Dentro de los roles de esta área se incluye la gestión de relaciones con los clientes, atendiendo sus necesidades y requerimientos; la implementación y adopción del software, ofreciendo orientación y capacitación para su correcto uso; soporte continuo para la solución de problemas; gestión de retención, identificando posibles causas de cancelación de suscripciones; y la expansión de ventas, detectando oportunidades para ofrecer nuevos productos y servicios a los clientes.

El software Rmes Suite utiliza las señales emitidas por los sensores de los diversos equipos (activos) que componen el proceso del cliente para determinar su estado, ya sea "Run"

² Fuente: Elaboración propia. Información recuperada de presentación Power Point productos Rmes.

³ Fuente: Departamento de RRHH Rmes.

(funcionando) o "Stop" (detenido). A partir de esta señal binaria y los modelos de tiempo de los clientes, el software actúa como un motor de cálculo para obtener diversos indicadores, como disponibilidad, utilización, tiempo de operación, MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio de reparación), entre otros⁴. Además, el aplicativo permite realizar análisis más complejos, como T-RAM, que utiliza información sobre fallas de componentes de sistemas para generar distribuciones de probabilidad del proceso en cuestión; OEE, que mide la eficiencia de máquinas y procesos productivos en términos de su tiempo operativo real; y Full Potential, con el objetivo de optimizar todo el sistema de operaciones de un proceso.

El modelo de tiempo de un cliente es un marco de referencia que facilita la clasificación de los diversos estados por los cuales atraviesa un equipo a lo largo del tiempo, permitiendo así identificar posibles pérdidas productivas. Estos estados se clasifican según el tipo de detención. En el caso específico de BHP (Broken Hill Proprietary), propietaria de la mina Spence y cliente con el cual se desarrollará y explicará más adelante el proyecto, su modelo de tiempo se llama TUM (Time Usage Model) y se define de la siguiente manera:

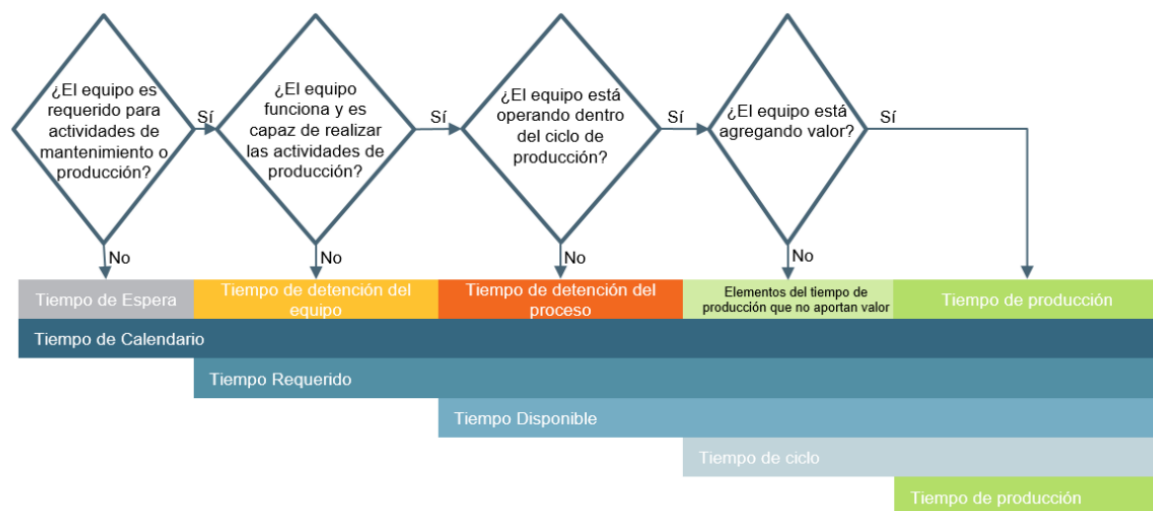


Diagrama 2: Definiciones de tiempo del modelo TUM. (BHP 2023)⁵

⁴ Para mayor comprensión de los indicadores visitar anexo 1.

⁵ Modelo de Uso del Tiempo BHP 2023, 2.

Término	Descripción
Tiempo de calendario	Tiempo total durante el período basado en el calendario gregoriano (24 horas/día, 365 días/año, 366 días/año bisiesto).
Tiempo de espera	No se necesita el equipo o el mismo no está disponible debido a cambios en las condiciones o a razones que recaen fuera del control de BHP (por ejemplo, conflictos industriales, fallas de servicio de terceros, desastres naturales, fuerza mayor).
Tiempo requerido	Se requiere el equipo para actividades operativas o de mantenimiento.
Tiempo de detención del equipo	El equipo no es capaz de realizar su función de producción requerida.
Tiempo disponible	El equipo funciona y es capaz de realizar las actividades de producción.
Tiempo de detención del proceso	El proceso de las actividades normales de producción se ve interrumpido.
Tiempo de ciclo	El equipo funciona y opera dentro del ciclo de producción.
Elementos del tiempo de producción que no aportan valor	El tiempo que no agrega valor dentro del ciclo de producción, incluido el tiempo durante el que los camiones aguardan en fila, tanto en el origen como en el destino, y el tiempo en que los equipos de carguío esperan para poder cargar.
Tiempo de producción	Tiempo que agrega valor y es parte inherente del ciclo de producción.

Tabla 3: Definiciones de tiempo del modelo TUM. (BHP 2023)⁶.

Este proceso general de cálculo y análisis realizado por Rmes Suite incluye un subproceso inicial denominado "imputación". En cada planta de operaciones diversos equipos participan en el proceso productivo y deben estar representados en un Diagrama Lógico Funcional (DLF o RBD), como menciona en el libro *Ingeniería de la confiabilidad*: “Una modelación RBD no necesariamente representa la conexión física de los componentes en el sistema, sino que sólo indica cómo el estado de los componentes (funcionamiento o en falla), representados por bloques, aseguran el funcionamiento del sistema.” (Arata Andreani y Arata Bozzolo 2013)⁷

Cuando un equipo experimenta una detención, se genera una señal Stop. La imputación implica registrar esta detección en una plataforma denominada Datafillweb, que facilita la captura y clasificación de datos al registrar varios campos relacionados con la detención. En la mina Spence el personal del CIO BHP (Centro Integrado de Control) se encarga de realizar las imputaciones. Los campos de imputación incluyen: "Validado", "Fecha hora de inicio", "Fecha hora de término", "Duración", "Código Equipo", "Tipo", "Modo de Detención", "Comentario" y "Turno".

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo se visualizan las detenciones imputadas y no imputadas en Datafillweb, junto con la definición de cada uno de estos campos:

⁶ Modelo de Uso del Tiempo BHP, 2023, p.2.

⁷ Arata y Arata, Ingeniería de la confiabilidad (RIL Editores, 2013), 113.

Código Equipo	ID	Tipo	Modo de Detención	Coment
35-FE-010 Feeder FE10	1174584	---	---	
41-CV-026 Correa CV26	39815	Detención Proceso No Programado	4220 - ACTIVACION PULL CORD POR MATERIAL	
41-CV-013 Correa CV13	33167	Detención Proceso No Programado	4220 - ACTIVACION SENSOR DESALINEAMIENTO	
40-CV-008 Correa CV08	1174602	---	---	
41-CV-011 Correa CV11	1174596	---	---	

Imagen 1: Captura de pantalla Datafillweb Spence Cátodos.⁸

La imagen anterior representa una captura de pantalla de Datafillweb, donde se exhiben algunos campos de imputación, y cada fila corresponde a una detención. Las filas 1, 4, y 5 carecen de información en los campos "Tipo" y "Modo de Detención", lo que indica que son detenciones no imputadas. En cambio, las filas 2 y 3 contienen información sobre la detención en esos campos, de modo que están imputadas.

Campo	Definición
Validado	Si se confirman los demás campos de la imputación en una segunda revisión
Fecha hora de inicio	Fecha y hora a la que inició la detención
Fecha hora de término	Fecha y hora a la que finalizó la detención
Duración	Duración total de la detención
Código Equipo	Código/nombre que identifica al equipo
Tipo	Tipo de detención
Modo de detención	Explicación específica del tipo de detención
Comentario	Comentario que el imputador desea agregar a la detención (opcional)
Turno	Turno día o turno noche más fecha y hora

Tabla 4: Descripción de los distintos campos a clasificar durante la imputación.⁹

Es importante destacar que de los campos anteriores todos se llenan de forma automática excepto Tipo, Modo de detención, y Comentario, los cuales deben ser rellenados a partir de una lista predefinida que se despliega por el personal de CIO BHP.

La imputación de detenciones es crucial para el funcionamiento de Rmes Suite, ya que en este proceso se proporcionan al software los datos necesarios para realizar sus cálculos. Cuando no se imputan detenciones, la confiabilidad de los indicadores y servicios ofrecidos por la aplicación se ve afectada. Para Rmes, es esencial que los procesos de sus clientes cuenten con una alta tasa de imputación ya que de lo contrario, no solo se brinda un servicio poco confiable

⁸ Fuente: Elaboración propia. Imagen obtenida a través de Datafillweb en escritorio remoto BHP.

⁹ Fuente: Elaboración propia.

cuyos resultados pueden no reflejar la realidad de los procesos, sino que también se corre el riesgo de afectar la satisfacción del cliente con el servicio. Esto puede poner en peligro la continuidad de la suscripción y la reputación de Rmes.

A continuación, se presenta un gráfico que ilustra el comportamiento del porcentaje de imputación durante los meses de noviembre de 2022 hasta agosto de 2023:

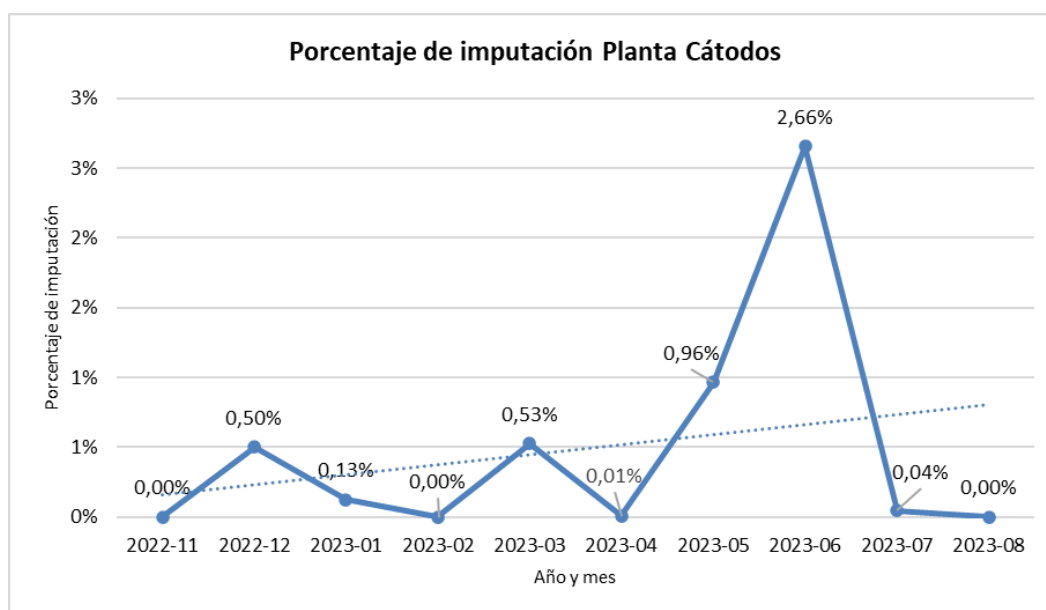


Gráfico 1: Porcentaje de imputación histórico en la Planta de Cátodos.¹⁰

Como se observa en la gráfica, la planta de cátodos ha registrado consistentemente bajos niveles de imputación con valores cercanos a 0% en la gran mayoría de los meses, solo con un pico de un 2,66% en el mes de junio. La baja imputación impide que los indicadores y análisis de Rmes Suite reflejen con precisión la realidad de las operaciones de sus clientes. Esto plantea riesgos para Spence, ya que si basan la gestión de sus operaciones en resultados con bajo nivel de imputación, pueden cometer graves errores. Además, para Rmes esta situación puede afectar la satisfacción del cliente y con esto su reputación en la industria así como la posibilidad de perder clientes.

¹⁰ Fuente: Elaboración propia. Construida a partir de datos obtenidos de Datafillweb Spence.

Problema

La métrica principal que se busca mejorar, y que servirá como indicador de éxito para este proyecto, es el porcentaje de imputación de las detenciones en la planta de cátodos de Spence. Rmes Suite calcula este porcentaje dividiendo las detenciones clasificadas entre las detenciones totales.

$$\text{Porcentaje de imputación} = \frac{\text{Detenciones clasificadas}}{\text{Total de detenciones}} \cdot 100$$

La problemática es que durante noviembre de 2022 a agosto de 2023, el porcentaje de imputación de detenciones ha sido menor al 3%. Esto tiene un impacto negativo sobre los cálculos de tiempo del TUM, ya que no se consideran adecuadamente todas las pérdidas de tiempo productivo. Esto genera inexactitud en el cálculo de los indicadores de los equipos y en los análisis complejos que Rmes realiza para sus clientes.

Además de la gráfica mensual del porcentaje de imputación, se analiza la distribución diaria de imputaciones en los últimos 10 meses. A continuación se muestra un gráfico de densidad para las clasificaciones diarias:

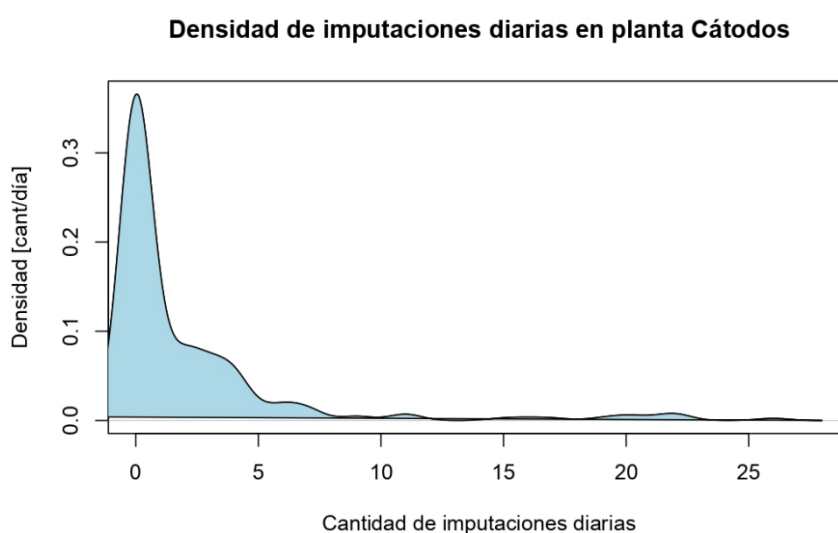


Gráfico 2: Densidad de imputaciones diarias en Planta de Cátodos.¹¹

¹¹ Fuente: Elaboración propia. Gráfico creado a partir de datos obtenidos de Datafillweb Spence.

En la gráfica se observa que existe un pico pronunciado alrededor de las 0 imputaciones diarias, indicando que la mayoría de los días se registraron 0 imputaciones. Esto también se ve apoyado por el siguiente boxplot:

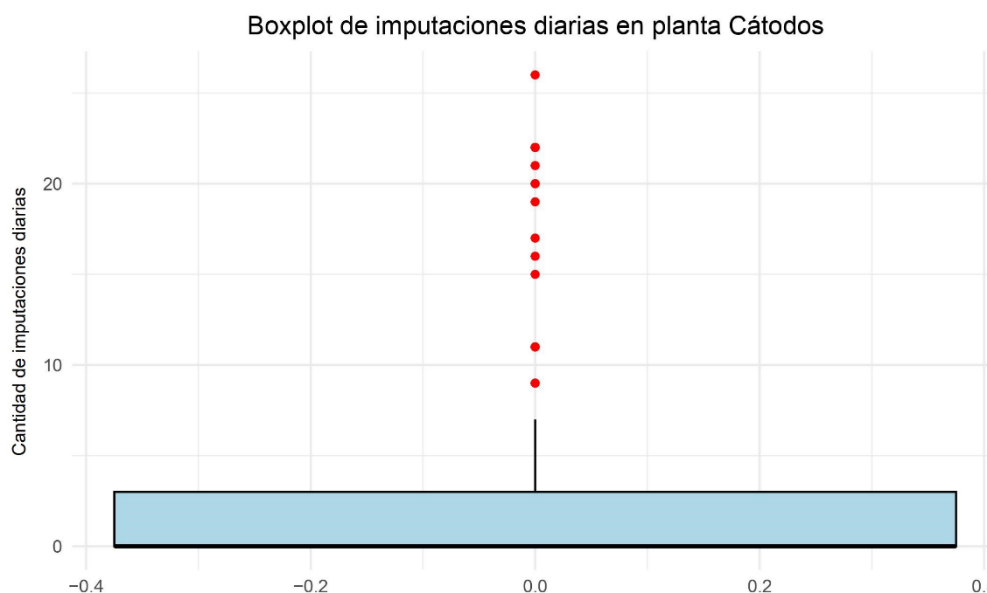


Gráfico 3: Boxplot detenciones diarias en Planta de Cátodos.¹²

En el boxplot el rango intercuartílico es 3, lo cual indica que el 50% de los datos se encuentra dentro de ± 3 imputaciones diarias. También se observa una gran cantidad de valores atípicos, lo que indica que los días que tuvieron una mayor cantidad de detenciones son un suceso poco común en la data.

Ambos gráficos se generaron mediante la herramienta R Studio. La media calculada fue de 2,12 detenciones diarias, mientras que la mediana fue de 0 detenciones. La curtosis, con un valor de 14,195 indica un pico pronunciado en la distribución, donde se concentran la mayoría de los datos. Considerando estos aspectos, se concluye que la mejor medida de tendencia central para representar las imputaciones diarias de la planta de cátodos es la mediana de 0 detenciones diarias.

Esta data histórica corresponde a información sobre las detenciones en la planta de cátodos desde el 30/11/2022 hasta el 16/08/2023. Durante este periodo, se registraron 101.053 detenciones. Estas se resumen en la siguiente tabla:

¹² Fuente: Elaboración propia. Gráfico creado a partir de datos obtenidos de Datafillweb Spence.

Fecha	No Imputados	Imputados
2022-11	18	-
2022-12	11.136	56
2023-01	11.962	15
2023-02	12.214	-
2023-03	12.833	68
2023-04	13.345	1
2023-05	10.780	105
2023-06	11.101	303
2023-07	11.430	5
2023-08	5.681	-

Tabla 5: Cantidad de imputaciones y no imputaciones históricas.¹³

Para comprender mejor la problemática del proyecto, es esencial entender el funcionamiento del proceso relacionado con el KPI principal. Para lograrlo, se presenta inicialmente un diagrama general del proceso conocido como "la ruta del dato". Este diagrama ilustra el proceso desde la generación de la señal Run/Stop hasta la obtención de indicadores derivados de esta:

¹³ Fuente: Elaboración propia. Tabla creada a partir de datos obtenidos de Datafillweb Spence.

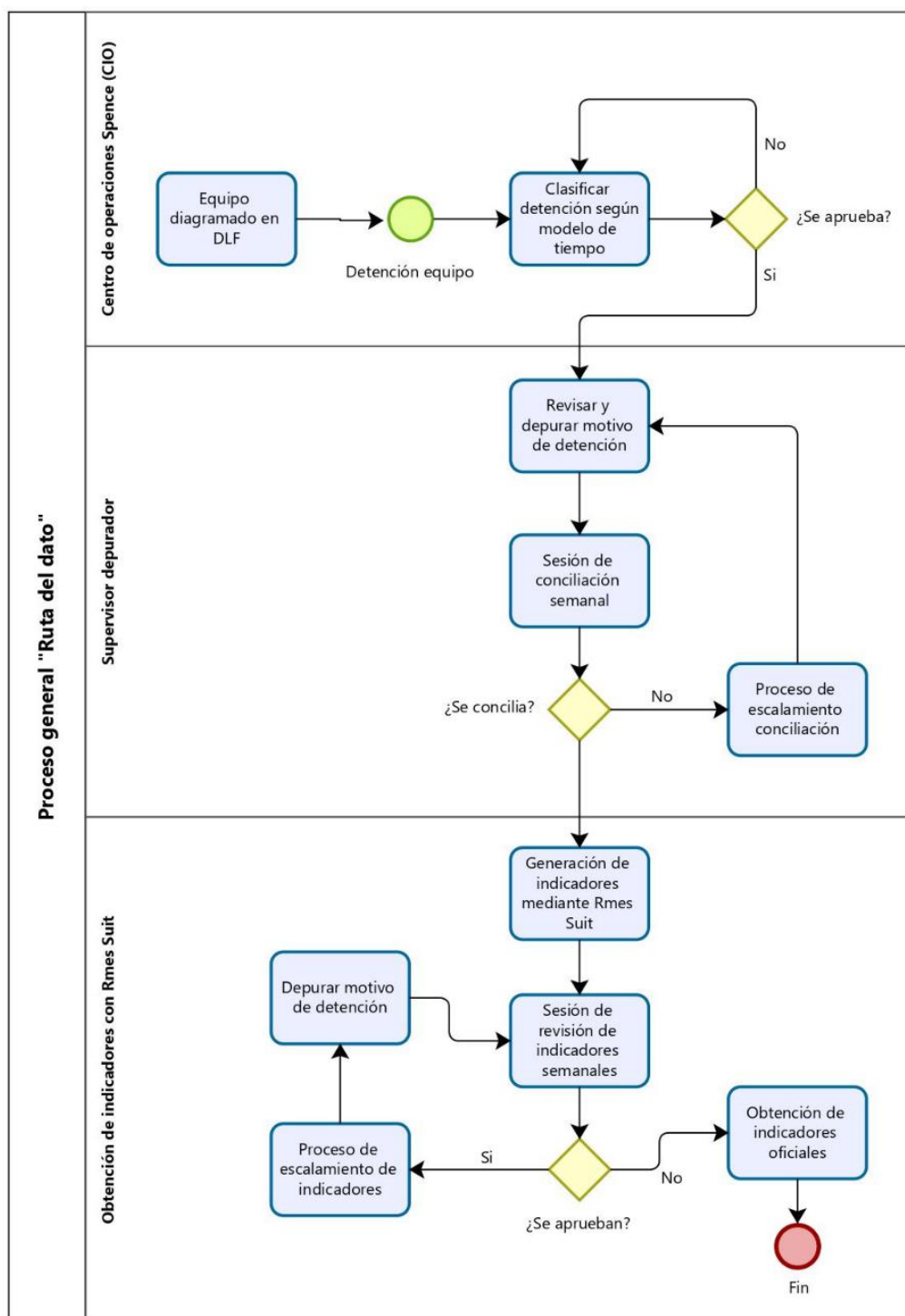


Diagrama 3: Ruta del dato.¹⁴

En este diagrama, la imputación se lleva a cabo en la actividad "clasificar detención según modelo de tiempo". A continuación, se presenta un diagrama detallado de esta actividad:

¹⁴ Fuente: Elaboración propia. Se utilizó la herramienta Bizagi para construir el diagrama de este proceso.

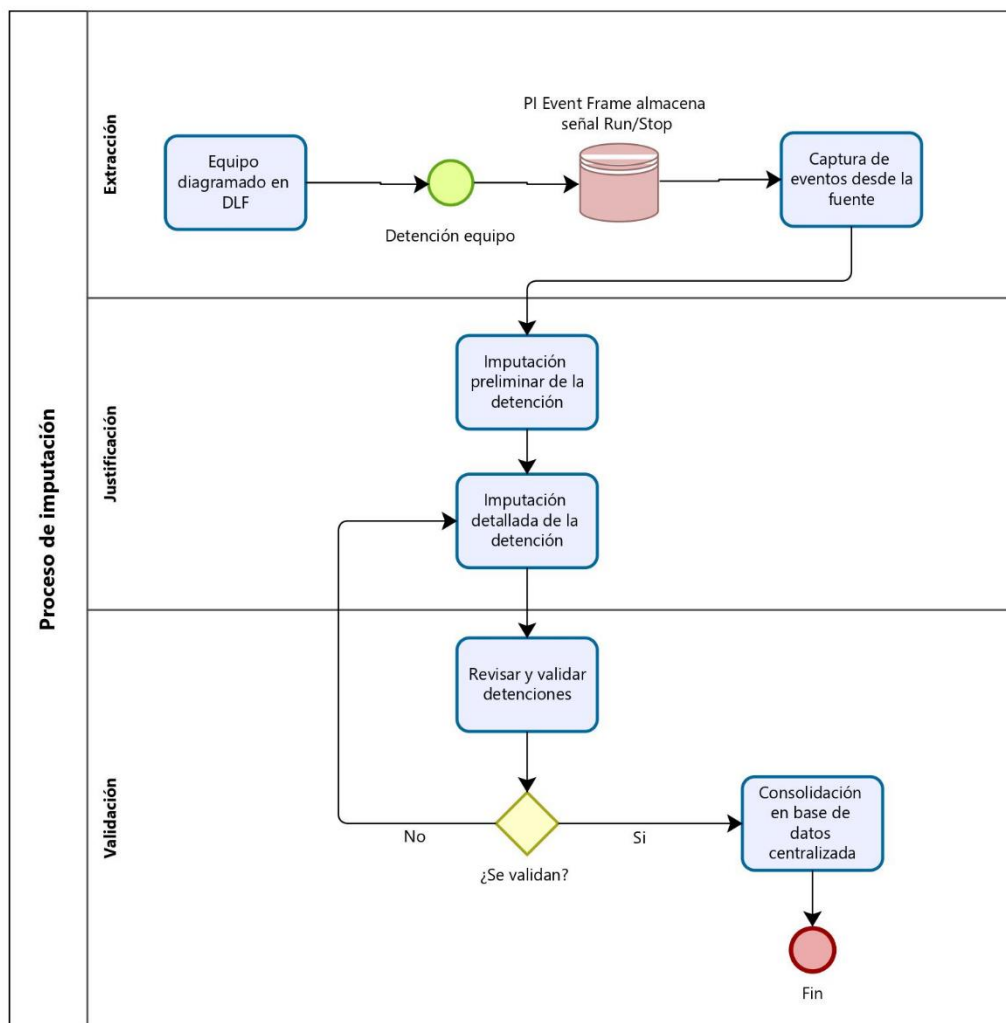


Diagrama 4: Proceso de imputación de detenciones.¹⁵

Este proyecto se centrará en las actividades de "Imputación preliminar de la detención" e "Imputación detallada de la detención". Estas dos actividades son cruciales, ya que es en este punto donde se clasifican y completan los campos de las detenciones de los equipos.

¹⁵ Fuente: Elaboración propia. Se utilizó la herramienta Bizagi para construir el diagrama de este proceso.

Objetivo y medidas de desempeño

Objetivo general:

El objetivo SMART de este proyecto es aumentar el porcentaje de imputación de detenciones de la Planta de Cátodos de la mina Spence a un 25% en los próximos 4 meses (diciembre 2023).

Gráficamente este objetivo y la situación actual de la métrica se puede apreciar a continuación:

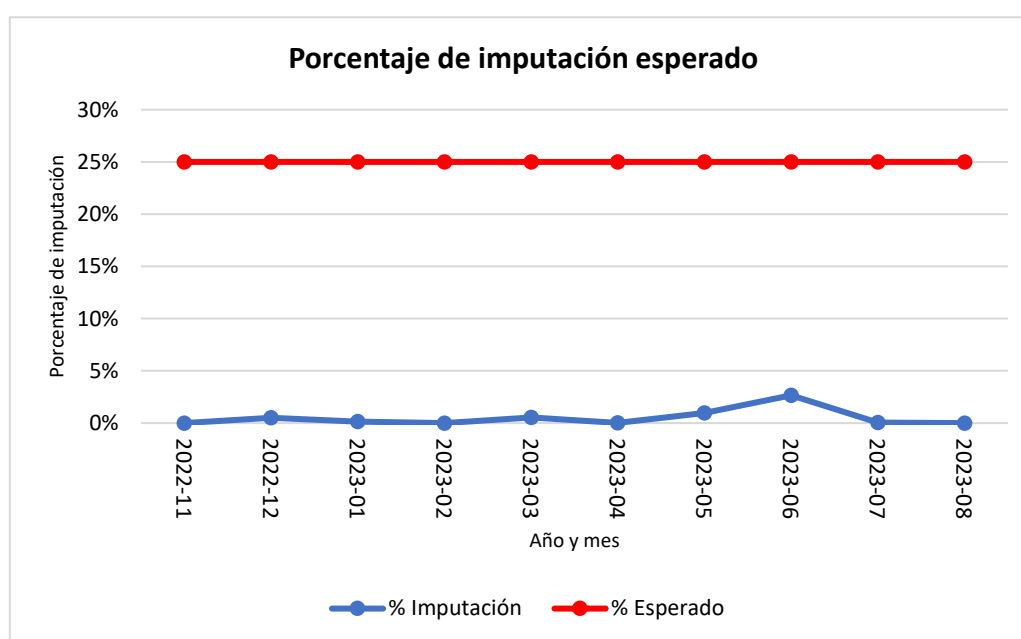


Gráfico 4: Porcentaje de imputación histórico y objetivo del proyecto.¹⁶

Aumentar el porcentaje de imputación mejora la calidad de la información para alimentar a Rmes Suite. Esto posibilita considerar más pérdidas de tiempo operativo, como tiempos de espera, detención de equipos y del proceso, así como elementos del tiempo de producción que no aportan valor. De este modo se puede entregar un mejor servicio al cliente, disminuyendo la probabilidad de que no renueven su licencia al aplicativo e incluso aumentar la probabilidad de que renueve una licencia más completa, lo cual generaría mayores ingresos para Rmes.

¹⁶ Fuente: Elaboración propia. Gráfico creado a partir de datos obtenidos de Datafillweb Spence.

La fórmula con la cual se calcula el porcentaje de imputación:

$$\text{Porcentaje de imputación} = \frac{\text{Detenciones clasificadas}}{\text{Total de detenciones}} \cdot 100$$

Objetivos específicos:

Los objetivos específicos que permitirán al alcanzar el objetivo general de este proyecto son los siguientes:

- Determinar los principales modos de falla de las imputaciones de la Planta de Cátodos.
- Determinar cuáles son los equipos que presentan una mayor cantidad de detenciones en la planta de cátodos.
- Analizar si existen patrones o particularidades en los tiempos de duración de las detenciones de los equipos en la Planta de Cátodos.
- Automatizar tareas para lograr que el proceso de imputación de detenciones sea lo más ágil posible.
- Disminuir el tiempo total necesario que se debe dedicar al proceso imputación de detenciones.

Análisis de causas

Se empleó el diagrama de Ishikawa para analizar las posibles causas de la baja imputación en la Planta de Cátodos de Spence. Este diagrama visual facilita la identificación de las causas potenciales de un problema y ayuda a determinar su causa raíz.

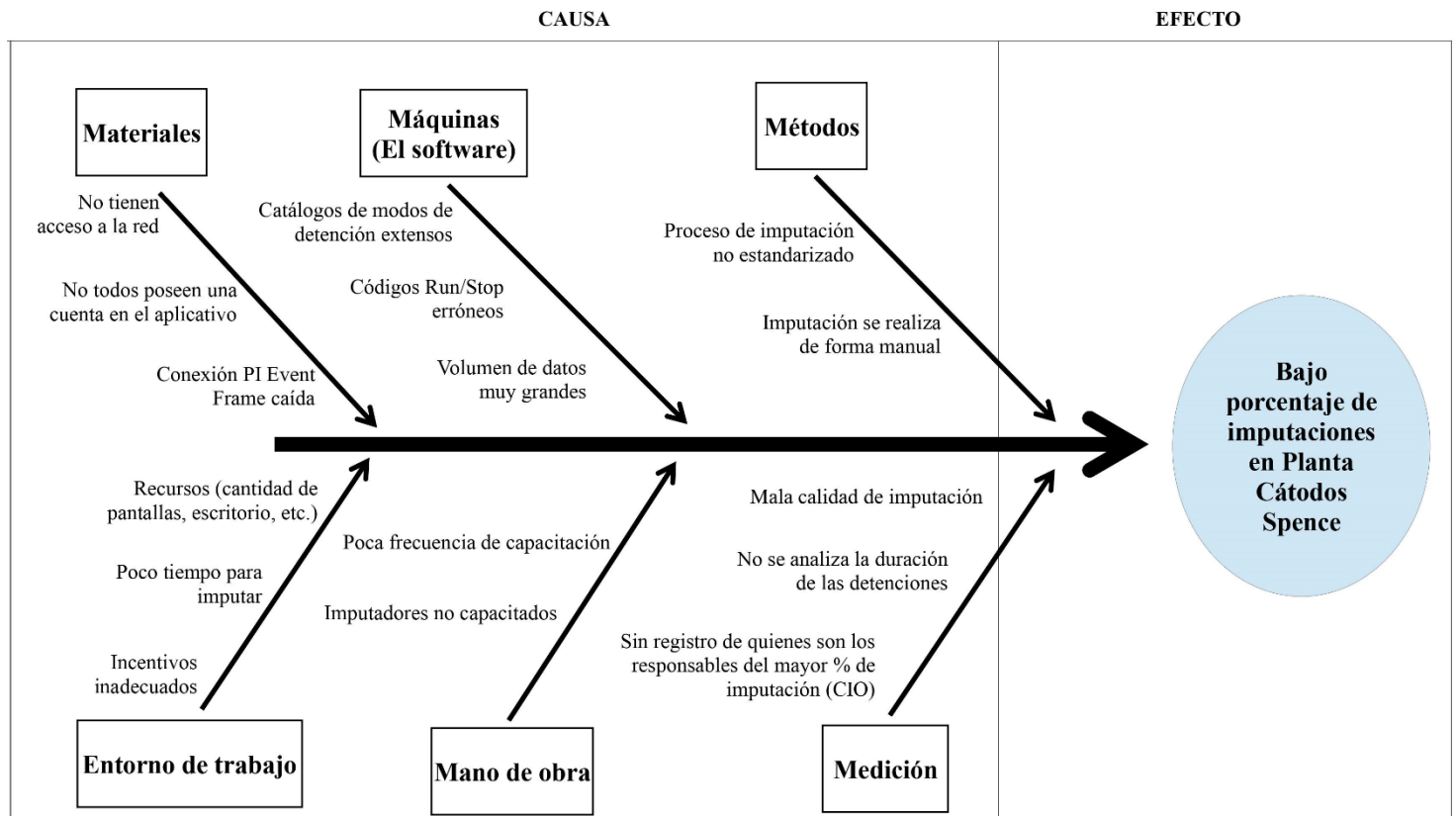


Diagrama 5: Ishikawa para causas de la problemática.¹⁷

Para identificar las categorías generales y principales se contó con la colaboración y experiencia del personal de Customer Success (CS). Luego de conversaciones y análisis las causas seleccionadas se describen a continuación.

¹⁷ Fuente: Elaboración propia.

Máquinas (software Rmes Suite): Catalogo de modos de falla

La planta de Cátodos se divide en tres áreas en términos de su DLF: Área seca, Ripio y Área húmeda. Los catálogos de modos de detención para los equipos de estas áreas se agrupan en dos categorías, un grupo incluye Área seca y Ripio, mientras que el otro abarca los equipos de Área húmeda.

Área seca y ripio	Área húmeda	Total
273	627	900

Tabla 6: Cantidad de modos de detención en cada catálogo.¹⁸

Existen dos catálogos: uno con 273 modos de detención posibles para los equipos de Área seca y Ripio, y otro con 627 tipos de detenciones para Área húmeda. La amplia variedad de tipos de detención para un equipo dificulta el proceso de imputación ya que muchas de estas no se aplican a todos los equipos, solo un grupo reducido de estas realmente ocurre. También se tiene que algunas fallas comparten significados similares como "equipo sin energía suficiente" y "equipo con bajo voltaje", por otro lado, la aplicabilidad de algunos tipos de falla es específica y no se extiende a todos los equipos.

Código	Nombre
DPP-SPC02MF001	2000 - CAMBIO TURNO
DPP-SPC02MF002	2011 - PAUSA PARA COMER (DÍA)
DPP-SPC02MF003	2012 - PAUSA PARA COMER (NOCHE)
DPP-SPC02MF004	2040 - REUNION
DPP-SPC02MF005	2090 - TRONADURA
DPP-SPC02MF006	2100 - ENTRENAMIENTO
DPP-SPC02MF007	2120 - CHEQUEO SETTING
DPP-SPC02MF008	2120 - COMISIONAMIENTO
DPP-SPC02MF009	2120 - CORTE DE CARGA POR INSPECCION

Imagen 2: Captura de pantalla de catálogo de modos de falla.¹⁹

¹⁸ Fuente: Elaboración propia. Información obtenida del registro de catálogos de modos de falla en Rmes Suite Spence.

¹⁹ Fuente: Elaboración propia. Imagen obtenida a través de Rmes Suite Spence.

Métodos: Proceso de imputación no estandarizado

Tras conversar con personal del área de CS, se identificó que CIO de BHP carece de un proceso debidamente estandarizado para la imputación de detenciones. En primer lugar, las personas encargadas de la imputación no se dedican exclusivamente a esta tarea, sino que también desempeñan funciones de gestión operacional en los procesos mineros. Para ello, trabajan con seis pantallas, controlando situaciones en tiempo real de la mina, y solo una de estas pantallas se destina a la imputación de detenciones. Esto conduce a que, en ocasiones, otras tareas se prioricen sobre la clasificación de detenciones.

En segundo lugar, en CIO BHP no distribuyen equitativamente el proceso de clasificación de eventos, ya que algunos realizan un mayor porcentaje de imputación que otros. De modo que cuando aquellos operadores que realizaban una mayor cantidad de clasificaciones, por alguna razón, no pueden hacerlo se ve afectado el nivel de imputación general de la planta.

Por último, se tiene que cada imputador lleva a cabo las clasificaciones de detenciones de manera única, sin un proceso estandarizado que todos sigan. Se observa que llenan los campos en distinto orden y no siguen el mismo procedimiento ante dudas o problemas al clasificar las detenciones.

Métodos: imputación de forma manual

La clasificación de detenciones se realiza de manera manual para los campos “Tipo”, “Modo de detención”, y “Comentario”. En otras palabras, el imputador debe seleccionar la opción correspondiente para los campos de entre una serie de opciones predefinidas. La imputación de una detención lleva entre 1 y 3 minutos, lo que significa que cuando hay muchos eventos, el tiempo necesario para esta tarea se incrementa considerablemente. A continuación se presenta la cantidad mensual de detenciones en la data histórica, junto con el tiempo estimado necesario para clasificar esas detenciones, considerando un tiempo promedio de imputación de 1,5 minutos por eventualidad:

Fecha	Total detenciones	Tiempo [Horas]
2022-11	18	0.45
2022-12	11192	279.8
2023-01	11977	299.425
2023-02	12214	305.35
2023-03	12901	322.525
2023-04	13346	333.65
2023-05	10885	272.125
2023-06	11404	285.1
2023-07	11435	285.875
2023-08	5681	142.025

Tabla 7: Cantidad de imputaciones y tiempo necesario histórico.²⁰

²⁰ Fuente: Elaboración propia. Tabla creada a partir de datos obtenidos de Datafillweb Spence.

Estado del arte

Antofagasta Minerals

En Antofagasta Minerals (AMSA), el registro de detenciones consta de dos etapas principales. En la primera etapa, que tiene lugar en el sitio de operaciones, las distintas áreas y líneas de equipos son supervisadas por un operador. Cuando ocurre una detención de un equipo, se realiza una clasificación preliminar con la información disponible en ese momento a través de una plataforma similar a Datafillweb. Todas las detenciones registradas durante un turno son revisadas y validadas en la segunda etapa antes de ingresarlas al repositorio de datos.

Las principales diferencias con el método de imputación de BHP radican en que este realiza el control y gestión de sus operaciones de forma remota desde oficinas en Santiago, mientras que AMSA tiene una primera etapa de registro preliminar en el lugar de la faena minera y una segunda etapa remota para la validación de los datos obtenidos. Es relevante mencionar que AMSA cuenta con un filtro de tiempo para el registro de eventos, donde las detenciones con una duración menor o igual a 5 minutos son despreciadas, evitando así clasificar paradas que no representan una pérdida operacional significativa o cuyo impacto es poco relevante para el proceso.

Gracias al método descrito anteriormente, AMSA ha alcanzado un nivel de imputación igual o cercano al 100% en la mayoría de sus áreas y líneas de procesos, como se evidencia a continuación:

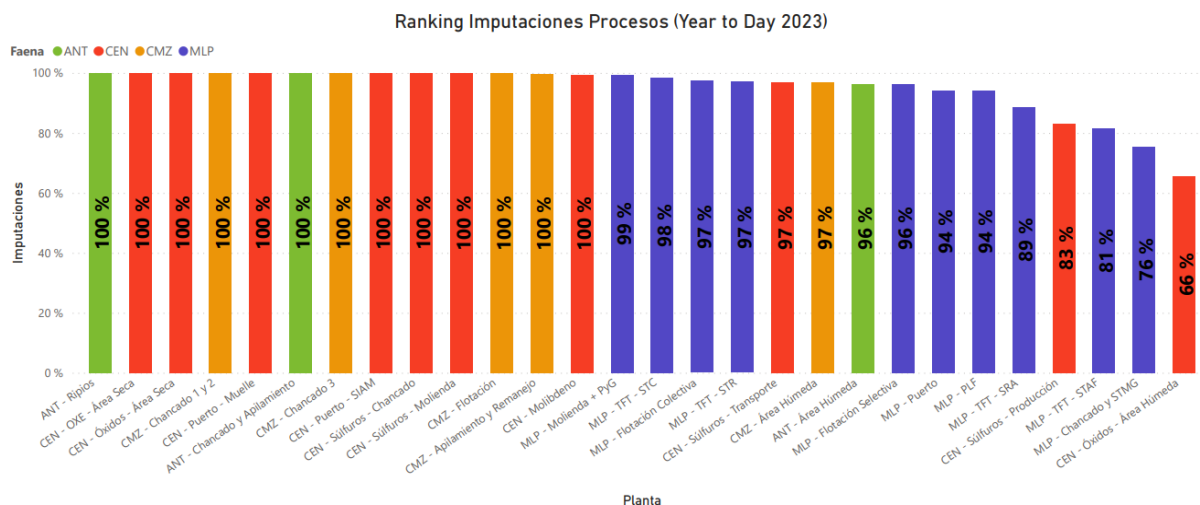


Gráfico 5: Porcentaje de imputación en líneas operaciones de AMSA.²¹

Sistemas de supervisión, control y adquisición de datos

Los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) son conjuntos de software que operan en computadoras para controlar procesos industriales mediante acceso remoto a través de una interfaz HMI (Human Machine Interface). Estos sistemas de automatización no solo supervisan el estado del proceso, sino que también registran el historial de alarmas (detenciones) y otras métricas. Estos datos pueden complementarse mediante el uso de bases de datos para generar informes en programas compatibles con Windows, como Excel, Word, u otros (Perez-López 2015)²².

La esencia de estos sistemas radica en que el software asume la responsabilidad del control y la gestión de los procesos, otorgando al operador remoto un papel principalmente centrado en la supervisión. En otras palabras, se busca la automatización tanto del control como de la gestión.

“El clásico supervisor soportado por un SCADA es un sistema de control que integra las tareas de detección y diagnóstico de fallas, como una actividad previa que permite incorporar

²¹ Fuente: Reporte de imputaciones de Rmes para AMSA.

²² Pérez-López, *Los sistemas SCADA en la automatización industria* (Tecnología en Marcha, 2013), 5-7.

de manera natural el control de fallas” (Pérez-López 2015)²³. Esto se logra al preprogramar de manera automática los valores que tomarán ciertas variables en respuesta a eventualidades de los equipos, utilizando señales de entrada o salida de los activos del proceso.

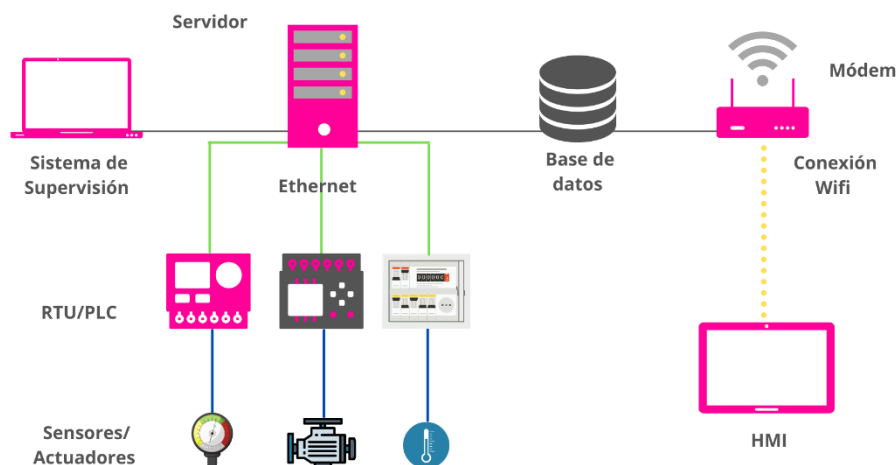


Imagen 4: Diagrama de funcionamiento de un sistema SCADA.²⁴

En la planta de envasado de la cervecería peruana Backus & Johnston, según la tesis de Gonzalo Cuba, el proceso de registro de detenciones implicaba que los operadores de cada máquina registraran manualmente los eventos en una hoja física. Estas hojas detallaban motivos de parada, frecuencia de ocurrencia, duración, horario y la máquina afectada. Posteriormente, se trasladaban estos registros a una plantilla Excel para realizar análisis estadísticos de la planta. La problemática residía en que, aunque la información registrada era detallada, con el tiempo se veía afectada por el estado de ánimo de los operarios y la limitación de tiempo que tenían debido a otras responsabilidades, lo que llevó a que la información de los registros fuese deficiente a largo plazo. Dentro de los problemas que se encontraron, se menciona (Cuba 2020)²⁵:

- Los operarios utilizaban códigos de paradas genéricos como un comodín cuando desconocían la duración específica de la parada.
- Se registraban eventos duplicados entre máquinas consecutivas, lo que generaba un tiempo doble.

²³ Pérez-López, *Los sistemas SCADA en la automatización industria* (Tecnología en Marcha, 2013), 7.

²⁴ Fuente: Nunsys, 2023, página web: <https://www.nunsys.com/scada/>

²⁵ Cuba, *Registro automático de detenciones* (UNSA, 2020), 46-49.

- La frecuencia real de paradas no coincidía con la reportada, ya que ocurrían más paradas de las registradas.
- En algunos turnos de producción, los reportes manuales no se registraban debido al desconocimiento o desinterés por parte de los operarios.

Para abordar esta problemática, se propuso la implementación del software WinCC Explorer de Siemens para establecer un sistema de detección de detenciones en la planta operativa mediante sensores de los equipos, utilizando una plataforma SCADA. Según Cuba, el enfoque del proyecto estaba en reducir el tiempo de recolección de la información del proceso, realizándolo de manera automática y confiable. Los resultados incluyeron la integración de 414 tags (señales de sensores), 27 pantallas de dashboard con métricas y gráficas pertinentes para el control y gestión de las operaciones, así como la inserción de 126 tipos de detención en el sistema. Además, se destacó que la información generada por este sistema era fiel y detallada, a diferencia de la información manual generada por los operarios y posteriormente ingresada a Excel, que no era totalmente fidedigna (Cuba 2020)²⁶.

Sistema de registro de datos vía identificación por radiofrecuencia

El sistema de registro de datos mediante identificación por radiofrecuencia (RFID) utiliza un microcontrolador integrado en los equipos del proceso para registrar y almacenar continuamente información sobre su estado. Este método facilita la transmisión de datos, incluyendo la fecha, hora, y código identificador del equipo en cuestión. Además, se puede generar informes utilizando Visual Basic en formato Excel, según se describe en un artículo del Tecnológico Nacional de México (Magos, Godínez y Rodríguez 2016)²⁷

La interconexión de dos de los sistemas más empleados para la identificación de objetos, con equipos de control y monitoreo de procesos, tales como: Controladores Lógicos programables, Controles de Propósito Específico, Interfaces Hombre-Máquina y Control por Computadora, abre la posibilidad de llevar la automatización de procesos industriales a niveles de versatilidad que anteriormente no podían ser considerados (Magos, Godínez y Rodríguez 2016)²⁸.

²⁶ Cuba, *Registro automático de detenciones* (UNSA, 2020), 87-117.

²⁷ Rivera, Godínez, y Bravo, *Sistema de registro de datos vía RFID* (Pistas Educativas, 2016), 1367.

²⁸ Rivera, Godínez, y Bravo, *Sistema de registro de datos vía RFID* (Pistas Educativas, 2016), 1371-1372.

Una vez que el lector RFID identifica la señal de un equipo, puede transmitir la información a una computadora, donde se almacenan los registros. Estos registros pueden descargarse o enviarse a otros equipos según sea necesario. A continuación, se presenta una imagen que ilustra los informes disponibles gracias al sistema RFID:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Registro de Datos Vía RFID - CB							
2	CÓDIGO	Tiempo			Fecha			
3	RFID - CB	Hora	Minutos	Segundos	Día Semana	Día	Mes	Año
4	A09071401D1C	15	46	32	Martes	12	Agosto	2014
5	A09071403637	15	46	35	Martes	12	Agosto	2014
6	A09071403130	15	46	38	Martes	12	Agosto	2014
7	A09071403130	15	46	42	Martes	12	Agosto	2014
8	A09071403637	15	46	45	Martes	12	Agosto	2014
9	A09071401D1C	15	46	48	Martes	12	Agosto	2014
10	A09071403130	15	46	50	Martes	12	Agosto	2014
11	A09071403637	15	46	53	Martes	12	Agosto	2014
12	A09071401D1C	15	46	56	Martes	12	Agosto	2014
13	A09071403637	15	47	0	Martes	12	Agosto	2014
14	A09071403130	15	47	2	Martes	12	Agosto	2014
15	A09071403637	15	47	5	Martes	12	Agosto	2014
16	A09071401D1C	15	47	7	Martes	12	Agosto	2014
17	A09071401D1C	15	47	10	Martes	12	Agosto	2014
18	A09071401D1C	15	47	13	Martes	12	Agosto	2014
19								
20								

Imagen 5: Reporte generado por un sistema RFID. (Magos, Godínez y Rodríguez 2016)²⁹

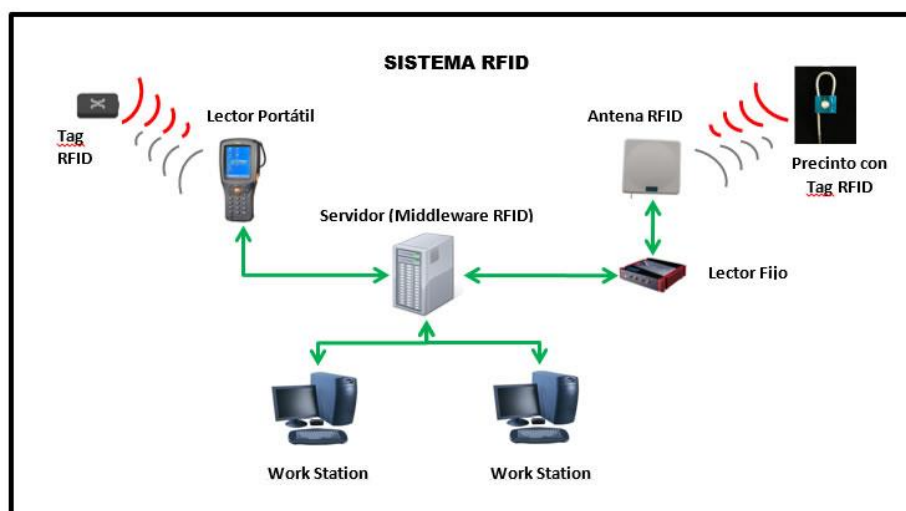


Imagen 6: Funcionamiento general de los sistemas RFID.³⁰

Un ejemplo de aplicación exitosa del sistema RFID se encuentra en el artículo "Smart Markets Integrated with RFID, Computer, Vision, Sensor Data Fusion", que destaca la tienda

²⁹ Fuente: Rivera, Godínez, y Bravo, *Sistema de registro de datos vía RFID* (Pistas Educativas, 2016), 1378.

³⁰ Fuente: DYMSOLPERÚ, página web: <https://www.dymsolperu.com/es/page/aplicaciones-rfid-y-barcode>

inteligente Amazon Go. En estas tiendas, no hay vendedores ni cajeros; los clientes entran, toman los productos y se retiran. El único requisito es tener la aplicación de Amazon Go descargada ya que los productos cuentan con microchips RFID que emiten señales de radiofrecuencia que son detectadas por antenas en el techo de la tienda. Este enfoque no solo permite rastrear la ubicación de los productos, sino también generar registros como la boleta electrónica que se envía a la aplicación del cliente y registros internos para el control y gestión de la tienda (Shrivastava 2022)³¹.

Sistema de registro de detenciones en planta concentradora

La tesis de Alexander Chacón abordó las problemáticas encontradas en la planta concentradora de la mina Sociedad Minera Cerro Verde (SMCV). Estas incluían discrepancias entre el nivel de producción y el tiempo disponible de los activos, baja disponibilidad de los equipos en el área de planta, y falta de precisión en los tiempos de duración de los eventos. (Chacón 2013)³²

El análisis de las causas reveló problemas como la mala calidad de la información registrada, la falta de manejo por parte de los operadores de las métricas de desempeño, y la ausencia de documentación y definición del proceso de monitoreo y registro de detenciones. Como solución, se consideró la implementación del sistema de monitoreo y registro ProcessMORE (Process Miss Opportunity Report). Esta aplicación permite la captura automática de detenciones de equipos al ingresar una lista de TAGs (sensores) que describen la relación lógico-funcional entre las máquinas del proceso (Chacón 2013)³³.

Chacón destaca la importancia de comprender los enclavamientos y cómo el cambio de valor de un TAG conduce a que el sistema tome una acción y modifique el valor de otro TAG para configurar adecuadamente ProcessMORE. Como resultado de esta implementación, se logró una recopilación y clasificación automática de casi el 100% de las detenciones de equipos entre los años 2013 y 2015 (Chacón 2013)³⁴.

³¹ Shrivastava, *Smart Markets Integrated with RFID (iJRASTED, 2022)*, 4489-4492.

³² Chacón, *Implementación del Sistema de Registro de Detenciones (UNAS, 2013)*, 2.

³³ Chacón, *Implementación del Sistema de Registro de Detenciones (UNAS, 2013)*, 2 y 21.

³⁴ Chacón, *Implementación del Sistema de Registro de Detenciones (UNAS, 2013)*, 34 y 85.

Soluciones

Reducción de catálogo de modos de detención

Se propone simplificar el catálogo de modos de detención en la planta de cátodos, abarcando tanto Área seca y Ripios como el Área húmeda. El objetivo es retener únicamente aquellos modos de falla que realmente se manifiestan, facilitando así la clasificación de detenciones al reducir las opciones disponibles.

Para lograr esto, se lleva a cabo un análisis estadístico que considera la frecuencia de ocurrencia de los modos de detención, las detenciones de equipos y las duraciones de estas en los últimos meses. Este análisis busca determinar la probabilidad de aparición de un modo de falla específico y la probabilidad de que un equipo experimente una detención. El objetivo es reducir el catálogo a aquellos modos con una probabilidad significativa de ocurrencia, eliminando aquellos tipos de falla con una probabilidad nula o cercana a cero según la información histórica recopilada.

Esta solución aborda directamente una de las causas identificadas en la arista de máquinas, que involucra al software Rmes Suite. Se destaca que el extenso catálogo de posibles detenciones dificulta la elección de estas para los operadores de CIO BHP. La complejidad radica en la gran cantidad de modos de falla disponibles, lo que prolonga el tiempo necesario para la clasificación, con un promedio de 1,5 minutos cada una. La propuesta de reducir el catálogo de modos de falla, focalizándose en aquellos más frecuentes y en los equipos más relevantes, tiene el potencial de agilizar significativamente el proceso de clasificación para los operadores de CIO BHP.

Automatización de imputaciones

Dentro de las detenciones en la planta de cátodos, se observa que ciertos modos de detención son más frecuentes que otros. Además, dentro de cada modo de falla, ciertos equipos destacan al contribuir significativamente a estas detenciones. Estos equipos son candidatos ideales para la automatización de la clasificación de sus eventos.

La viabilidad de esta automatización se basa en la diversidad de señales Run/Stop, ya que no siempre se generan a partir de un solo sensor. Algunos equipos cuentan con múltiples sensores o TAGs que pueden medir variables como temperatura, peso, presión, voltaje, caudal,

entre otros. Esto permite identificar combinaciones específicas de señales de los sensores que siempre están asociadas al mismo tipo de detención. Por lo tanto, es factible implementar una imputación automática para estos equipos cada vez que se detecte esa determinada combinación de valores en los Tags.

La solución propuesta está estrechamente relacionada con varios aspectos presentados en el estado del arte. En primer lugar, se vincula con los sistemas RFID, ya que estos posibilitan el registro automático de datos mediante lógicas preprogramadas, como en el caso de la combinación de mediciones de los TAGs. Esta implementación permitiría automatizar las imputaciones que actualmente se realizan de manera manual, siguiendo un enfoque similar al utilizado en las compras y boletas generadas en las tiendas Amazon Go. También aborda directamente la causa subyacente del problema, que implica que el proceso se lleva a cabo de manera manual y consume un tiempo valioso de los operadores de CIO. Al proponer la automatización de parte de este proceso, se ofrece la oportunidad de liberar recursos en términos de horas hombre.

La solución propuesta también incorpora aspectos de los sistemas de software SCADA, que delegan la gestión de operaciones a aplicativos, dejando al ser humano en un rol de supervisión. En este contexto, se facilita la automatización de tareas que antes requerían intervención humana, como la clasificación de detenciones. Situaciones análogas se han observado en el estado del arte en la cervecería Backus & Johnston, donde se logró integrar 414 TAGs y 126 tipos de detenciones para obtener un registro de fallas más confiable. También se destaca la implementación de ProcessMORe en la planta concentradora de SMCV, que alcanzó niveles de imputación cercanos al 100% gracias a la captura automática de detenciones mediante TAGs. Es relevante destacar que la solución propuesta no es un software per se, pero sí permite la incorporación de aspectos de los métodos de control SCADA a Rmes Suite y Datafillweb. Esto refleja la adaptabilidad de la propuesta para aprovechar las sinergias entre la automatización de tareas y el monitoreo supervisado, características fundamentales de los sistemas SCADA.

Filtro de tiempo para detenciones

En Spence existe variabilidad considerable en la duración de las detenciones, algunas son tan breves como 1 minuto, mientras que otras se extienden hasta las 12 horas, sobrepasando el límite de un turno y afectando al siguiente. Para gestionar esta variabilidad, se propone un filtro de tiempo que establece un límite mínimo de duración para que una detención sea imputada. Aquellas detenciones que no alcancen este límite serán omitidas.

Según el libro *"Ingeniería de la confiabilidad"*, la confiabilidad de los activos se relaciona con estrategias de operaciones y mantenimiento para aumentar el tiempo entre detenciones de los equipos y su impacto en el sistema a lo largo del ciclo de vida de los equipos e instalaciones. Es relevante contar con datos históricos para calcular la probabilidad de detección de las máquinas, ya sea por causas operativas o de mantenimiento, como base para desarrollar estrategias efectivas (Arata Andreani y Arata Bozzolo 2013)³⁵. Por lo tanto, omitir detenciones basadas únicamente en su duración podría limitar la disponibilidad de datos históricos ricos y completos necesarios para prever los ciclos de vida de los activos. Por esta razón, el filtro se aplicará exclusivamente a aquellos equipos que no tengan un impacto directo en las operaciones.

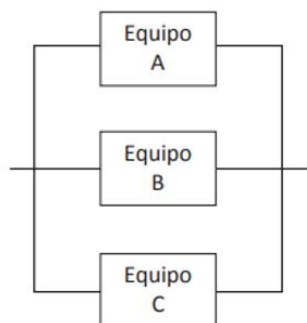


Imagen 7: Diagrama de 3 equipos en paralelo y en redundancia parcial.³⁶

Si los equipos A, B y C están en paralelo, cada uno con una capacidad del 40%, la capacidad total de la línea es del 120%, lo que indica una redundancia parcial. Si uno de los equipos falla, la línea sigue operativa pero no al 100%. En este caso la línea funcionaría al 80% de su capacidad. Si el equipo A falla durante 1 hora, la pérdida productiva no sería de 1 hora completa, sino del 20% de ese tiempo, es decir, 12 minutos. Por lo tanto, al aplicar un filtro de

³⁵ Arata y Arata, Ingeniería de la confiabilidad (RIL Editores, 2013), 57.

³⁶ Fuente: Arata y Arata, Ingeniería de la confiabilidad (RIL Editores, 2013), 115.

tiempo sobre aquellos equipos con un impacto productivo parcial, no se afecta significativamente la precisión de los cálculos de tiempo en Rmes³⁷.

Esta solución se inspira en las prácticas identificadas en el estado del arte en las minas de AMSA, donde se emplean filtros de tiempo en el proceso de imputación. Aborda las causas en el ámbito de los métodos ya que un filtro proporciona una mayor estandarización al definir qué paradas deben clasificarse y cuáles no. Además, se alinea con la tecnología, dado que será implementado de manera automática por Datafillweb. Esto contribuye a la automatización y mejora del proceso.

Autocompletado de detenciones

Los equipos de la planta se encuentran diagramados en un DLF donde los activos pueden agruparse en diversas configuraciones como en línea, paralelo, fraccionamiento, redundancia y standby. Es posible establecer lógicas pre programables que permitan que cuando se realice una imputación, esta pueda extenderse automáticamente a los equipos relacionados, ya sea aguas arriba o aguas abajo en el DLF.

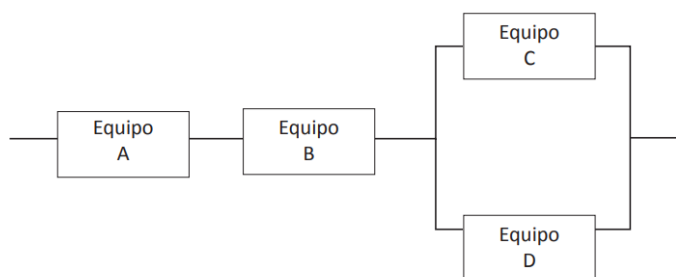


Imagen 8: Diagrama de ejemplificación de configuraciones.³⁸

Si se detiene el equipo B es posible imputar automáticamente una detención para los equipos C y D. De modo que a raíz de una imputación manual se puede autocompletar la de otros equipos.

Esta solución se relaciona con sistemas SCADA y la tesis sobre la planta concentradora de la mina SMVC. La integración de TAGs y la comprensión de sus relaciones lógicas permite

³⁷ Para obtener una comprensión más detallada de las configuraciones posibles de los equipos revisar el anexo [2].

³⁸ Fuente: Arata y Arata, Ingeniería de la confiabilidad (RIL Editores, 2013), 113.

clasificaciones automáticas. Esto se vincula con la causa, en métodos, referente a la tecnología utilizada, ya que la automatización mejora y agiliza el proceso.

Selección de soluciones

Para la selección de la solución a implementar se utilizará una matriz de selección/decisión considerando las variables más relevantes para este proyecto junto con su respectiva ponderación.

Variable	Ponderación
Tiempo de desarrollo e implementación	20%
Coste económico	10%
Potenciales beneficios	35%
Grado de automatización	35%
Total	100%

Tabla 8: Ponderación de las distintas variables para escoger soluciones.³⁹

Por conveniencia, las soluciones antes propuestas se les asignan los siguientes números:

Solución	Número
Reducción de catálogo de modos de detención	1
Automatización de imputaciones	2
Filtro de tiempo para detenciones	3
Autocompletado de detenciones	4

Tabla 9: Números asignados a cada solución propuesta.⁴⁰

Tiempo de desarrollo e implementación

Se utilizará una estimación basada en las etapas típicas de un proyecto en Rmes. La siguiente tabla brinda una aproximación de las horas requeridas para cada solución:

³⁹ Fuente: Elaboración propia.

⁴⁰ Fuente: Elaboración propia.

Solución	Número	Horas requeridas
Reducción de catálogo de modos de detención	1	238
Automatización de imputaciones	2	324
Filtro de tiempo para detenciones	3	252
Autocompletado de detenciones	4	324

Tabla 10: Horas requeridas para el desarrollo e implementación de cada solución.⁴¹

Las soluciones con mayor carga horaria son la "automatización de imputaciones" (2) y el "autocompletado de detenciones" (4), ambas con 324 horas estimadas. En segundo lugar, está el "filtro de tiempo para detenciones" (3) con 252 horas, y en cuarto lugar, la "reducción de catálogo de modos de falla" (1) con 238 horas proyectadas.

Coste económico

El costo económico de las soluciones se calcula considerando las horas necesarias para su desarrollo e implementación, ponderadas por el salario de cada participante del proyecto. Se consultó con los departamentos de CS y Proyectos para determinar el personal necesario para llevar a cabo las soluciones y su grado de participación. Además, se realizó una estimación de los salarios.

Solución	Costo [CLP]
Reducción de catálogo de modos de detención	\$ 15.205.556
Automatización de imputaciones	\$ 20.700.000
Filtro de tiempo para detenciones	\$ 16.100.000
Autocompletado de detenciones	\$ 20.700.000

Tabla 11: Costo de desarrollo e implementación de las soluciones.⁴²

Según la tabla, las soluciones "Automatización de Imputaciones" (2) y "Autocompletado de Detenciones" (4) son las más costosas, con un valor de \$20.700.000 CLP. En segundo lugar, se encuentra "Filtro de Tiempo para Detenciones" (3) con \$16.100.000 CLP mientras que la más económica es "Reducción de Catálogo de Modos de Falla" (1) con \$15.205.556 CLP.

⁴¹ Fuente: Elaboración propia. Para mayor detalle de cómo se llegó estos tiempos de desarrollo e implementación revisar anexo [3].

⁴² Fuente: Elaboración propia. Para mayor detalle del desglose de costos revisar anexo [4].

Potenciales beneficios

Reducir el catálogo de modos de detención es una opción viable para simplificar y acelerar el proceso, eliminando la cantidad de opciones para el imputador de CIO BHP al clasificar eventos. Sin embargo, es una solución a corto plazo debido a la dinámica constante de las plantas mineras. Los cambios en la configuración de equipos, prioridades en los métodos de obtención de cobre, recambios de equipos y expansiones de mina generan modificaciones frecuentes en el DLF de la planta de cátodos. Esto resulta en un crecimiento constante del catálogo de modos de falla a largo plazo, volviendo al problema original. El beneficio potencial de esta solución se considera bajo.

La automatización de imputaciones ofrece la oportunidad de realizar clasificaciones de forma automática y así el proceso toma menos tiempo. No obstante, al igual que la solución anterior, está condicionada por cambios en el DLF, lo que requiere actualizaciones constantes en las combinaciones de TAGs para mantener la automatización. Beneficio potencial: Alto.

El filtro de tiempo elimina detenciones pequeñas que solo tienen un impacto parcial en el proceso. Es una oportunidad para reducir la cantidad de clasificaciones que CIO debe realizar. Sin embargo, al eliminar eventos, pueden surgir discrepancias entre los tiempos productivos calculados y la producción real. Potencial beneficio: Medio alto.

El autocompletado de detenciones, al igual que la automatización, es una excelente oportunidad para agilizar el proceso y liberar tiempo para los operadores CIO. Sin embargo, requiere actualizaciones de las lógicas preprogramadas conforme cambie el DLF y la Planta de Cátodos. Potencial beneficio: Alto.

Grado de automatización

La solución de reducción del catálogo de modos de detención carece de automatización, siendo una mejora a corto plazo con la necesidad de actualizaciones manuales constantes en el tiempo. Grado de automatización: Nulo.

Por otro lado, la automatización de imputaciones alcanza un grado total de automatización, eliminando la intervención humana en el proceso de clasificación de eventos. Grado de automatización: Total.

En el caso del filtro de tiempo de detenciones, existe un pequeño grado de automatización al permitir filtrar detenciones menores a un valor predefinido, aunque su configuración y modificaciones requieren intervención manual. Grado de automatización: Bajo.

La solución de autocompletado de detenciones posee un alto grado de automatización, permitiendo la expansión automática de imputaciones a equipos cercanos y relacionados a partir de una imputación manual. Es importante destacar que se requiere de una clasificación inicial que de origen a la expansión. Grado de automatización: Alto.

Matriz de decisión

Se realiza una matriz de decisión utilizando una escala de Likert del 1 al 7, donde 1 indica el peor rendimiento y 7 el mejor.

Solución	Tiempo de desarrollo e implementación (20%)	Coste económico (10%)	Potenciales beneficios (35%)	Grado de automatización (35%)	Ponderación final
1	6	6	3	1	3,2
2	4	4	6	7	5,75
3	5	5	5	4	4,65
4	4	4	6	6	5,4

Tabla 12: Matriz de decisión de las soluciones.⁴³

La matriz indica que la solución mejor ponderada es la automatización de imputaciones (2) con 5,75. No obstante, se considerarán también las soluciones de autocompletado de detenciones (4) y filtro de tiempo para detenciones (3), con puntajes de 5.4 y 4.65 respectivamente, ya que también se alinean con los objetivos del proyecto.

⁴³ Fuente: Elaboración propia.

Metodología

Se utiliza la metodología DMAIC para conseguir de forma exitosa el objetivo general y los objetivos específicos de este proyecto. “D” corresponde a definir claramente el problema y las oportunidades, “M” es medir las variables críticas del proceso y la correcta recopilación de datos, “A” implica el análisis estadístico de los datos recogidos para proponer soluciones y mejoras al problema, “I” es el desarrollo de estas mejoras, mientras que “C” es el control y seguimiento de las soluciones implementadas (Dropbox 2023)⁴⁴.

La metodología general del proyecto se estructura de la siguiente manera:

- Identificación clara de la problemática, objetivos y métricas para medir el éxito del proyecto.
- Recopilación de datos históricos para obtener una comprensión actual de la planta de cátodos. Se medirán modos de falla principales, equipos y tiempos del proceso.
- Análisis estadístico de la data y configuraciones lógicas de la planta para identificar posibles soluciones y equipos candidatos.
- Desarrollo de las soluciones identificadas, integrándolas a Rmes Suite en colaboración con el equipo de desarrolladores. Definición clara de sus funcionalidades mínimas.
- Control y monitoreo de los resultados generados por las mejoras implementadas.

La implementación de las tres soluciones seleccionadas para este proyecto se basará en una combinación de las metodologías DMAIC y la metodología utilizada en Rmes para implementar mejoras, nuevos módulos o actualizaciones en su software. En Rmes, se aplican conceptos de la metodología en cascada para el desarrollo de software, que incluye pasos como definición de requisitos, diseño, implementación (codificación), integración, verificación o prueba, instalación y mantenimiento (Hadida y Troilo 2020)⁴⁵.

⁴⁴ Dropbox, *¿Qué es la metodología DMAIC?*, Página web: <https://experience.dropbox.com/es-la/resources/dmaic>

⁴⁵ Hadida y Troilo, *La agilidad en las organizaciones* (UCEMA, 2020), 4.

La implementación de cada solución se llevará a cabo mediante los siguientes pasos:

- Establecer las funciones principales para cada solución propuesta.
- Definición de los equipos y módulos que serán modificados y/o creados para la implementación de las soluciones.
- Definición de los TAGs que serán relevantes para la solución de automatización de imputaciones.
- Diseño de las funcionalidades que debe cumplir cada módulo de mejora. Botones en la interfaz de usuario, unidades de tiempo, y sus funciones.
- Diseño de los módulos dentro del aplicativo. Ubicación de los módulos, ubicación de los botones, y la interfaz con el usuario.
- Desarrollo e implementación junto con el equipo de desarrolladores de software de Rmes para integrar las mejoras a Rmes Suite y Datafillweb. Esta etapa hace referencia a la codificación necesaria.
- Despliegue de los módulos (soluciones) en ambiente QA (Quality Assurance) de Rmes. QA es un ambiente de Rmes Suite y Datafillweb para realizar pruebas a nuevas funcionalidades sin afectar al aplicativo que se utiliza productivamente.
- UAT (User Acceptance Testing). Operadores de CIO BHP deben evaluar los módulos y soluciones implementadas.
- Revisión de observaciones. Con el equipo de desarrolladores se debe solucionar todos los problemas identificados por CIO.
- Despliegue de módulos y soluciones en ambiente productivo.
- UAT productivo.

- Análisis de resultados de las soluciones.
- Control y seguimiento del porcentaje de imputación y el óptimo funcionamiento de los módulos implementados.

Impacto sobre el porcentaje de imputación

La solución de automatización de imputaciones tiene un impacto directo en el porcentaje de imputación de la planta de cátodos. Su aporte se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$AI = \sum_i^n \sum_j^m \frac{E_{i,j}}{D}$$

Donde:

- AI = porcentaje de automatización de imputaciones.
- D = número de detenciones que se tiene en un periodo de tiempo.
- $E_{i,j}$ = número de detenciones con modo de falla i causadas por el equipo j.
- i = modos de falla posibles = {1,2,3...,n}.
- j = equipos distintos posibles = {1,2,3...,m}.

El filtro de tiempo para detenciones no tiene un impacto directo como el caso anterior. Si se considera un turno de trabajo con 500 detenciones y un tiempo promedio de 1,5 minutos por evento, el tiempo necesario para clasificar estas detenciones es de 750 minutos (12,5 horas). Si con el filtro se logra omitir 100 eventos, solo se deben imputar 400 y por tanto existe un ahorro de tiempo de 150 minutos (2,5 horas). Se espera que esta mejora provoque indirectamente un impacto “ε” en el porcentaje de imputación.

El impacto del autocompletado de detenciones tiene un impacto directo sobre el porcentaje de imputación y se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$CD = \sum_k^p \sum_j^m \frac{F_{j,k} \cdot N_k}{D}$$

Donde:

- CD = porcentaje de imputaciones con autocompletado de detenciones.
- D = número de detenciones que se tiene en un periodo de tiempo.

- N_k = número de equipos en la línea k.
- $F_{j,k}$ = número de fallas del equipo j perteneciente a la línea k.
- j = equipos distintos posibles = {1,2,3...,m}.
- k = líneas de equipos posibles = {1,2,3...,k}.

Si se quiere calcular el impacto total de las soluciones implementadas sobre el porcentaje de imputación, la fórmula es la siguiente:

$$Impacto = \sum_i^n \sum_j^m \frac{E_{i,j}}{D} + \sum_k^p \sum_j^m \frac{F_{j,k} \cdot N_k}{D} + \varepsilon$$

Evaluación económica

La inversión total necesaria para desarrollar e implementar las soluciones de este proyecto se muestran en la siguiente tabla:

Solución	Costo [CLP]
Automatización de imputaciones	\$ 20.700.000
Filtro de tiempo para detenciones	\$ 16.100.000
Autocompletado de detenciones	\$ 20.700.000
Total	\$ 57.500.000

Tabla 13: Costos por solución y totales del proyecto.⁴⁶

Aunque este proyecto no genera ingresos monetarios directos, tiene un impacto en un factor de gran importancia para Rmes: la probabilidad de renovación de la suscripción de los clientes. El objetivo no es solo retener a los clientes, sino también fomentar que, al renovar, adquieran más módulos del aplicativo, generando así mayores ingresos para la empresa. Dado que los contratos con los clientes son anuales, se plantean tres posibles escenarios para el año 2024: renovación del mismo contrato del año 2023 (situación más probable), renovación con la inclusión de más servicios (situación optimista) o la decisión de no renovar (situación pesimista).

Se asignaron probabilidades a cada una de estas situaciones, y estas varían según si el proyecto se lleva a cabo con éxito o no. Se recurrió al equipo de CS a modo de criterio experto para determinar las probabilidades actuales de estos tres escenarios y cómo estas cambiarían con la implementación del proyecto.

⁴⁶ Fuente: Elaboración propia.

Situación	Probabilidades	
	Sin proyecto	Con proyecto
Pesimista	25%	5%
Más probable	70%	60%
Optimista	5%	35%

Tabla 14: Escenarios y sus probabilidades con y sin proyecto.⁴⁷

En la tabla, se observa que actualmente las probabilidades de que BHP Spence renueve la misma suscripción que tiene actualmente son del 70%. Sin embargo, al realizar exitosamente este proyecto es posible reducir la probabilidad de no renovación del 25% al 5%, mientras que la probabilidad de renovar un servicio con más módulos aumenta del 5% al 35%. El ingreso monetario que implica para Rmes cada una de las situaciones anteriores se muestra en la siguiente tabla:

Situación de la suscripción	Valor [CLP]
Actual	\$ 100.000.000
Mejorada	\$ 140.000.000
No renuevan	\$ -

Tabla 15: Ingresos de Rmes ante distintas situaciones de la suscripción.⁴⁸

Si se consideran los valores anteriores como los posibles flujos de dinero para el 2024, el valor medio de cada flujo j en cada periodo t y su VAN (considerando que el banco central actualmente tiene una tasa de interés de un 9%) estarán dados por:

$$\bar{A}_t = \sum_{j=1}^k \mathbb{P}_{t,j} \cdot A_{t,j} \quad E(VAN) = \sum_{t=0}^n \frac{\bar{A}}{(1 + \bar{i})^t} - I$$

- Sin proyecto:

$$\bar{A} = (0,25 \cdot 0 \text{ M}) + (0,7 \cdot 100 \text{ M}) + (0,05 \cdot 140 \text{ M}) = 77 \text{ M}$$

$$E(VAN) = \frac{77 \text{ M}}{(1 + 0,09)} - 57,5 \text{ M} = 13,14 \text{ M}$$

⁴⁷ Fuente: Elaboración propia.

⁴⁸ Fuente: Elaboración propia.

- Con proyecto:

$$\bar{A} = (0,05 \cdot 0 \text{ M}) + (0,6 \cdot 100 \text{ M}) + (0,35 \cdot 140 \text{ M}) = 109 \text{ M}$$

$$E(VAN) = \frac{109 \text{ M}}{(1 + 0,09)} - 57,5 \text{ M} = 42,5 \text{ M}$$

Con lo anterior se puede calcular la diferencia entre el VAN con proyecto y el VAN sin proyecto para obtener la rentabilidad real:

$$\Delta VAN = 42,5 \text{ M} - 13,14 \text{ M} = 29,36 \text{ M}$$

Este proyecto es rentable, entregando beneficios esperados de 29.360.000 CLP. Otros indicadores financieros relevantes para un proyecto son la TIR y el payback, en la siguiente tabla se muestra el valor de estos para este proyecto:

Indicador	Valor
TIR	89,57%
Payback	0,53 [Años]

Tabla 16: TIR y Payback esperados del proyecto.⁴⁹

Una TIR del 89,57% indica que el proyecto tiene el potencial de generar rendimientos significativos, ya que supera la tasa de descuento de 9%, es decir, sobrepasa el costo de oportunidad considerado. Además, un período de recuperación (Payback) de 0,53 años sugiere que el tiempo necesario para recuperar la inversión es de aproximadamente medio año, lo que significa una rápida recuperación de los recursos invertidos en este proyecto.

⁴⁹ Fuente: Elaboración propia

Análisis de riesgos

Para evaluar los riesgos de este proyecto se utiliza como herramienta una matriz de riesgos que consta de dos variables, la probabilidad de ocurrencia y la severidad de los riesgos identificados. Los resultados se agrupan en 3 categorías en base a la multiplicación de las dos variables anteriores.

Probabilidad/Severidad	Insignificante 1	Menor 2	Significativo 3	Grave 2	Severo 1
Muy alta 5	5	10	15	15	25
Alta 4	4	8	12	16	20
Media 3	3	6	9	12	15
Baja 2	2	4	6	8	10
Muy baja 1	1	2	3	4	5

Tabla 17: Matriz de riesgos.⁵⁰

Probabilidad x Severidad	Riesgo
13-25	Alto
7-12	Medio
7-6	Bajo

Tabla 18: Riesgo según resultado Probabilidad x Severidad.⁵¹

A continuación se muestran los riesgos de las soluciones elegidas junto con sus impactos y medidas de mitigación:

⁵⁰ Fuente: Elaboración propia.

⁵¹ Fuente: Elaboración propia.

Riesgo	Probabilidad	Severidad	Impacto	Mitigación
Sensores se descalibran y envían señales erróneas activando la imputación automática	4	5	20	BHP debe definir y realizar revisiones periódicas del estado de sus sensores
Cambios en el DLF que afectan las lógicas de autocompletado de detenciones	3	3	9	Exigir como protocolo Rmes que cada vez que ocurra un cambio en el DLF se revise si esto afecta las lógicas de autocompletado
Cambios en el DLF que afectan la selección de equipos con impacto parcial en el filtro de tiempo para detenciones	3	4	12	Exigir como protocolo Rmes que cada vez que ocurra un cambio en el DLF se revise si esto afecta la configuración de los equipos con filtro de tiempo
Detenciones son doblemente imputadas. (de forma manual y mediante alguna de las mejoras)	2	5	10	Generar alarma de imputaciones duplicadas en Datafillweb

Tabla 19: Riesgos con impactos y medidas de mitigación.⁵²

⁵² Fuente: Elaboración propia.

Nuevo mapa del proceso

Encerrados en círculos rojos, se muestran los cambios en el mapa del proceso:

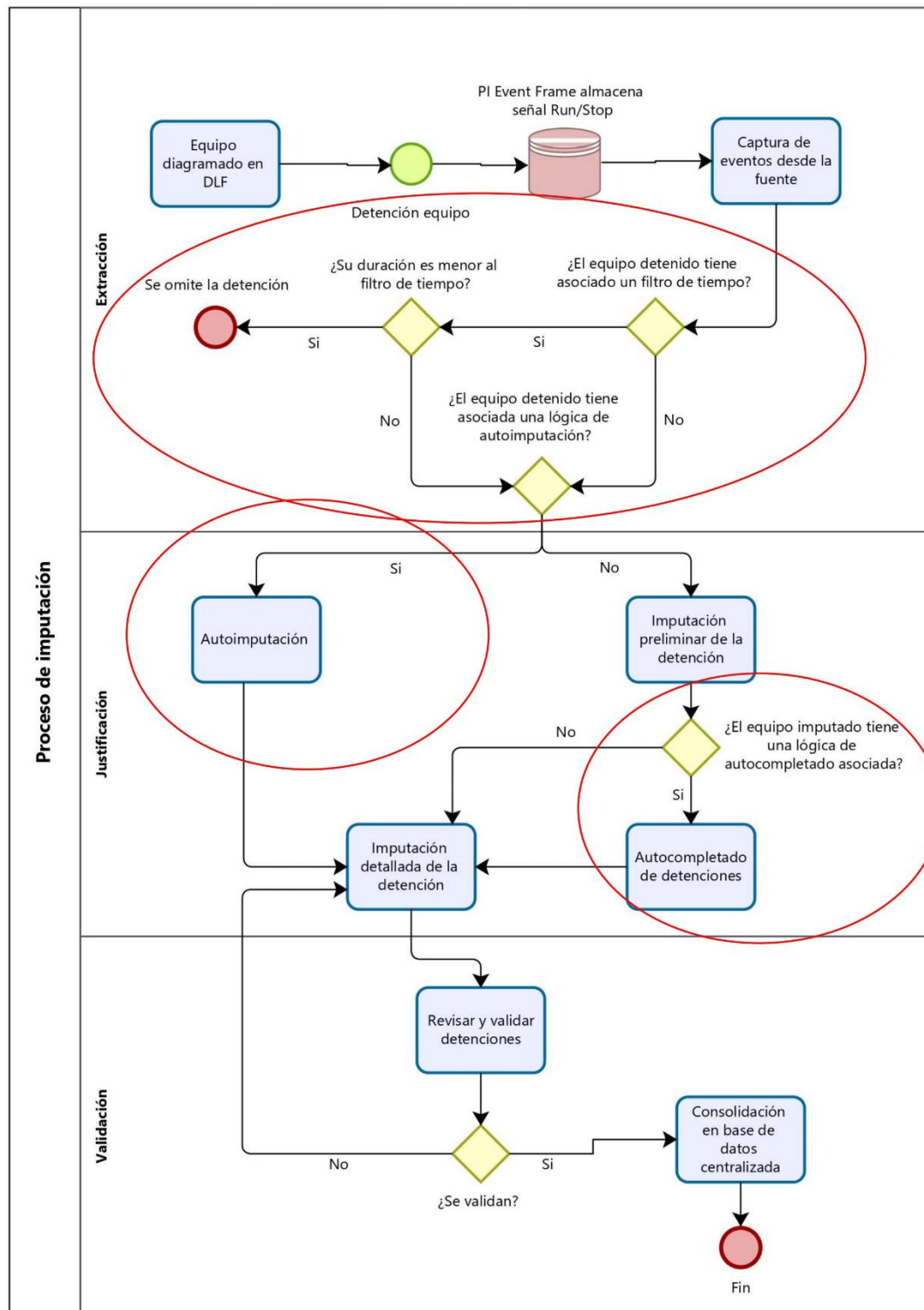


Diagrama 6: Mapa del nuevo proceso con las mejoras.⁵³

⁵³ Fuente: Elaboración propia. Diagrama realizado con herramienta Bizagi.

Plan de desarrollo e implementación

Paso 1: Identificación de los principales modos de falla y equipos responsables.

Se debe recurrir a la data histórica disponible para identificar los modos de falla con mayor frecuencia y los equipos que predominantemente causan eventos con esos modos. Se utilizarán herramientas como Excel, Python y RStudio.

Paso 2: Selección de equipos candidatos para la automatización de detenciones.

En base a la identificación anterior y un análisis estadístico de la data histórica se debe seleccionar equipos candidatos para aplicar la automatización de sus detenciones. Deben ser aquellos activos a los que se les pueda atribuir el mayor porcentaje de detenciones con estos modos de falla.

Paso 3: Análisis de TAGs de los equipos seleccionados

Una vez seleccionados los equipos, se debe analizar los distintos TAGs que tienen asociados y encontrar una combinación de sus valores que permita conocer con exactitud el modo de falla que está sucediendo. Con estos valores de los sensores se puede crear una lógica pre programable para automatizar la clasificación de estos equipos.

Paso 4: Análisis de la duración de los tiempos de detención de los equipos de la planta.

Se debe estudiar la duración de las detenciones históricas de los equipos. Con esto se espera encontrar patrones que puedan complementar la búsqueda de lógicas pre programables y además definir un valor para la solución de filtro de tiempo para las detenciones.

Paso 5: Análisis de DLF de planta de cátodos.

Se debe analizar la configuración de los distintos equipos de la Planta de Cátodos para entender cómo reaccionan las demás máquinas cercanas ante el paso de una de ellas de estado encendido a apagado. Así, es posible generar lógicas de autocompletado de detenciones.

Paso 6: Diseño de módulos dentro del aplicativo.

Se debe definir aspectos como qué funcionalidades tendrá, cuales de ellas serán modificables, las unidades de estos parámetros modificables, la ubicación de los módulos dentro del aplicativo, y la existencia de feedback visual de las acciones del usuario, entre otros.

Paso 7: Desarrollo de los módulos (codificación).

Junto con el equipo de desarrolladores se debe añadir el código necesario al software para poder crear los módulos de las soluciones a implementar.

Paso 8: Despliegue en QA.

Despliegue de estas funcionalidades en el ambiente de prueba de Rmes Suite y Datafillweb. Esto con la finalidad de testear si las soluciones funcionan correctamente o si existen errores en su funcionalidad.

Paso 9: UAT de QA.

Los operadores de CIO de BHP deben testear los nuevos módulos implementados, y realizar todas las observaciones que encuentren pertinentes.

Paso 10: Revisión de observaciones.

Se debe dar solución a los inconvenientes que se hayan encontrado en la prueba de usuario

Paso 11: Capacitación para el uso de módulos.

Es necesario capacitar tanto al personal de Rmes cómo a los operadores de CIO BHP en la utilización de los nuevos módulos de las soluciones implementadas.

Paso 12: Despliegue en productivo.

Una vez completados los pasos anteriores es posible desplegar los módulos en productivo para que puedan ser usados por los operarios de CIO BHP.

Paso 13: Análisis de resultados.

Se analizan los resultados de las mejoras implementadas sobre el porcentaje de imputación en la planta de cátodos. Así, es posible llegar a una conclusión de los impactos reales de este proyecto.

Desarrollo

Automatización de imputaciones

Se comenzó por identificar los modos de falla más relevantes en la planta de cátodos a través de un gráfico de Pareto.

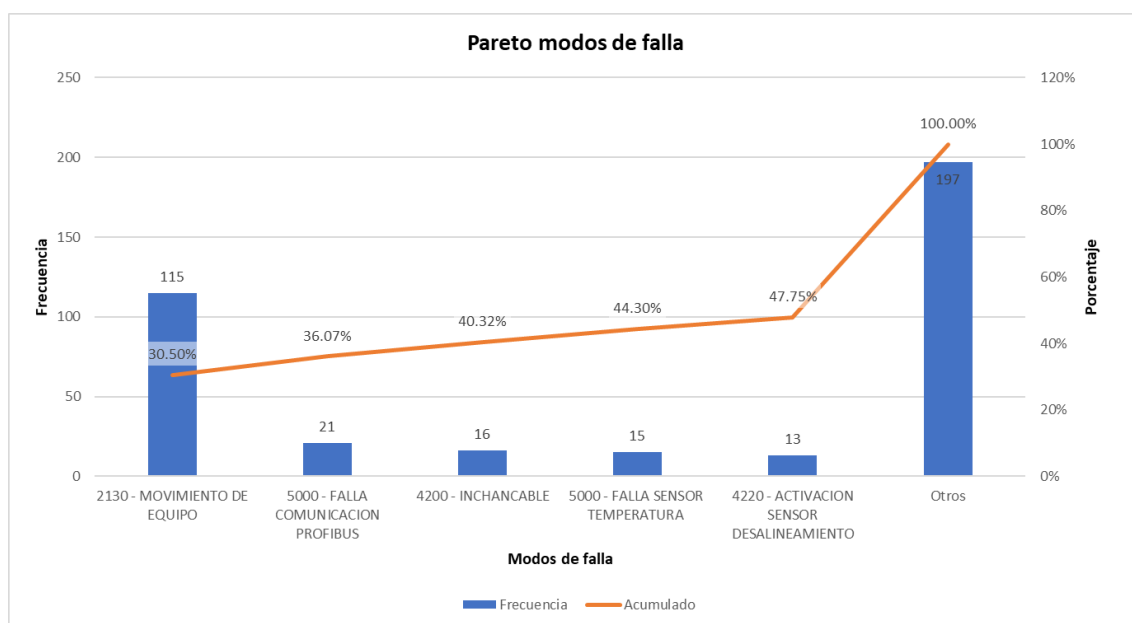


Gráfico 6: Pareto de principales modos de detención.⁵⁴

De la gráfica se observa que el principal modo de detención es "Movimiento de equipo" con un 30,5% de las imputaciones, además, supera con creces a los demás modos de falla. Entonces es relevante saber cuáles son los equipos que son responsables de este 30,5%.

⁵⁴ Fuente: Elaboración propia.

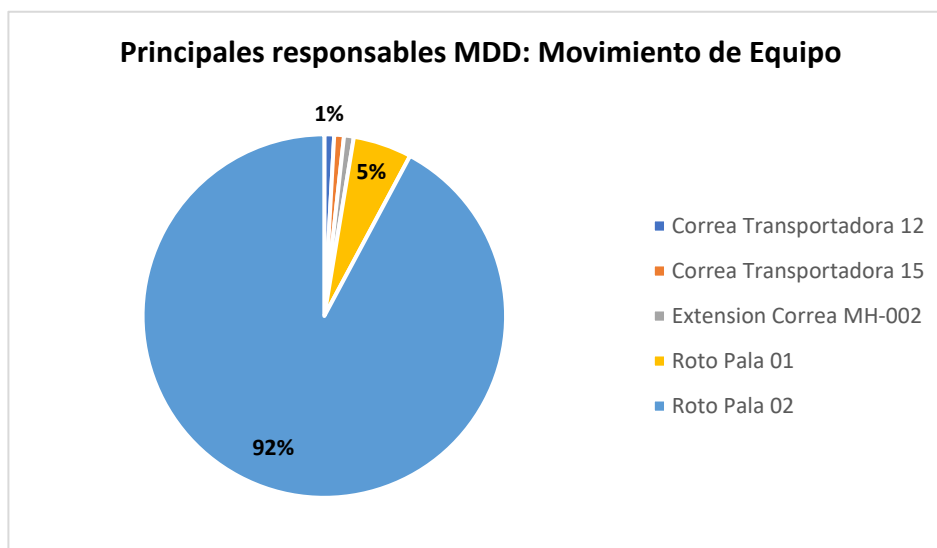


Gráfico 7: Porcentaje de equipos con MDD Movimiento de Equipo.⁵⁵

se observa que la Roto Pala 02 es responsable en un 92% de las detenciones con un modo de falla Movimiento de Equipo. Por tanto, este equipo es un candidato para generar una imputación automática si se encuentra una combinación adecuada de sus TAGs. Este análisis también es extensible a la Roto pala 01 ya que es el mismo equipo y fue el segundo mayor responsable. Se pidió a BHP un listado con todos los sensores que tiene la Roto Pala 02 dónde se encontraron 321 sensores distintos.

BHP		Planilla Listado de Tags MinAm RTDP	
Tag RTDP	Descripción		
SPC.SEC.41RC002-HUMEDAD-NIR.AUT	Medición de humedad en línea de material de ripio sobre correa corta de RC002	SERVIDOR_APILAMIENTO_RIPIOS:41RC	
SPC.SEC.RC002-51-CRAWLER-ANGLE-REL.AUT	Angulo relativo de orugas	SERVIDOR_APILAMIENTO_RIPIOS:RC00	
SPC.SEC.RC002-Altura-Rueda.AUT	RC002_Altura_Rueda	SERVIDOR_APILAMIENTO_RIPIOS:RC00	
SPC.SEC.RC002-Angulo-BWR-PV-Angulo-pluma.AUT	RC002_Angulo_BWR_PV_Angulo_pluma	SERVIDOR_APILAMIENTO_RIPIOS:RC00	
SPC.SEC.RC002-Angulo-ok.AUT	RC002_Angulo_ok	SERVIDOR_APILAMIENTO_RIPIOS:RC00	
SPC.SEC.RC002-Angulo-orugas-error.AUT	RC002_Angulo_orugas_error	SERVIDOR_APILAMIENTO_RIPIOS:RC00	
SPC.SEC.RC002-Angulo-orugas-PV-Posicion-Orugas.AUT	RC002_Angulo_orugas_PV_Posicion_Orugas	SERVIDOR_APILAMIENTO_RIPIOS:RC00	

Imagen 9: Excel con los sensores asociados Ha roto pala 02.⁵⁶

Cuando se le comunicó esta posible solución a BHP Spence, vieron con muy buenos ojos la posibilidad de automatizar las detenciones de la Roto Pala 02 y 01. Rmes solo recibe las lecturas de las señales de los TAGs y es BHP quien las administra a través de un software⁵⁷ que les permite decidir qué señal o combinación de estas define el estado Run/Stop de un equipo.

⁵⁵ Fuente: Elaboración propia.

⁵⁶ Fuente: Excel proporcionado por BHP Spence.

⁵⁷ Revisar anexo [5] para ver imágenes de este software.

BHP debe generar la combinación de TAGs que permitan definir si la Roto Pala 02 y 01 tuvieron una parada con modo de detención Movimiento de Equipo. Un análisis adicional para la búsqueda de TAGs es la búsqueda de algún patrón en la duración de las detenciones del activo en cuestión.

Densidad de duración de detenciones Roto Pala 02

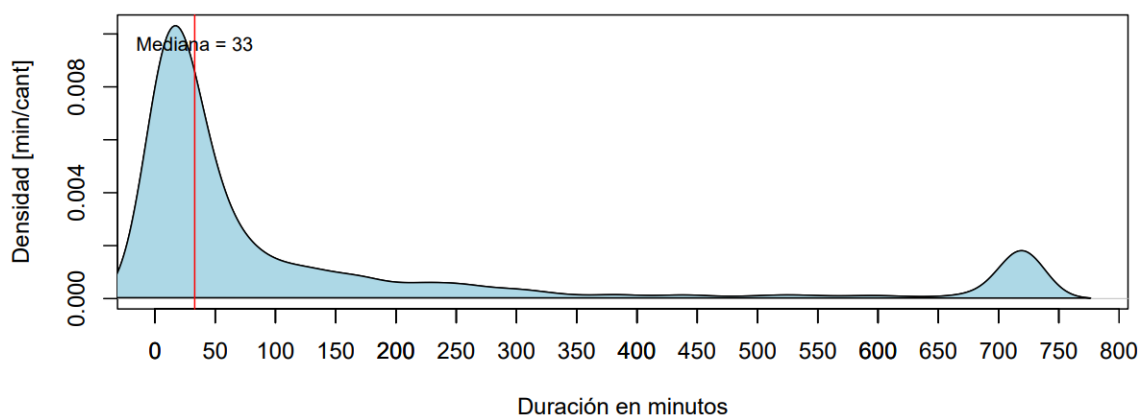


Gráfico 8: Densidad de distribución de la duración de detenciones de Roto Pala 02.⁵⁸

De la gráfica se tiene que la mayoría de las detenciones tienen una duración menor a los 100 minutos y existe otro pequeño grupo entre los 650 y 750 minutos. Si bien esto otorga una idea de cómo distribuyen las duraciones no muestra patrones específicos, además, contiene la duración tanto de las detenciones imputadas como no imputadas. A continuación se muestra de cuánto fue la duración de aquellas detenciones de la Roto pala 02 que si se clasificaron:

Duración [minutos]	Frecuencia
0:05:00	53
0:10:00	52
0:25:00	1

Tabla 20: Duración de las detenciones imputadas de Roto Pala 02.⁵⁹

Existe un claro patrón en donde la mayoría de las detenciones fueron de 5 y 10 minutos.

Durante las reuniones con BHP se les comunicó todo lo mostrado anteriormente, ellos comentaron que les hacía sentido ya que la roto pala es un equipo que se debe mover

⁵⁸ Fuente: Elaboración propia en Rstudio.

⁵⁹ Fuente: Elaboración propia.

constantemente para acercarlo y posicionarlo mejor frente a las pilas de mineral lixiviado. En las siguientes imágenes se muestra y ejemplifica su funcionamiento:



Imagen 10: Roto pala de la mina Radomiro Tomic.⁶⁰

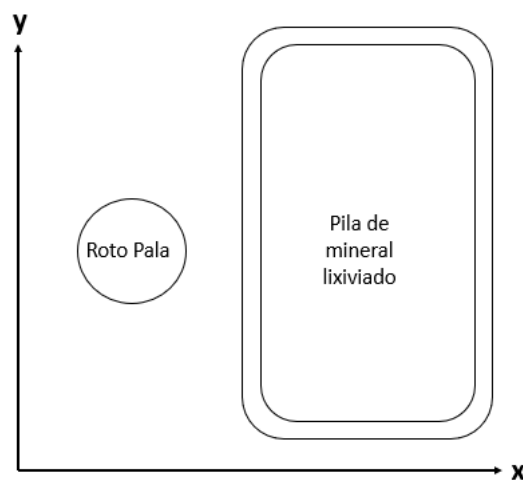


Diagrama 7: Movimiento en ejes X e Y de equipo roto pala.⁶¹

La roto pala debe moverse en el eje X cuando debe acercarse a la pila de mineral, y en el eje Y cuando quiere abarcar un área distinta para la extracción del mineral lixiviado. Para realizar estos movimientos se debe detener este equipo con un modo de detención precisamente llamado "Movimiento de Equipo". Según conversaciones con BHP los movimientos en el eje Y

⁶⁰ Fuente: <https://www.mch.cl/reportajes/radomiro-tomic-pone-marcha-mayor-rotopala-sudamerica/#>

⁶¹ Fuente: Elaboración propia.

son de 5 minutos y más cortos dado que solo se debe mover la roto pala en esta dirección, mientras que cuando el movimiento es en el eje X se deben mover además las correas transportadoras que están detrás y por tanto la duración de esta detención es más larga, de 10 minutos.

Al momento de escribir este informe BHP aún no han generado la combinación de sensores y sus valores que permitan generar la lógica de automatización. Es por esta razón que no se logró avanzar en el diseño de este módulo y tampoco en su implementación, sin embargo, a continuación se muestran los TAGs propuestos:

TAG	Descripción
SPC.SEC.RC002-PD-X-GPS2.AUT	RC002 GPS2 EJEX ROTOPALA
SPC.SEC.RC002-PD-Y-GPS1.AUT	RC002 GPS1 EJEY ROTOPALA
SPC.SEC.RC002-Corriente-RUEDA-PV.AUT	RC002_Corriente_RUEDA_PV
SPC.SEC.RC002-VDF-BELT-CURRENT.AUT	RC002 CORRIENTE VDF CORREA ROTOPALA
SPC.SEC.RC002-VIT-iBelt.AUT	Totalizador Pesómetro Volumétrico RC-002 (all time)

Tabla 21: Combinación de sensores propuestos para auto imputación de Roto Pala 02 y 01.⁶²

Los sensores correspondientes a los ejes X e Y son para medir el movimiento de la roto pala respecto de la pila de material. El sensor de corriente RC002 busca medir la energía que se le suministra ya que al moverla es dejada en un standby y por tanto la energía suministrada es menor. El sensor de corriente en la correa tiene la misma utilidad. Por último, el sensor de peso volumétrico se eligió ya que si el equipo está detenido no está sacando material de la pila.

Filtro de tiempo para detenciones

Los equipos que son candidatos para esta solución son aquellos que se encuentren configurados en fraccionamiento redundante. Esta configuración implica que la carga sistémica necesaria para el funcionamiento de una línea se distribuye entre los equipos que componen el sistema de forma que cuando existe una detención, la pérdida de capacidad de la línea es equivalente a la capacidad del equipo que se detuvo. Redundancia implica que la carga de los equipos individuales suma más de un 100% (Arata Andreani y Arata Bozzolo 2013)⁶³

⁶² Fuente: Elaboración propia.

⁶³ Fuente: Arata y Arata, Ingeniería de la confiabilidad (RIL Editores, 2013), 118.

Al analizar el DLF de la planta de cátodos se encontraron las siguientes líneas con equipos que tienen un impacto parcial sobre el proceso y por tanto son candidatos para aplicar el filtro⁶⁴:

Línea de equipos	Equipos	Capacidad	Capacidad total
Alimentadores 03-07	Feeder-03	25%	132%
	Feeder-04	25%	
	Feeder-05	32%	
	Feeder-06	25%	
	Feeder-07	25%	
Harneros 03-07	Harnero-03	25%	132%
	Harnero-04	25%	
	Harnero-05	32%	
	Harnero-06	25%	
	Harnero-07	25%	
Alimentadores 08-12	Feeder-08	46,25%	231,25%
	Feeder-09	46,25%	
	Feeder-10	46,25%	
	Feeder-11	46,25%	
	Feeder-12	46,25%	
Líneas de chancado III	Chancado Terciario 05	46,25%	231,25%
	Chancado Terciario 06	46,25%	
	Chancado Terciario 07	46,25%	
	Chancado Terciario 08	46,25%	
	Chancado Terciario 09	46,25%	
Rectificadores	Rectificador nave EW 1	50%	150%
	Rectificador nave EW 2	50%	
	Rectificador nave EW 3	50%	

Tabla 22: Líneas de equipos en fraccionamiento redundante seleccionadas.

Para determinar la cantidad de minutos que debe tener el filtro se realizó un gráfico de barras que muestra la cantidad de detenciones que se deben imputar para los distintos valores que puede tomar el filtro.

⁶⁴ Para observar la disposición de los equipos seleccionados revisar anexo [6]

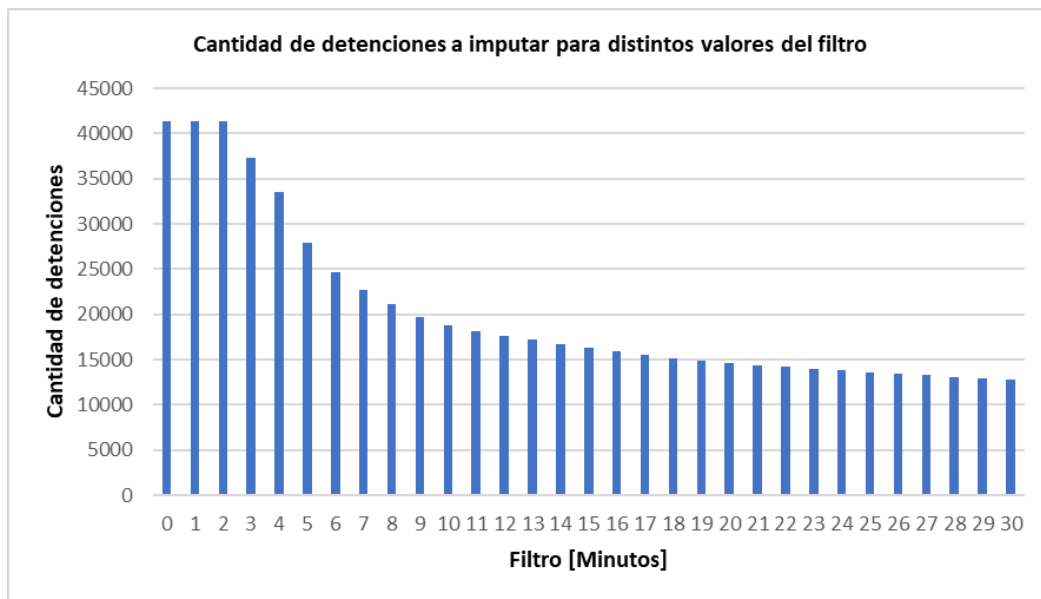


Gráfico 9: Cantidad de eventos a imputar para distintos valores del filtro.⁶⁵

La gráfica muestra que a medida que el filtro de tiempo toma valores más grandes es posible reducir cada vez más la cantidad de eventos que se deben clasificar, sin embargo, el punto ideal para definir el filtro de tiempo es aquel que permite el mayor “ahorro” de imputaciones, lo que es equivalente al punto con mayor pendiente en el gráfico anterior.

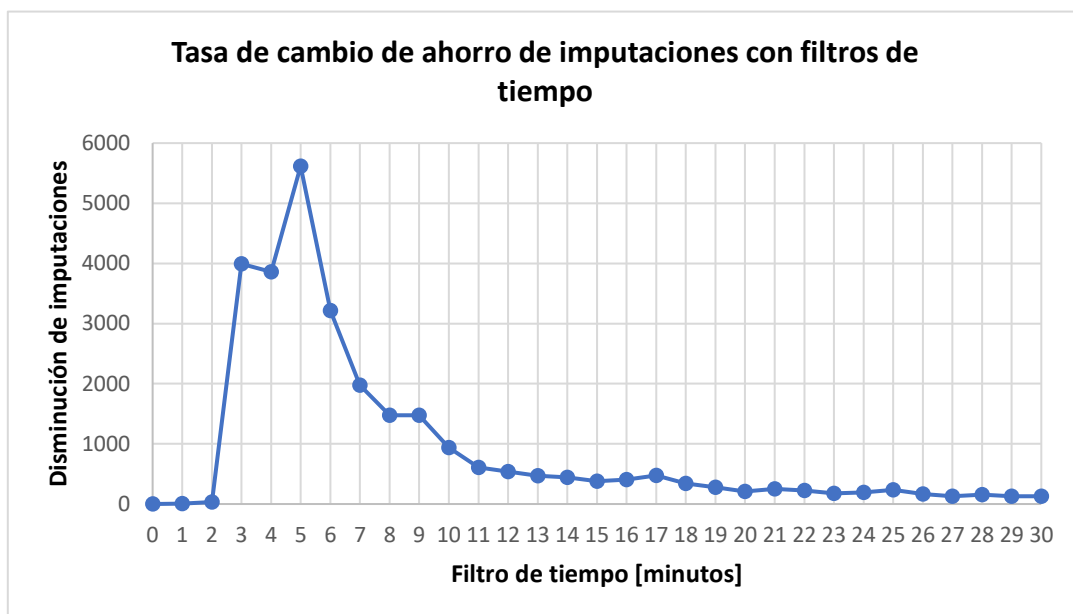


Gráfico 10: Tasa de cambio de omisión de imputaciones para distintos valores del filtro.⁶⁶

⁶⁵ Fuente: Elaboración propia.

⁶⁶ Fuente: Elaboración propia.

La mayor tasa de cambio ocurre cuando el filtro es de 5 minutos, permitiendo omitir aproximadamente 5.500 detenciones al aumentar de 4 a 5 minutos. Por tanto, el valor que debe tomar el filtro de tiempo es de 5 minutos.

El siguiente paso es determinar las funcionalidades básicas que debe tener el módulo a implementar:

- Nombre para identificar el filtro.
- Espacio para definir el valor del filtro y su unidad de tiempo.
- Botón de encendido y apagado del filtro.
- Botón para guardar el filtro creado.
- Botón para eliminar filtro.

El equipo de desarrolladores creó un módulo que permite aplicar el filtro, Sin embargo, este filtro solo pudo ser creado para aplicarse sobre todos los equipos del DLF y no solo sobre aquellos que tienen un impacto parcial en el proceso. A pesar de ello los aspectos visuales y funcionales del módulo servirán para cuando logre aplicarse solo a los equipos definidos.

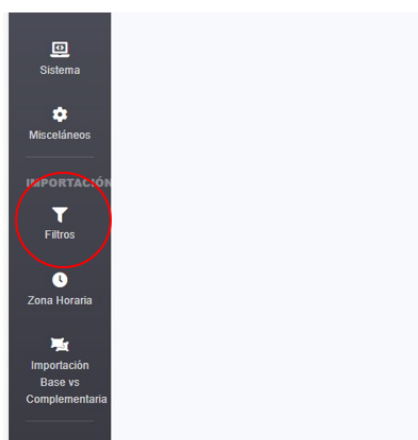


Imagen 11: Ubicación del filtro en Datafillweb.⁶⁷

La imagen muestra la ubicación de la sección donde se pueden gestionar los filtros de tiempo en Datafillweb.

⁶⁷ Fuente: Captura de pantalla Datafillweb Spence.

DATA FILL - Configuración

Configuración / Filtros

Agregar Filtro

Nombre:

☒ Activar

☐ Activar DNC Automático

☒ Filtro Previo: ?

☐ Agrupación: ?

☐ Filtro Post: ?

☐ Intervalo Identificación: ?

☐ Intervalo de Análisis: ?

☐ Tipo ☐ Modo ?

Imagen 12: Menú de creación de filtro de tiempo.⁶⁸

La imagen muestra el menú dónde se pueden agregar los filtros de tiempo. En la parte superior se puede dar nombre al filtro creado, luego hay un botón que permite activar y desactivar este filtro, más abajo está la sección “Filtro Previo” la cual permite aplicar un filtro que omita las detenciones que sean menores o iguales a valor definido allí, esta es la funcionalidad que se busca aplicar. También hay otras secciones que se integraron por petición de los depuradores de datos de Rmes.

DATA FILL - Configuración

Configuración / Filtros

Configuración de Filtros

Nombre	Estado	Acciones
detenciones sobre los 5 minutos	Activo	<input type="button" value="✎"/> <input type="button" value="✖"/> <input type="button" value="🔄"/>
Filtro de 4 minutos	Activo	<input type="button" value="✎"/> <input type="button" value="✖"/> <input type="button" value="🔄"/>
Filtro 5 minutos	Activo	<input type="button" value="✎"/> <input type="button" value="✖"/> <input type="button" value="🔄"/>

Imagen 13: Menú de filtros creados.⁶⁹

La imagen muestra cómo luce el menú con los distintos filtros que se han creado.

⁶⁸ Fuente: Captura de pantalla Datafillweb Spence.

⁶⁹ Fuente: Captura de pantalla Datafillweb Spence.

Autocompletado de detenciones

Serán candidatos aquellas líneas de equipos configuradas en serie que presenten una mayor cantidad de detenciones en la data histórica de la Planta de Cátodos. A continuación se muestra una serie de tablas con las líneas identificadas⁷⁰:

Área seca:

Línea de equipos	Cantidad de equipos	Cantidad de detenciones	Potencial de imputación
Chancado secundario 1	4	816	3.264
Chancado secundario 2	4	827	3.308
Circuito aglomerado 1	3	811	2.433
Circuito aglomerado 2	6	839	5.034
Correa 15 + 16	2	374	748
Correa 12 + extensión	2	575	1.150
Óxido	2	166	332
Apilamiento	2	734	1.468

Tabla 23: Líneas de equipos en serie en Área Seca.⁷¹

Ripio:

Línea de equipos	Cantidad de equipos	Cantidad de detenciones	Potencial de imputación
Correa transportadora 21 + extensión	4	841	3.364
Correa transportadora 23 + Hopper car 23	2	163	326
Correa transportadora 22 + Hopper car 22	2	1.166	2.332
Sulfuro 1	1	1.513	1.513
Correa transportadora 27 + extensión	2	410	820
Correa transportadora 15	2	534	1.068

Tabla 24: Líneas de equipos en serie Ripio.⁷²

⁷⁰ Para mayor comprensión de las líneas de equipos revisar anexo [6]

⁷¹ Fuente: Elaboración propia.

⁷² Fuente: Elaboración propia.

Área húmeda:

Línea de equipos	Cantidad de equipos	Cantidad de detenciones	Potencial de imputación
Sopladores pilas de lixiviación sulfuro	22	182	4.004
Agitadores tren A	4	15	60
Agitadores tren B	6	11	66
Agitadores tren C	6	11	66
Agitadores tren D	6	23	138
Circuito 1	3	77	231
Circuito 2	3	25	75
Circuito 3	3	284	852
Circuito ácido 1	2	20	40
Circuito ácido 2	2	20	40
Circuito ácido 3	2	28	56

Tabla 25: Líneas de equipos en serie Área húmeda.

Cabe destacar que en las tablas la columna de “Potencial de imputación” corresponde a la multiplicación entre “Cantidad de equipos” y “Cantidad de detenciones”. Y que la cantidad de detenciones de la línea corresponde al equipo con menos detenciones en esta.

Aplicar esta solución a todos los activos de todas las líneas tomaría mucho tiempo, por lo que se debe seleccionar solo algunas líneas. Se realizó un gráfico de Pareto con las líneas mostradas anteriormente en base a su potencial de imputación:

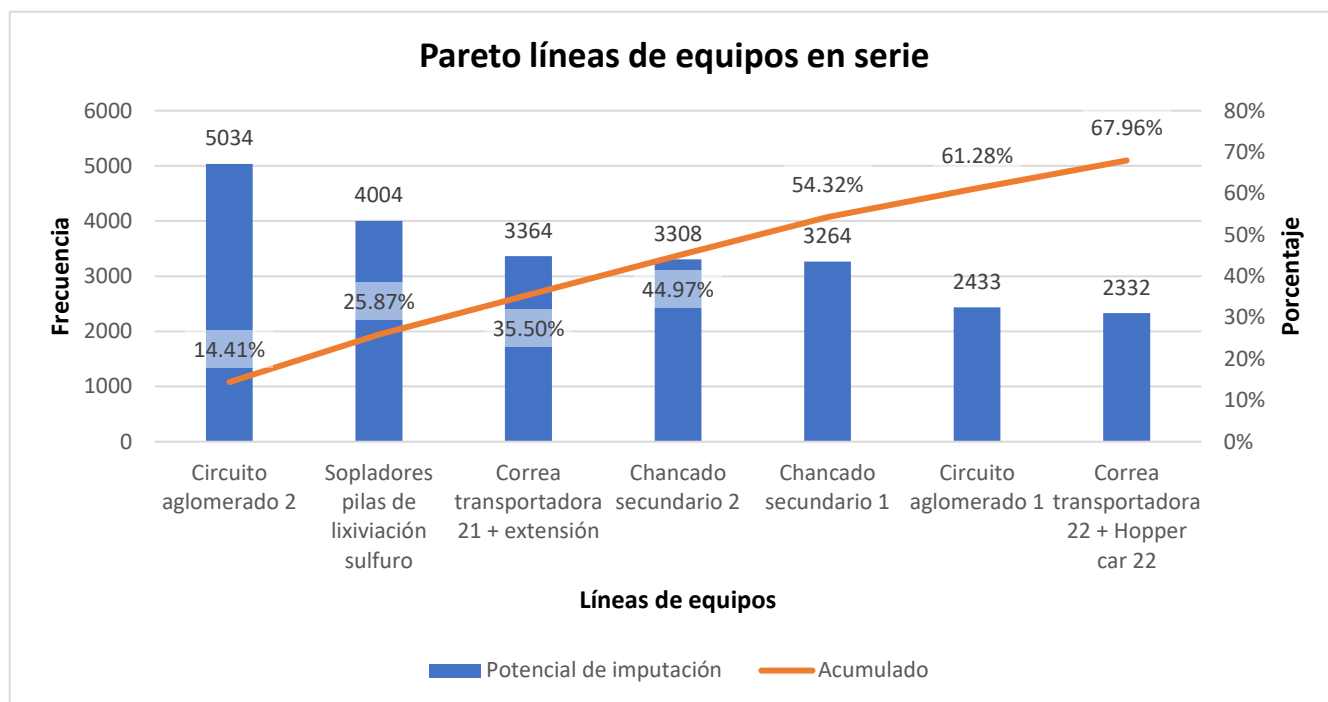


Gráfico 11: Pareto de líneas con equipos en serie.⁷³

Se eligieron todas las líneas que se alcanzan a visualizar en el gráfico. La razón de esto es que las líneas con equipos en serie presentaban en total 34.931 detenciones potenciales, y las líneas elegidas representan el 67,96%, es decir, aproximadamente 27.739 detenciones potenciales. Si se compara este último número con el total de detenciones que se obtuvo en la data histórica (101.053), se tiene que corresponde a un 27,45% de imputación detenciones, lo cual se alinea con el objetivo planteado para este proyecto de alcanzar un 25% de imputación.

Las funcionalidades básicas que debe tener el módulo de autocompletado deben ser las siguientes:

- Proyecto para el que se aplicará (cátodos, concentradora chancado, concentradora molienda, concentradora flotación, etc.).
- Equipo de origen: es el que causa la detención y se debe imputar manualmente.
- Equipos afectados: equipos a los que se les auto completará la detención.
- Tipo de detención origen.
- Tipo de detención para los autocompletados.
- Modo de detención para autocompletar.
- Botón para agregar más tipos/modos de detención a la regla.

⁷³ Fuente: Elaboración propia.

- Botón que permite guardar las reglas en el módulo.
- Botón para activar y desactivar la regla.
- Funcionalidad que permita definir el tiempo máximo tras el cual se pueda autocompletar la regla.

Es importante destacar que la última funcionalidad del listado tiene como objetivo definir cuál es el límite de tiempo máximo tras el cual la imputación de una detención puede autocompletar las de los demás equipos de su línea. Esto ya que si transcurre mucho tiempo entre una parada y otra, sus orígenes son independientes.

Se generaron las lógicas de autocompletado para las 7 líneas seleccionadas, que constan de 45 equipos. A continuación se muestran imágenes del funcionamiento e implementación de este módulo:

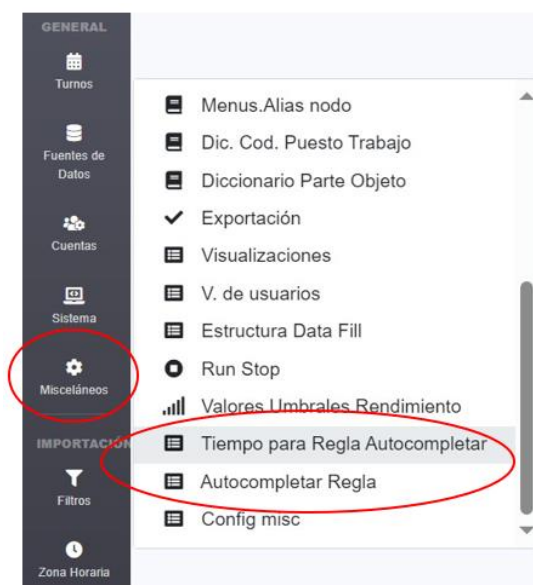


Imagen 13: Ubicación del módulo en menú Datafillweb.⁷⁴

La imagen anterior muestra cual es la ubicación de este módulo dentro del menú de Datafillweb. Además, se muestran las secciones para ingresar a la gestión de las reglas de autocompletado y el tiempo para estas.

⁷⁴ Fuente: Captura de pantalla Datafillweb Spence.

Agregar Regla Autocompletar

Proyecto

Planta Catodo
▼

Equipo Origen

35-FE-001 Feeder FE01
▼

Equipos Afectados

× 35-CV-001 Correa CV01
× 35-SN-001 Harnero SN01
× 35-CR-003 Chancador CR03
× ▼

Tipo Origen

Seleccione
▼

Tipo Autocompletado

Seleccione
▼

Modo de Detención

Seleccione
▼

+ Agregar

Tipo Origen	Tipo Autocompletado	Modo de Detención	Opciones
MP - Detencion Equipo Pro ▼	DO - Detención Proceso Progr. ▼	DO - SPC02MF018 - 2180 - CHEQUEO DEL EQUIPO POR OPERADOR ▼	❌
DONP - Detención Proceso ▼	DONP - Detención Proceso No ▼	DONP - SPC02MF038 - 4190 - INACTIVIDAD NO PROGRAMADO ▼	❌

✖ Cancelar
💾 Guardar

Imagen 14: Menú de configuración para reglas de autocompletado.⁷⁵

Esta imagen muestra la creación de una regla de autocompletado para línea de Chancado Secundario 1, donde el equipo de origen es el Feeder 01 y su detención permite autocompletar las paradas de los equipos Correa 01, Harnero 01, y Chancador 01. En la parte inferior se muestran los casos que ya se le asignaron a la regla. El primero de ellos es un tipo de detención de origen “MP - Detención de Equipo Programada” que genera un autocompletado de tipo “DO - Detención de Proceso Programada” y con un modo de detención “CHEQUEO DEL EQUIPO POR OPERADOR”. Se pueden agregar tantas reglas como se desee.

⁷⁵ Fuente: Captura de pantalla Datafillweb Spence.

Resultados

En este proyecto solamente se llegó a probar las soluciones en ambiente QA (Quality Assurance) que es una versión de prueba para los distintos módulos que se crean para Datafillweb. Para medir o estimar los resultados de las soluciones de automatización de imputaciones y el filtro de tiempo para detenciones se utilizará la data histórica con la que se ha trabajado hasta ahora en este proyecto. Mientras que para la solución de autocompletado de detenciones se utilizarán 4 set de datos elegidos aleatoriamente: turno día 7 de junio 2023, noche 14 de junio, día 21 de junio, y noche 28 de junio. La razón de ello es que para probar las lógicas de autocompletado se deben realizar las imputaciones de forma manual, cómo ocurriría si realmente se utilizara esta función, y realizar esto sobre toda la data histórica es casi imposible por temas de tiempo.

Automatización de detenciones

Si bien no se logró desarrollar este módulo es posible estimar cuál sería su resultado si se considera que la Roto pala 02 y 01 fueron los equipos candidatos al ser los principales responsables del modo de detención “Movimiento de Equipo”. Además, se encontró que estas detenciones fueron en su mayoría de 5 y 10 minutos. La estimación consiste en asignar a todas las detenciones que tengan estas duraciones en la Roto pala 02 y Roto pala 01 el tipo de detención “Proceso Programada” y el modo de falla “2130 - MOVIMIENTO DE EQUIPO”. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Equipo	Estado de la Estimación	Total de detenciones del equipo	Imputadas	Porcentaje respecto del equipo	Porcentaje respecto de la data histórica
Roto pala 01	Previo	901	10	1,11%	0,010%
	Post		74	8,21%	0,073%
Roto pala 02	Previo	1.515	106	7,00%	0,105%
	Post		144	9,50%	0,142%

Tabla 26: Resultados estimados de automatización de imputaciones⁷⁶

⁷⁶ Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se observa que gracias a la automatización de imputaciones se lograron incrementar las imputaciones de la Roto pala 01 de 10 a 74, esto es un incremento de un 7,1% de las imputaciones de este equipo y que representa un incremento de un 0,063% en el porcentaje de imputación total de la data histórica. En el caso de la Roto pala 02 se lograron aumentar sus imputaciones de 106 a 144, que es un aumento de un 2,5% de las imputaciones y un aumento de un 0,037% respecto del total histórico. Ambas roto palas juntas generan un aumento de un 0,1% en la clasificación de detenciones.

Filtro de tiempo para detenciones

Se encontró que el valor del filtro que permitía omitir una mayor cantidad de detenciones era de 5 minutos. Una forma de estimar el ahorro de tiempo que genera esta solución es multiplicar la cantidad de eventos omitidos por el tiempo promedio de imputación que es de 1,5 minutos. Considerando que el filtro se aplica únicamente a los equipos seleccionados para esta mejora ya que de otro modo se sobreestima su efecto.

Filtro [Minutos]	Detenciones totales de los equipos seleccionados	Detenciones para imputar con el filtro	Detenciones omitidas	Ahorro de tiempo [Minutos]	Ahorro de tiempo [Horas]
5	41.382	27.871	13.511	20.266,50	337,78

Tabla 27: Resultado estimado del filtro de tiempo.⁷⁷

Gracias a un filtro de 5 minutos sobre los equipos con impacto parcial es posible omitir 13.511 clasificaciones, generando un ahorro de tiempo aproximado de 20.267 minutos o 338 horas, lo que es equivalente a 37,53 días laborales. Como se mencionó anteriormente este ahorro de tiempo no influye directamente en el porcentaje de imputación, pero si libera tiempo para los operadores de CIO BHP el cual podría utilizarse para analizar otras detenciones.

⁷⁷ Fuente: Elaboración propia.

Autocompletado de detenciones

Se utilizaron los dos sets de eventos de los días 7, 14, 21, y 28 de junio. Sin embargo, solo se mostrará a detalle los resultados para el 7 de junio ya que los otros 3 periodos se utilizarán para mostrar una comparativa general de resultados. Para poder probar el módulo se imputó de forma manual a aquellos equipos seleccionados para que se autocomplete la clasificación a los demás equipos de su línea. El tipo de detención que se utilizará para el equipo de origen será “MP - Detención de Equipo Programada”, para el autocompletado el tipo de detención será “MP - Detención de Equipo Programada” y para el modo de falla “2180 - CHEQUEO DEL EQUIPO POR OPERADOR”. Los resultados se muestran a continuación:

- Turno día 7 de junio 2023

Detenciones totales	Imputadas sin autocompletado	Porcentaje sin autocompletado	Imputadas con autocompletado	Porcentaje con autocompletado
217	6	2,76%	50	23,04%

Tabla 28: Resultados autocompletado de detenciones 7 de junio.⁷⁸

En la tabla se observa que al utilizar las reglas de autocompletado de detenciones se logró aumentar el porcentaje de imputación en ese turno en desde un 2,76% a un 23,04%. Los modos de detención que se presentaron se muestran en el siguiente gráfico de barras comparativo:

⁷⁸ Fuente: Elaboración propia.

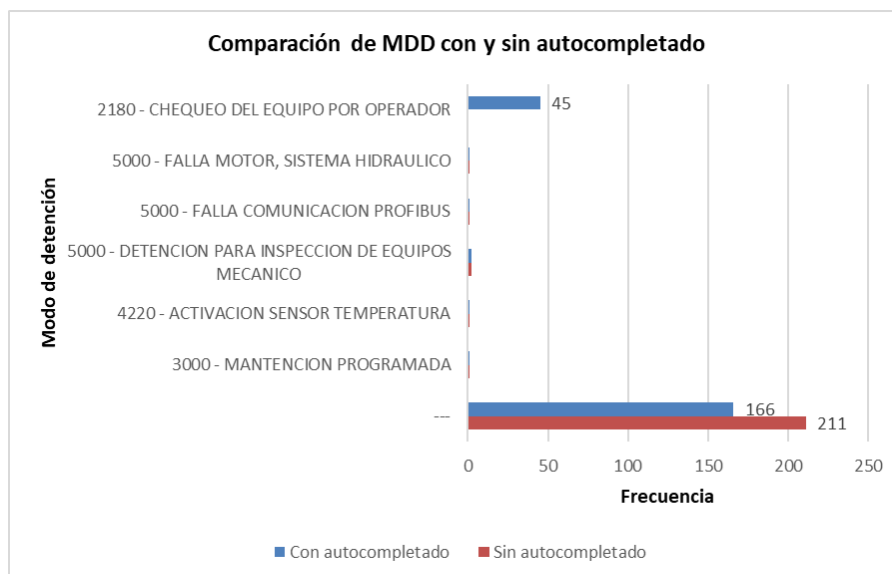


Gráfico 12: Modos de detención con y sin autocompletado.⁷⁹

Se observa que sin las reglas de autocompletado la cantidad de no imputaciones “---” eran 211 y gracias a la aplicación de estas reglas se logró bajar las no imputaciones a 166, lo que también se refleja en las 45 detenciones con modo de falla “2180 - CHEQUEO DEL EQUIPO POR OPERADOR”.

- Turno noche 14 de junio 2023:

Detenciones totales	Imputadas sin autocompletado	Porcentaje sin autocompletado	Imputadas con autocompletado	Porcentaje con autocompletado
168	15	8,93%	58	34,52%

Tabla 29: Resultados autocompletado de detenciones 14 de junio.⁸⁰

En este turno se logró mejorar el porcentaje de imputación en un 25,59% gracias a las reglas de autocompletado.

⁷⁹ Fuente: Elaboración propia.

⁸⁰ Fuente: Elaboración propia.

- Turno día 21 de junio 2023:

Detenciones totales	Imputadas sin autocompletado	Porcentaje sin autocompletado	Imputadas con autocompletado	Porcentaje con autocompletado
225	4	1,78%	45	20,00%

Tabla 30: Resultados autocompletado de detenciones 14 de junio.⁸¹

En este turno se logró un incremento en el porcentaje de imputación de un 18,22%.

- Turno noche 28 de junio 2023:

Detenciones totales	Imputadas sin autocompletado	Porcentaje sin autocompletado	Imputadas con autocompletado	Porcentaje con autocompletado
113	1	0,88%	23	20,35%

Tabla 31: Resultados autocompletado de detenciones 28 de junio.⁸²

En el último set de datos se logró mejorar la clasificación de detenciones en un 19,47%.

Resultados generales

Para poder corroborar de forma general el efecto de las soluciones propuestas sobre la problemática de un bajo porcentaje de imputación se debe considerar su aporte en conjunto. Para ello se sumarán los aportes de las distintas mejoras a la métrica de estudio.

En primer lugar, se tiene que la automatización de imputaciones de las Roto palas 01 y 02 generó un incremento de un 0,1% en el porcentaje de imputación. Cómo este valor se calculó sobre todo el set de datos históricos de la planta, se sumarán directamente con los resultados obtenidos para cada uno de los 4 turnos considerados en los resultados de la mejora de autocompletado de detenciones. Respecto del efecto que pueda tener el ahorro de tiempo a causa del filtro de detenciones, se considerará como una mejora potencial. Durante el mes de junio del 2023 se registraron 11.404 eventos y se tuvo un porcentaje de imputación del 2,66%, es decir, se imputaron 3.034 detenciones, lo que tomó un tiempo promedio de 75,85 horas. Se

⁸¹ Fuente: Elaboración propia.

⁸² Fuente: Elaboración propia.

considerará una relación proporcional con las horas que permite ahorrar el filtro de tiempo. Así, si CIO BHP logró imputar 3.034 eventos en 75,85 horas, disponer de 337,78 horas más para esta tarea puede permitir imputar 13.511,2 detenciones, que es equivalente a un 13,37% de imputación respecto de la data histórica. Lo anterior se resume en la siguiente tabla y gráfico:

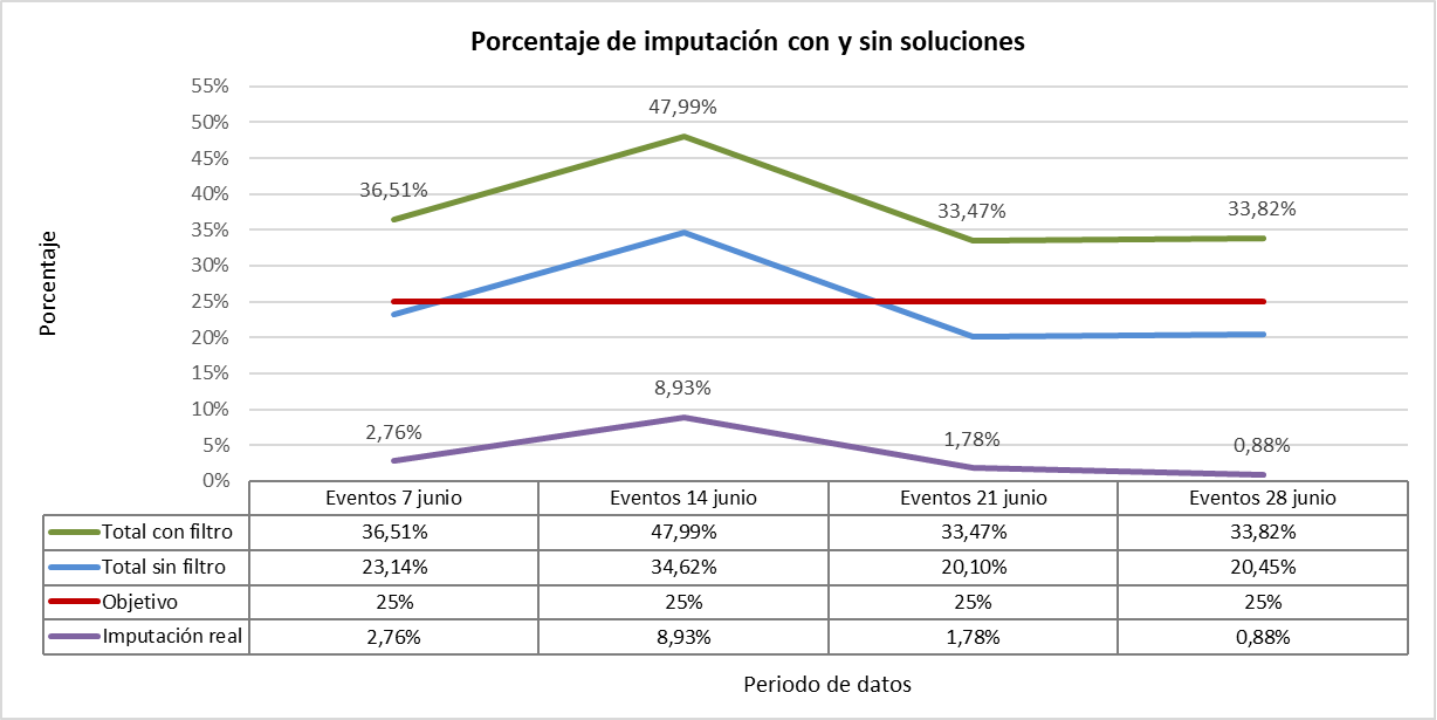


Gráfico 13: Resultados generales, objetivo, y situación real.⁸³

En la gráfica se observa que si se dedican las horas liberadas por el filtro de detenciones al proceso de imputación se alcanza a superar en todos los periodos el objetivo de este proyecto que es de un 25%. Mientras que si este ahorro de tiempo no se dedica en absoluto a esta tarea el porcentaje de imputación no alcanza el objetivo pero si queda muy cerca de este como se muestra en los periodos del 7, 21, y 28 de junio.

⁸³ Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones y recomendaciones

Dados los resultados observados en el inciso anterior es posible concluir que se puede lograr el objetivo que se propuso para este proyecto de alcanzar un 25% de imputación mediante las 3 soluciones propuestas.

La solución de automatización de imputaciones tuvo un impacto muy pequeño logrando tan solo un 0,1% de mejora en la métrica de estudio. Sin embargo, mejoras como esta son una muy buena oportunidad de cara a la automatización del proceso, además, fue la solución que más le gusto a BHP durante las reuniones. Es recomendable que se encuentren más equipos candidatos y más combinaciones de sensores sobre las cuales detectar modos de detención que se repitan, para así lograr una mayor cantidad de detenciones automáticas.

La propuesta de un filtro de tiempo para las detenciones demostró ser útil a la hora de reducir las horas necesarias y así agilizar el proceso, logrando liberar 337,78 horas al permitir la omisión de 13.511 eventos. Pero, como se mencionó anteriormente nada asegura que estas horas liberadas sean dedicadas al análisis de otras detenciones, por lo que es recomendable generar un control y gestión de las horas diarias que el personal de CIO BHP dedica a esta tarea con la finalidad de que se puedan mantener porcentajes de imputación estables a lo largo del tiempo.

La mejora del autocompletado de detenciones fue la que mostró mejores resultados a la hora de mejorar los porcentajes de imputación, logrando alcanzar en promedio un 24,48% de imputación con los 4 set de datos sobre los que se probó el módulo. Es una gran oportunidad para automatizar y agilizar el proceso ya que reduce la cantidad de imputaciones que se deben realizar manualmente sobre una línea. Para un mejor desempeño de este módulo se recomienda el estudio de reglas de autocompletado más complejas, ya que en este proyecto solo se analizaron equipos que estuvieran en serie, pero es posible generar reglas entre líneas que están en serie y hacer que el autocompletado se extienda a una mayor cantidad de equipos

A modo general, es de suma relevancia destacar el rol que juega la mejora continua en los procesos. En este caso particular la inclusión de los 3 módulos planteados en este proyecto no solo tiene un impacto de cara a mejorar la precisión y confiabilidad de los indicadores y análisis que calcula Rmes, sino que esto hace que el servicio prestado sea de una mejor calidad y el cliente lo perciba. Esto en primera instancia ayuda a aumentar la probabilidad de que los clientes renueven su suscripción anual a Rmes Suite, pero también abre las puertas a que los

clientes quieran mejorar su suscripción añadiendo más módulos en el servicio que están contratando, lo que a su vez se traduce en mayores ingresos para Rmes.

Referencias

- Analytics, Rmes. s.f. *Rmes Analytics*. Último acceso: noviembre de 2023.
<https://rmesanalytics.com/>.
- Arata Andreani, Adolfo, y Alessio Arata Bozzolo. 2013. «Ingeniería de la confiabilidad.» 113. RIL Editores.
- BHP. 2023. «Modelo de Uso del Tiempo.» 12 de enero.
- Chacón, Alexander. 2013. «Implementación del Sistema de Registro de Detenciones en Planta Concentradora.» Tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Cuba, Gonzalo Leoncio. 2020. «Registro automático de detenciones con control supervisorio e integración de niveles en manufactura de una línea de producción de envasado de cerveza.» Tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/11177>.
- Dropbox. 2023. *Dropbox*. Último acceso: 01 de Noviembre de 2023.
<https://experience.dropbox.com/es-la/resources/dmaic>.
- Hadida, Sebastián, y Fernando Troilo. 2020. «La agilidad de las organizaciones: Trabajo comparativo entre metodologías ágiles y de cascada en un contexto de ambigüedad y transformación digital.» *Universidad del Cema* (756).
<http://hdl.handle.net/10419/238381>.
- Magos, Miguel, Ricardo Godínez, y Ivonne Rodríguez. 2016. *Sistema de registro de datos vía RFID y código de barras*. Artículo, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Celaya, Pistas Educativas.
- Perez-López, Esteban. 2015. «Los sistemas SCADA en la automatización industrial.» *Tecnología en Marcha* 28.
- Shrivastava, Kshitj. 2022. «Smart Markets Integrated with RFID, Computer Vision, Sensor Data Fusion.» *International Journal For Research in Aplied Science and Engineering Technology* 10. doi:<https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.46022>.

Anexos

Anexo 1: Indicadores básicos Rmes Suite.

Indicadores Básicos

Tiempo Calendario Efectivo

$$TCALEF = TCAL$$

Tiempo Requerido

$$TREQ = TCAL - T_{DCE} - T_{DNC}$$

Tiempo Disponible Mecánico

$$TDISPM = TCAL - T_{MC} - T_{MP} - T_{DCE} - T_{DNC}$$

Tiempo Disponible Físico

$$TDISPF = TCAL - T_{MC} - T_{MP} - T_{DCE} - T_{DNC} - T_{MCO}$$

Tiempo Disponible

$$TDISP = TCAL - T_{MC} - T_{MP} - T_{DCE} - T_{DNC}$$

Tiempo Operativo

$$TOPE = TCAL - T_{MC} - T_{MP} - T_{DONP} - T_{DO} - T_{MI} - T_{DCE} - T_{DNC} - T_{MCO}$$

Tiempo de Uso

$$TUSO = TCAL - T_{MC} - T_{MP} - T_{DONP} - T_{DO} - T_{MI} - T_{DCE} - T_{DNC} - T_{MCO}$$

Tiempo Equivalente de Producción

$$TR = TCAL - T_{MC} - T_{MP} - T_{DONP} - T_{DO} - T_{MI} - T_{DCE} - T_{PPR} - T_{DNC} - T_{MCO}$$

Indicadores de Performance

Disponibilidad

$$A = \frac{TDISP}{TPOS}$$

Run Time

$$RT = \frac{TUSO}{TPOS}$$

Utilización

$$U = \frac{TUSO}{TDISP}$$

Coefficiente de Marcha

$$CM = \frac{TR}{TPOS}$$

Rendimiento

$$R = \frac{TR}{TUSO}$$

Disponibilidad Mecánica

$$AM = \frac{TDISPM}{TPOS}$$

Disponibilidad Física

$$AF = \frac{TDISPF}{TPOS}$$

Factor de Utilización

$$FU = \frac{TUSO}{TOPE}$$

Utilización Operativa

$$UO = \frac{TOPE}{TDISP}$$

Anexo 2: Configuraciones DFL.

A continuación se mostrarán imágenes dónde se explica las distintas configuraciones que pueden tener los equipos en Rmes a partir del libro *“Ingeniería de la confiabilidad”* de Adolfo Arata y Alessio Arata (referenciados antes), dueños de Rmes.

a. Configuración en serie

La falla de uno de sus elementos¹, considerado como un evento independiente, determina la falla del sistema en conjunto (Figura 2.4).

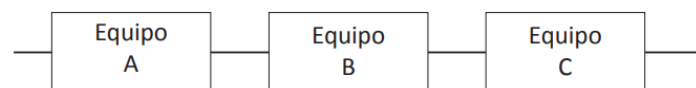


Figura 2.4: Representación de sistema en serie

b. Configuración en paralelo

Esta configuración forma parte de los sistemas redundantes, los cuales buscan obtener una mayor confiabilidad sistémica.

En términos generales existen dos tipos de redundancia en paralelo (Figura 2.5):

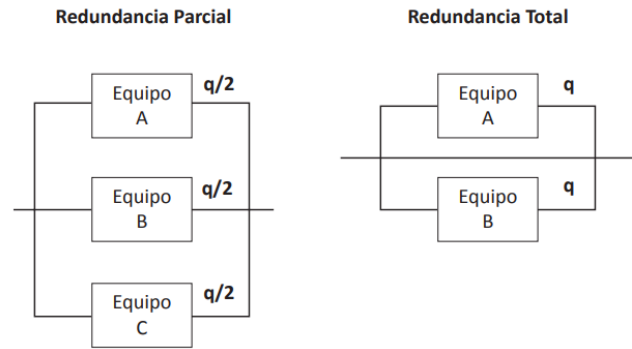


Figura 2.5: Representación de sistema en paralelo

c. Configuración en *stand-by*

Esta configuración es otro tipo de redundancia, la cual consiste en que en un instante determinado solo funciona uno de los elementos del sistema, mientras que los equipos restantes permanecen en reserva, o bien en estado de espera (*stand-by*).

En consecuencia, en este caso la conexión funcional varía en el tiempo en función de la aparición de la falla. A continuación se muestra la disposición de componentes en un sistema *stand-by*.

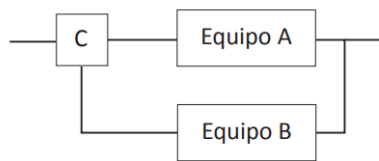


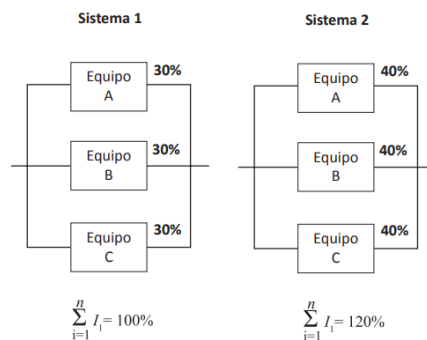
Figura 2.6: Sistema en configuración *stand-by*

d. Configuración en fraccionamiento

Esta configuración es utilizada cuando la carga sistémica de trabajo se distribuye entre los elementos que constituyen el sistema, de forma tal que cuando ocurre una falla la pérdida es proporcional al porcentaje de carga que el elemento aporta al sistema.

Existen dos modalidades de fraccionamiento:

- la suma de las cargas individuales componen el 100% de la carga sistémica exigida; y
- la suma de las cargas individuales componen más del 100% de la carga sistémica exigida.



Anexo 3: Tiempos de desarrollo e implementación de las soluciones propuestas.

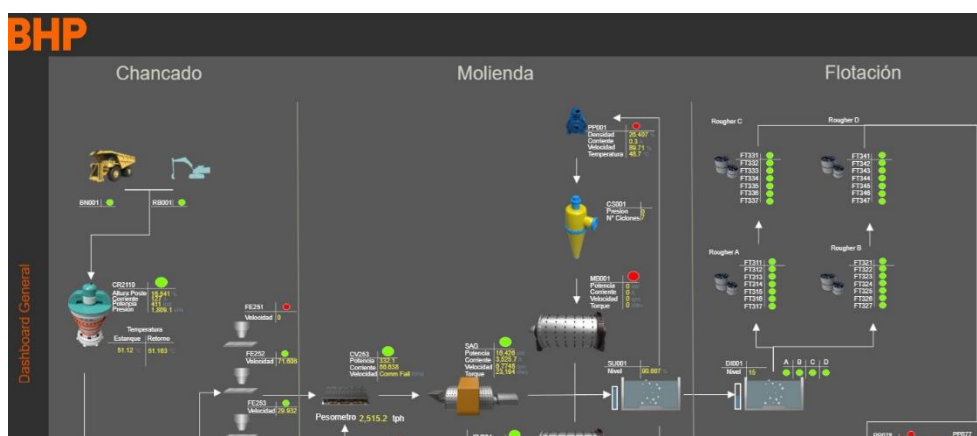
Tarea/Etapa	Descripción	Tiempo necesario [Días]	Tiempo necesario [horas]
Reunión inicial	Reunión con el equipo para determinar los objetivos del proyecto	0	0
Levantamiento de información	Recopilación de la información inicial para determinar la situación inicial	7	63
Análisis preliminar	Definición de problemáticas a abordar y soluciones a desarrollar para lograr los objetivos propuestos	3	27
Primer entregable	Propuesta de solución/producto	4	36
Validación técnica	El cliente o usuario final del proyecto debe aprobar la solución propuesta	0	0
Desarrollo y despliegue en QA	QA (Quality Assurance) es un ambiente de prueba en Rmes para probar nuevos productos, módulos, o actualizaciones	Solución 1: 4	36
		Solución 2: 14	126
		Solución 3: 6	54
		Solución 4: 14	126
User Acceptance Testing (UAT)	Cliente o usuario final debe aceptar el producto final e indicar que este cumple con los requerimientos. Realiza observaciones de situaciones a corregir	0	0
Revisión de observaciones	Se analizan y solucionan las observaciones que realizó el usuario final.	7	63
Despliegue en productivo	Implementar el producto o modulo en Rmes Suite para que quede funcional	1	9
User Acceptance Testing (UAT)	Aceptación final por parte del usuario	0	0

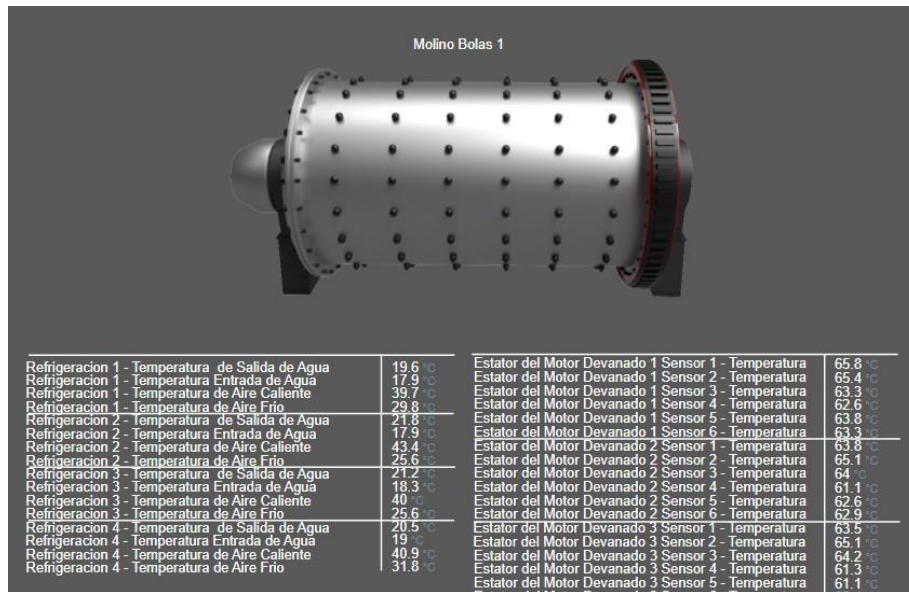
Anexo 4: Desglose de costos de las soluciones.

Rol	Sueldo mensual [CLP]	Sueldo por hora [CLP]
Ingeniero CS (Industrial o mecánico)	\$ 2.000.000	\$ 11.111,11
Líder de proyecto (Ing. Industrial o mecánico)	\$ 2.500.000	\$ 13.888,89
Gerente CS (Ing. Industrial o mecánico)	\$ 5.000.000	\$ 27.777,78
Desarrollador (Ing. Informático)	\$ 2.000.000	\$ 11.111,11

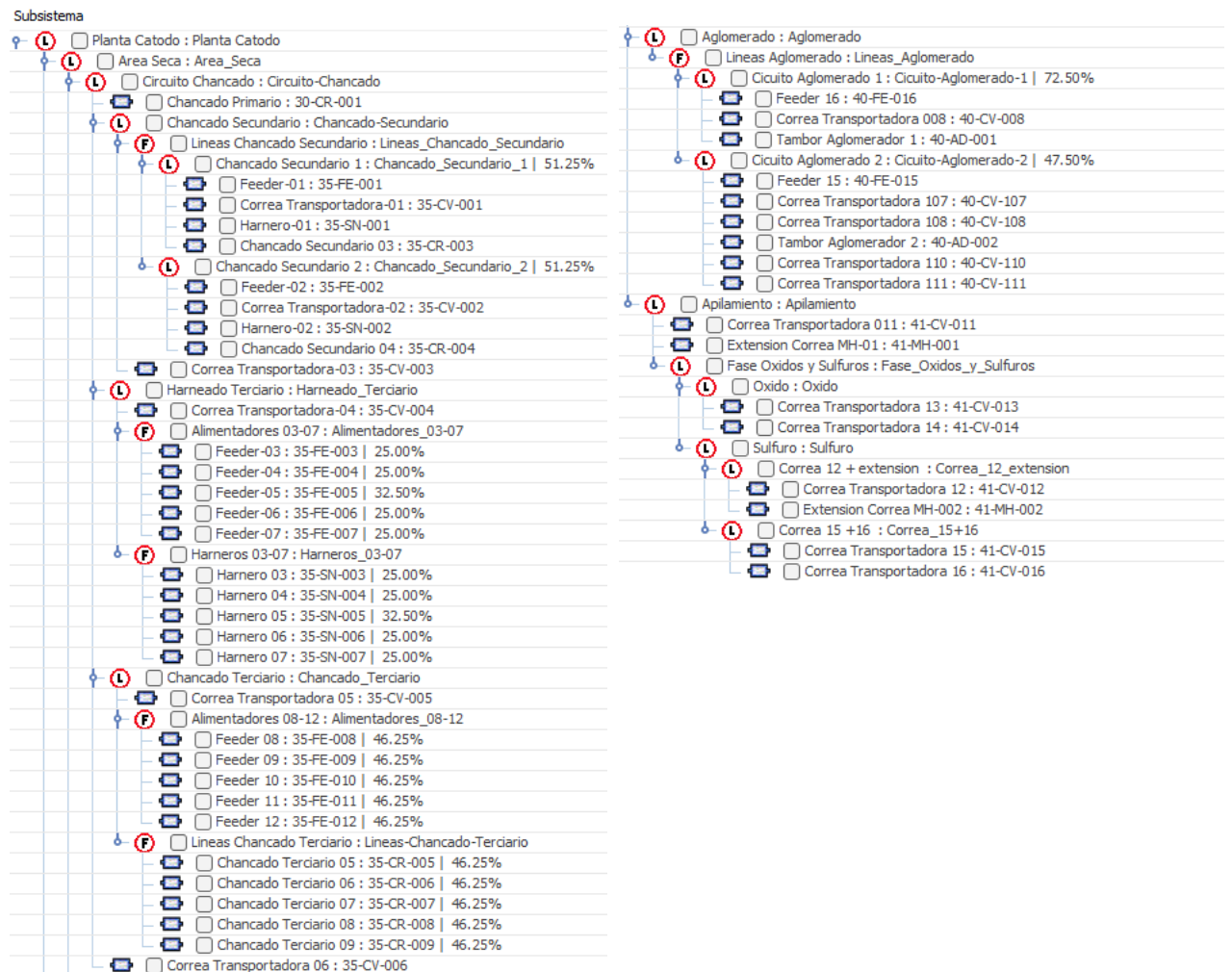
Solución	Rol	% de participación	Sueldo [CLP/hr]	Horas requeridas	Coste final [CLP]	Coste total [CLP]
1	Ingeniero CS	100%	\$11.111	238	\$2.644.444,44	\$ 15.205.556
	Líder de proyecto	20%	\$13.889		\$3.305.555,56	
	Gerente CS	10%	\$27.778		\$6.611.111,11	
	Desarrollador	50%	\$11.111		\$2.644.444,44	
2	Ingeniero CS	100%	\$11.111	324	\$3.600.000,00	\$20.700.000
	Líder de proyecto	20%	\$13.889		\$4.500.000,00	
	Gerente CS	10%	\$27.778		\$9.000.000,00	
	Desarrollador	50%	\$11.111		\$3.600.000,00	
3	Ingeniero CS	100%	\$11.111	252	\$2.800.000,00	\$16.100.000
	Líder de proyecto	20%	\$13.889		\$3.500.000,00	
	Gerente CS	10%	\$27.778		\$7.000.000,00	
	Desarrollador	50%	\$11.111		\$2.800.000,00	
4	Ingeniero CS	100%	\$11.111	324	\$3.600.000,00	\$20.700.000
	Líder de proyecto	20%	\$13.889		\$4.500.000,00	
	Gerente CS	10%	\$27.778		\$9.000.000,00	
	Desarrollador	50%	\$11.111		\$3.600.000,00	

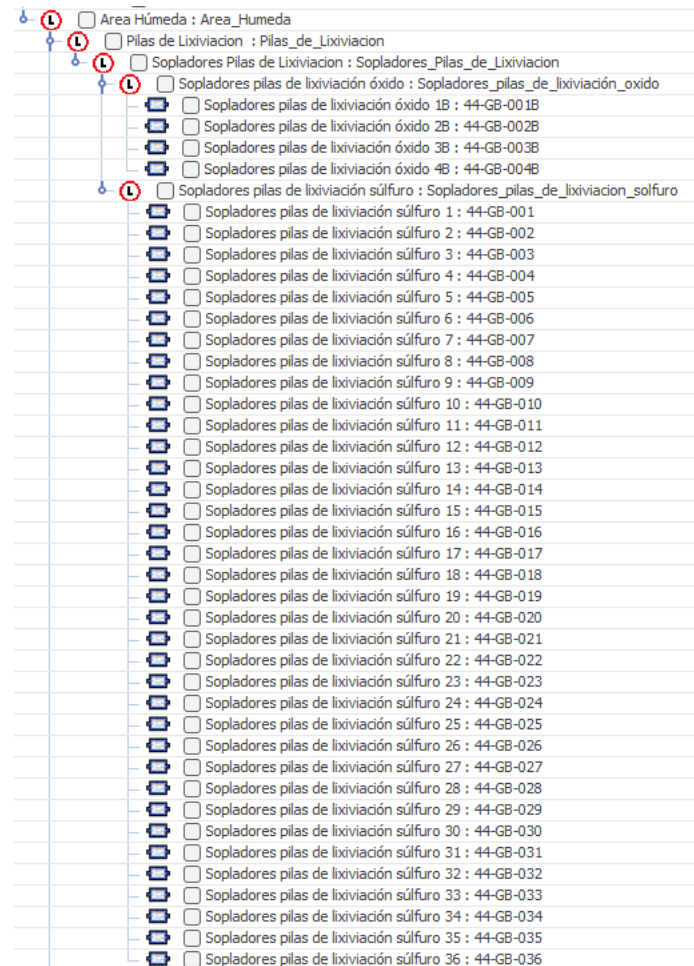
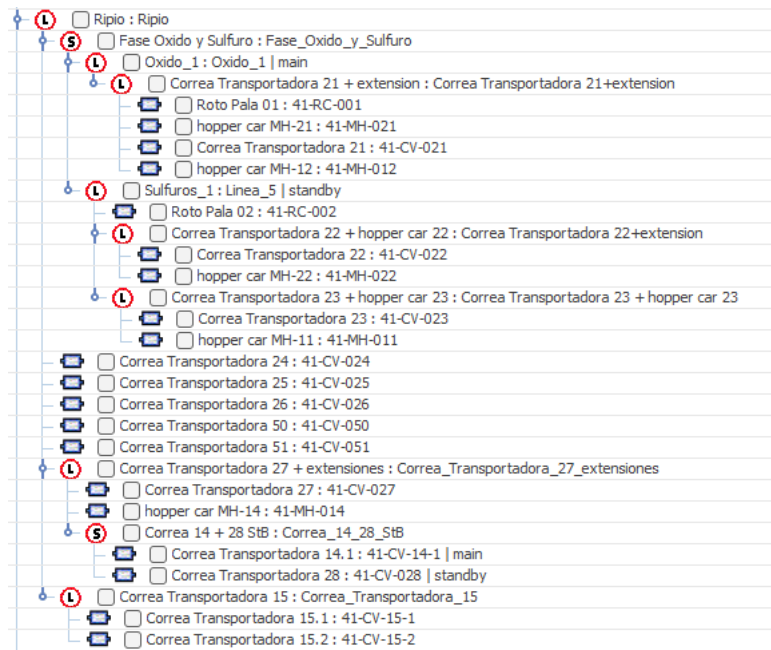
Anexo 5: Software de control y gestión de TAGs BHP (imágenes).

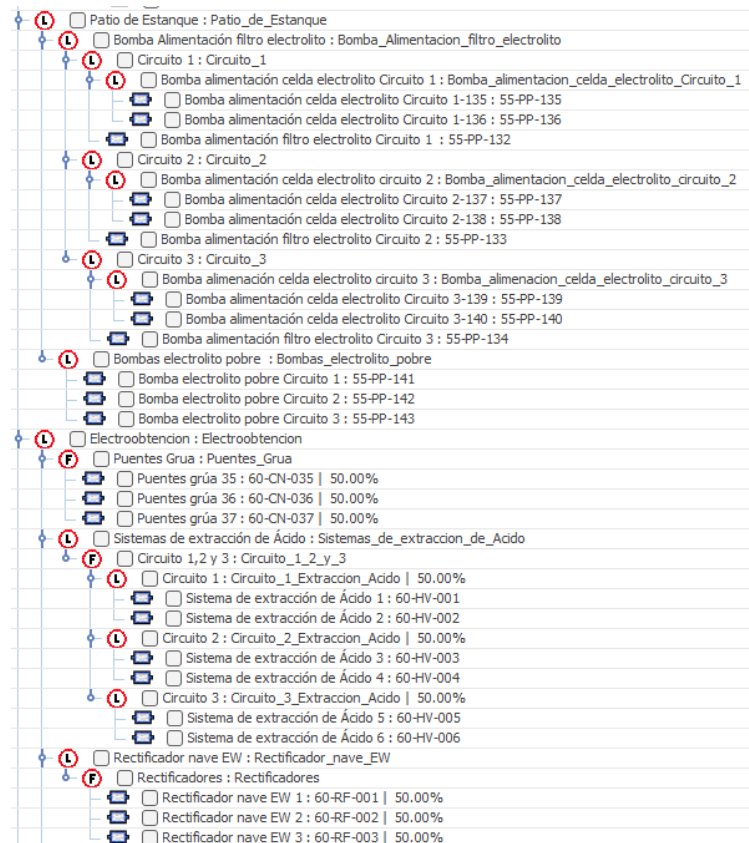
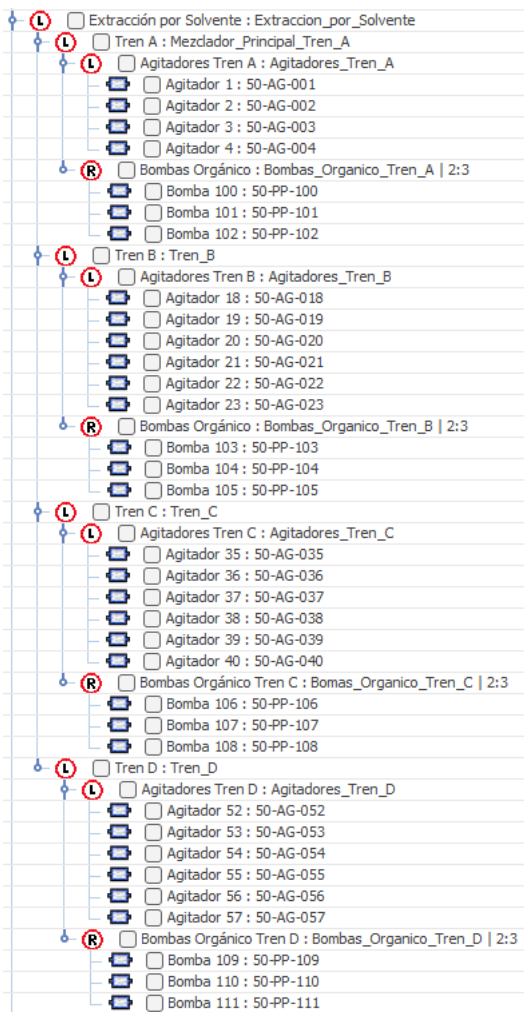




Anexo 6: DLF Spence.







	<input type="checkbox"/>	Máquinas de cátodo : Máquinas_de_catodo
	<input type="checkbox"/>	Máquinas de cátodos : Maquinas_de_catodos
	<input type="checkbox"/>	Máquinas de cátodo 1 : 60-WS-001 50.00%
	<input type="checkbox"/>	Máquinas de cátodo 2 : 60-WS-002 50.00%
	<input type="checkbox"/>	Calentadores Agua servicios : Calentador_Aguas_Servicios
	<input type="checkbox"/>	Calentador Agua servicios 9 : 65-HT-009 50.00%
	<input type="checkbox"/>	Calentador Agua servicios 10 : 65-HT-010 50.00%
	<input type="checkbox"/>	Puentes grúa 38 (por validar) : 60-CN-038
	<input type="checkbox"/>	Sistemas Auxiliares y Reactivos : Sistemas_Auxiliares_y_Reactivos
	<input type="checkbox"/>	Calentador Agua Electrolito : Calentador_Agua_Electrolito 1:3
	<input type="checkbox"/>	Calentador Agua electrolito 5 : 65-HT-005
	<input type="checkbox"/>	Calentador Agua electrolito 6 : 65-HT-006
	<input type="checkbox"/>	Calentador Agua electrolito 7 : 65-HT-007
	<input type="checkbox"/>	Compresores : Compresores 1:3
	<input type="checkbox"/>	Compresor 9 : 65-GC-009
	<input type="checkbox"/>	Compresor 10 : 65-GC-010
	<input type="checkbox"/>	Compresor 11 : 65-GC-011