

**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS**

**ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE ACTIVOS SECTOR MINA PARA  
LA IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS EN MINERA  
PAICAVÍ**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**ELIAS FRANCISCO VENEGAS TAPIA**  
**PROFESOR GUÍA**  
**SR. FRANCISCO ANDRÉS FUENTES SALCEDO**

**CURICÓ – CHILE**  
**2022**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA  
DIRECCIÓN  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS  
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

## RESUMEN

Actualmente, la minera Paicaví, no realiza un mantenimiento adecuado para los diferentes equipos que operan en el sector mina, lo que, ante cualquier falla, puede generar la paralización total o parcial de la producción, lo que podría llegar a transformarse en pérdidas a nivel económico, ambientales y de salud.

El objetivo principal de este trabajo corresponde a la identificación del o los equipos más críticos del sector mina de la minera Paicaví, a través de un análisis de criticidad basado en el riesgo y un análisis de modos y efectos da falla, para generar recomendaciones de mantenimiento.

Para esto, se realizó un estudio sobre bases teóricas y un levantamiento de información en un periodo de 4 meses a equipos asociados al proceso mina de la minera Paicaví, para la obtención de una base de datos.

Obtenida la base de datos, se aplicó la metodología de la matriz de criticidad por riesgo, considerando variables de frecuencia de falla y consecuencias de los procesos, obteniendo la criticidad asociada a cada proceso dentro del sector mina de la minera Paicaví.

Con los resultados anteriores, se procedió a la aplicación del análisis de Pareto, para la identificación de los modos de falla más críticos de cada uno de los equipos, considerando variables de falla de los equipos y tiempo de detención.

Para obtener un análisis más a fondo, se optó por la realización de un diagrama de dispersión Jack Knife para cada uno de los equipos, considerando variables de número de fallas y tiempo medio de reparación, con el objetivo de identificar los modos de falla, dentro de las regiones leve, aguda, crónica y crónica-aguda

Para finalizar, con el análisis anterior, se seleccionó como equipo más crítico el Scoop Wagner y se realizó un análisis de modo y efectos de fallo (AMEF), respecto al sistema y sus equipos, para la generación de recomendaciones y acciones correctivas, que puedan ser utilizadas por la minera para la creación de planes de mantenimiento.

Palabras clave: Mantenimiento, Análisis de Criticidad, Matriz de criticidad, Análisis de Pareto, Jack Knife, Equipo Critico y AMEF.

## ABSTRACT

Currently, the Paicaví mining company does not carry out adequate maintenance for the different groups that operate in the mining sector, which, in the event of any failure or problem, can generate a total or partial stoppage of production. Additionally, this could be transformed into economic, environmental, and health losses.

For that reason, the main objective of this work corresponds to the identification of the most critical equipment in the mining sector of the Paicaví mining company. This will be carried out through an analysis of criticality based on risk and an analysis of failure modes and effects, to generate effective maintenance recommendations for the Paicavi mining company.

For this, a study was carried out on theoretical bases, and a survey of information in 4 months to the groups associated with the mining process of the Paicaví mining company, to obtain a database.

Once the database was obtained, the methodology of the criticality matrix was applied by risk, considering variables of frequency of failure and consequences of the processes, obtaining the criticality associated with each process within the mining sector of this mining company.

With the previous results, the Pareto analysis was applied, for the identification of the most critical failure modes of each of the equipment, considering variables of failure and detention time.

To obtain a more in-depth analysis, it was decided to make the Jack knife diagram of dispersion for each of the groups, considering variables of number of failures and average repairing time, to identify the failure modes, within the mild, acute, chronic, and chronic-acute regions.

Finally, with the previous analysis, the most critical equipment was selected: Scoop Wagner, and an FMEA failure mode and effects analysis

were performed, having in mind the system and its teams, for the generation of accurate recommendations and actions for corrective measures, which can be used by the mining company to create plans for their maintenance.

Keywords: Maintenance, Criticality Analysis, Criticality Matrix, Analysis of Pareto, Jack Knife, Critical Team, and FMEA.

## AGRADECIMIENTOS

Muchas gracias a mis padres Danilo Venegas y Yessica Tapia, que me han apoyado durante todo el proceso universitario y en mi vida, no pude haber hecho esto sin ustedes, espero llegar algún día a ser tan bueno como ustedes.

A mis hermanos y abuela, que han estado apoyándome desde el colegio en mis decisiones, estudios y vida, además de la motivación en los días feos.

A Yennifer Alcaino, por apoyarme y aguantarme en el proceso universitario que fue difícil para ambos.

A mis amistades formadas durante todo el proceso universitario.

Al Sr Francisco Fuentes, por el apoyo como profesor guía, durante la realización de la memoria y el tiempo dedicado.

A Sr Francisco Rivas, por darme el puntapié inicial para la selección de mi tema de memoria, el apoyo para las visitas a terreno y la motivación durante mi paso por la universidad.

Por último, a la minera Paicaví, por permitir la realización del estudio en su minera.

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 1  |
| 1.1 Antecedentes y motivación.....                                  | 1  |
| 1.2 Descripción del problema .....                                  | 2  |
| 1.3 Solución propuesta.....   | 2  |
| 1.4 Objetivos .....   | 2  |
| 1.4.1 Objetivo general.....   | 2  |
| 1.4.2 Objetivos específicos .....                                   | 3  |
| 1.5 Alcances.....   | 3  |
| 1.6 Proceso mina .....  | 3  |
| 1.7 Metodologías y herramientas utilizadas.....                     | 4  |
| 1.8 Resultados esperados.....                                       | 4  |
| 2. DESARROLLO DEL TEMA.....   | 6  |
| 2.1 Mantenimiento .....   | 6  |
| 2.2 Tipos de mantenimiento .....                                    | 6  |
| 2.2.1 Mantenimiento correctivo.....                                 | 6  |
| 2.2.2 Mantenimiento preventivo.....                                 | 7  |
| 2.2.3 Mantenimiento predictivo.....                                 | 7  |
| 2.2.4 Mantenimiento cero horas .....                                | 7  |
| 2.2.5 Mantenimiento en uso.....                                     | 7  |
| 2.3 Evolución del mantenimiento.....                                | 8  |
| 2.3.1 La primera generación de mantenimiento.....                   | 8  |
| 2.3.2 La segunda generación de mantenimiento .....                  | 8  |
| 2.3.3 La tercera generación.....                                    | 9  |
| 2.4 Norma ISO 9001-2008.....  | 10 |
| 2.5 Norma ISO 55000-2014 .....                                      | 10 |
| 2.6 Ingeniería y gestión del mantenimiento .....                    | 11 |
| 2.7 Estructura organizacional, niveles de gestión y objetivos ..... | 12 |
| 2.8 Análisis de criticidad .....                                    | 13 |
| 2.8.1 Proceso de análisis de criticidad de los equipos.....         | 15 |
| 2.8.2 Análisis cualitativo-cuantitativo.....                        | 16 |
| 2.9 Análisis de Pareto.....   | 18 |
| 2.9.1 ¿Cómo realizar un análisis de Pareto? .....                   | 19 |
| 2.10 Método de análisis Jack-Knife.....                             | 20 |
| 2.10.1 Cuadrante agudo .....  | 22 |

|  |    |
|--|----|
| 2.10.2 Cuadrante Crónico-Agudo .....                                   | 22 |
| 2.10.3 Cuadrante crónico.....  | 22 |
| 2.10.4 Cuadrante leve.....   | 22 |
| 2.11 Análisis de modos y efectos de falla (AMEF) .....                 | 22 |
| 3. METODOLOGÍA.....  | 27 |
| 3.1 Matriz de criticidad basada en el Riesgo .....                     | 29 |
| 3.2 Pareto.....  | 29 |
| 3.3 Jack-Knife .....   | 30 |
| 3.4 Análisis de Modo y Efectos de Falla (AMEF).....                    | 30 |
| 4. RESULTADOS .....  | 31 |
| 4.1 Registros de fallas de los equipos.....                            | 31 |
| 4.2 Consecuencia de las fallas de los Equipos.....                     | 32 |
| 4.3 Aplicación de la Matriz de criticidad basa en el riesgo .....      | 32 |
| 4.4 Diagrama de Pareto.....  | 35 |
| 4.5 Jack knife .....   | 39 |
| 4.5.1 Realización del diagrama de Jack Knife .....                     | 39 |
| 4.6 Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF).....                   | 43 |
| 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....   | 47 |
| 5.1 Registros de fallas de los equipos.....                            | 47 |
| 5.2 Matriz de criticidad basa en el riesgo.....                        | 47 |
| 5.3 Diagrama de Pareto.....  | 47 |
| 5.4 Jack knife .....   | 49 |
| 5.5 Análisis de modos y efectos de falla (AMEF) y recomendaciones..... | 52 |
| 6. CONCLUSIONES.....   | 54 |
| 7. REFERENCIAS .....   | 56 |
| 8. APÉNDICE .....  | 58 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Ubicación Proyecto Chépica Flanco oriental Cordillera de la Costa .....                                  | 1  |
| Figura 2.1: Crecimiento de las expectativas del mantenimiento .....  | 10 |
| Figura 2.2: Ciclo de trabajo de mantenimiento .....  | 12 |
| Figura 2.3: Objetivos según jerarquía organizacional .....   | 13 |
| Figura 2.4: Ejemplo con factores ponderados .....  | 17 |
| Figura 2.5: Matriz de Criticidad.....  | 18 |
| Figura 2.6: Ejemplo para análisis de Pareto. ....  | 19 |
| Figura 2.7: Ejemplo de análisis de Pareto. ....  | 20 |
| Figura 2.8: Representación gráfica de dispersión Jack-Knife .....  | 21 |
| Figura 3.1 Pareto de tiempo de inactividad eléctrica imagen referencial.....   | 29 |
| Figura 4.1: Gráfico de horas de detención del equipo por intervenciones.....   | 31 |
| Figura 4.2: Gráfico de Pareto de perdidas por falla Scoop Wagner. ....   | 36 |
| Figura 4.3: Gráfico de Pareto de perdidas por falla Scoop France Loader.....   | 36 |
| Figura 4.4: Gráfico de Pareto de perdidas por falla Retroexcavadora.. ....   | 37 |
| Figura 4.5: Gráfico de Pareto de perdidas por falla Jack leg.....  | 37 |
| Figura 4.6: Gráfico de Pareto de perdidas por falla compresor.....   | 38 |
| Figura 4.7: Gráfico de Pareto de perdidas por falla camión tolva. ....   | 38 |
| Figura 4.8: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR Scoop Wagner iso .....                 | 40 |
| Figura 4.9: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR Scoop France Loade iso. ....           | 41 |
| Figura 4.10: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR Retroexcavadora iso.....              | 41 |
| Figura 4.11: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR Jack leg iso.....                     | 42 |
| Figura 4.12: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR compresor iso.....                    | 42 |
| Figura 4.13: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR camión tolva iso. ....                | 43 |
| Figura B.1: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR Scoop Wagner. ....        | 59 |
| Figura B.2: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR Scoop France Loader. .... | 60 |
| Figura B.3: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR Retroexcavadora.....      | 60 |
| Figura B.4: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR Jack leg. ....            | 61 |



|   |    |
|---|----|
| Figura B.5: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR compresor. ....    | 61 |
| Figura B.6: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR camión tolva. .... | 62 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.1: Clasificación de la gravedad del modo de fallo .....                               | 24 |
| Tabla 2.2: Clasificación de la frecuencia/ probabilidad de ocurrencia del modo de fallo ..... | 25 |
| Tabla 2.3 Clasificación de la facilidad de detección del modo de fallo .....                  | 25 |
| Tabla 2.4 Formato formulario AMEF .....   | 26 |
| Tabla 4.1 Escala de criticidad .....  | 34 |
| Tabla 4.2 Matriz de criticidad asociada a los procesos minera Paicaví .....                   | 34 |
| Tabla 4.3 Aplicación de la matriz de criticidad.....  | 35 |
| Tabla A.1 Especificaciones fallas del Scoop Wagner .....                                      | 58 |
| Tabla A.2 Especificaciones fallas del Scoop France Loader .....                               | 58 |
| Tabla A.3 Especificaciones fallas Retroexcavador.....   | 58 |
| Tabla A.4 Especificaciones fallas Jack Le .....   | 58 |
| Tabla A.5 Especificaciones fallas Compresor .....   | 58 |
| Tabla A.6 Especificaciones fallas Camión Tolva .....  | 59 |

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes y motivación

El proyecto Chépica propiedad de Minera Paicaví S.A., Ubicado en la región del Maule a 25 km de Talca (Figura 1.1), consiste en 5 concesiones que abarcan un total de 1390 hectáreas en una franja rica en depósitos epitermales de oro – plata – cobre del Mesozoico que se extiende desde la Región Metropolitana hasta el Maule, consta con 3 minas subterráneas (Colin, Chépica I y Chépica II) y trabaja con diferentes equipos para la extracción del material. (Rivas Saldaña & Gattas Beher , 2020).

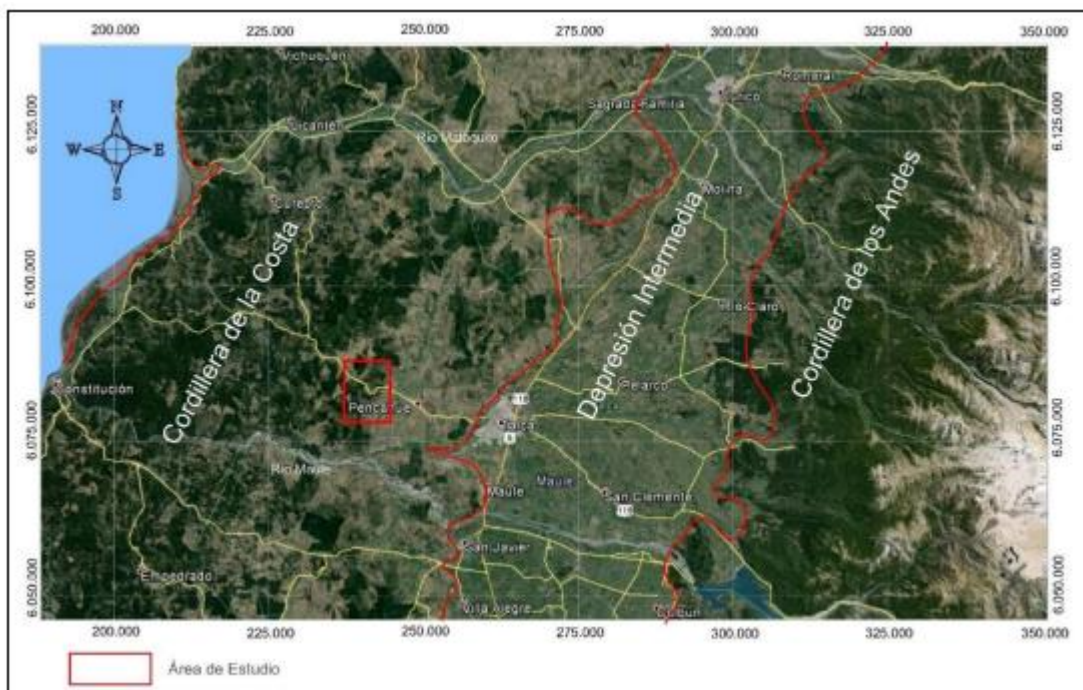


Figura 1.1: Ubicación Proyecto Chépica Flanco oriental Cordillera de la Costa (Rivas Saldaña & Gattas Beher , 2020).

Minera Paicaví actualmente no realiza un mantenimiento correspondiente para el funcionamiento óptimo y seguro de los equipos que maneja, lo que genera muchas complejidades a la hora de la ocurrencia de fallas.

El mantenimiento es esencial para mantener o restaurar algún activo, con la finalidad de que pueda cumplir la función requerida, por otro lado, a nivel industrial, el uso excesivo de un equipo que no tenga ningún tipo de mantenimiento genera

diferentes problemáticas, las cuales aumentan y encarecen a medida que pasa el tiempo, lo que además de disminuir la confiabilidad y aumentar la probabilidad de falla, presenta un riesgo para los trabajadores, pérdidas económicas, retraso en la producción, entre otros.

## **1.2 Descripción del problema**

Actualmente el área de mantenimiento de minera Paicaví solo está trabajando con mantenimiento correctivo (definido como la corrección de los defectos que se van presentando en los distintos equipos comunicados por los mismos usuarios) para los diferentes equipos del área mina. Estos equipos se van reparando a medida que se presentan fallos, los cual no tienen ningún tipo de orden ni método de mantenimiento. Esto, ante cualquier fallo, pueden generar la paralización de la producción, lo que significa una enorme pérdida económica, además de aumentar el riesgo para el personal que se encuentre operando estos equipos, con consecuencias y daños irreparables

## **1.3 Solución propuesta**

Para esta problemática, se ha optado a realizar un análisis de criticidad al área mina de la Minera Paicaví, con el objetivo de obtener una jerarquización de los equipos más críticos, a través de un análisis cualitativo-cuantitativo para obtener una visión más amplia de problemas e identificar los equipos que afecten mayormente la disponibilidad, confiabilidad, tiempo de detención y salud, con el objetivo de priorizarlo para reducir y evitar paradas extendidas de producción. Además de la realización de un análisis de modo y efectos de falla al equipo más crítico, para poder generar acciones correctivas como recomendación a la minera.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

-Realizar un estudio para la identificación del equipo más crítico del sector mina de minera Paicaví, a través de un análisis de criticidad basado en riesgo y un análisis de modos y efectos de falla, con el objetivo de generar recomendaciones de mantenimiento en esta área para su optimización.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Realizar un estudio sobre bases teóricas, estudio bibliográfico del análisis de criticidad y creación de base de datos.
- Jerarquizar los equipos del sector mina, de manera cualitativa-cuantitativa a través de matriz de criticidad.
- Determinar el o los problemas de mayor importancia de equipos crítico y semicríticos a través de un análisis de Pareto.
- Aplicar la metodología de diagramas de dispersión Jack Knife a los equipos críticos y semicríticos obtenidos a través del análisis de Pareto.
- Realizar análisis de modo y efectos de falla al equipo con mayor valoración de criticidad, además de recomendaciones de mantenimiento.

### **1.5 Alcances**

Los equipos que se analizarán para este estudio se limitan a la zona mina de Minera Paicaví, específicamente, perforación, carguío y transporte. Estos cuentan con los equipos de compresor Clemsa PDS390S, perforadora Jack leg YT28, ventiladores ZIEBTEC, Scoop France, Scoop Wagner y camión tolva CAT.

Se realizará un análisis de criticidad que generará una jerarquización de los equipos del sector mina de Paicaví, además de un análisis de modos y efectos de falla solo al equipo que tenga una mayor valoración de criticidad, no se realizará un plan de mantenimiento, ni se considerarán aspectos económicos.

Minera Paicaví no tiene conflictos de interés por la posterior publicación de los resultados.

### **1.6 Proceso mina**

El proceso de extracción de minera Paicaví, comienza con el análisis de la disposición de las perforaciones y su dirección para hacer seguimiento de la veta a través de ayuda geológica especializada. Posterior a esto, comienza el proceso de perforación, donde se prepara el compresor Clemsa PDS390S para extender líneas de aire hacia las perforadoras manuales Jack leg YT28, las cuales son operadas por personal autorizado para generar una malla de perforación correspondiente y dar paso a la siguiente etapa de carguío de explosivos, donde se utiliza principalmente anfo (nitrato

de amonio y combustible derivado del petróleo) y emulsiones. Luego de la tronadura, es necesario ventilar la mina, por los gases tóxicos que se liberan en la explosión, por lo que se utiliza un ventilador eléctrico y uno hidráulico ZIEBTEC para poder circular los gases fuera de la minera. Lo que da paso al carguío para extraer el material fuera de la mina, con la ayuda de los equipos Scoop France y Scoop Wagner para ser cargado por la retroexcavadora CAT en el camión tolva, el cual comienza el transporte hacia la planta de procesamiento.

## **1.7 Metodologías y herramientas utilizadas**

La metodología que se utilizará para la investigación consta de 5 partes:

-Realizar un estudio sobre bases teóricas y análisis bibliográfico respecto al modelo de análisis de criticidad, donde se buscará y recopilará información específica de ideas, conceptos, opiniones, etc. Además de la creación de una base de datos.

- Analizar la criticidad de los equipos y determinar cuál es su estado crítico real para su posterior clasificación, mediante la estimación de sus frecuencias de fallas basado en los datos históricos.

-Realizar un análisis de Pareto respecto al equipo o equipos que resulten con valoración crítica y semicritica de la matriz de criticidad.

-Se realizará un diagrama de dispersión Jack Knife para los equipos críticos y semicriticos para obtener una visión más a fondo de la criticidad de los equipos.

-Realizar análisis AMEF a él o los equipo con valoración más crítica, para dar recomendaciones de mantenimiento.

## **1.8 Resultados esperados**

Se espera obtener como resultado una jerarquización de los equipos del área mina de la minera Paicaví con respecto a su estado, a través de la aplicación de la metodología de análisis de criticidad. La identificación de las fallas más críticas que puedan generar un mayor impacto dentro del proceso mina y un análisis de modo y efectos de fallas,

para poder informar a la minera donde enfocar los recursos de mantenimiento en el equipo y sus fallos, para poder reducir el tiempo de detención del proceso mina.

## **2. DESARROLLO DEL TEMA**

### **2.1 Mantenimiento**

La ingeniería considera dos elementos que preservan cualquier activo físico, uno de estos, es que debe ser mantenido y el segundo si existe la necesidad, debe ser modificado.

Existen variadas definiciones de mantenimiento, alguno de los diccionarios más importantes lo definen como “acción y efecto de mantener o mantenerse” (Española, s.f.) o “conjunto de operaciones necesarias para el funcionamiento correcto de algo” (Dictionary, s.f.), lo que se puede diferenciar de la modificación, la cual se define como “transformar o cambiar algo mudando alguna de sus características” (Española, s.f.) o “un cambio en algo, generalmente para mejorarlo” (Dictionary, s.f.). Cuando queremos que algo se mantenga a través del tiempo, nos preguntamos si está trabajando de manera correcta o si queremos que se mantenga realizando una tarea de manera óptima. Por eso al pensar en mantener un activo, se debe preservar su estado, para que pueda continuar cumpliendo las necesidades del usuario. Se puede definir, de una manera más clara, que el mantenimiento es asegurar que los activos físicos continúen realizando las tareas que los usuarios requieran a través de un conjunto de técnicas, para buscar el máximo rendimiento.

### **2.2 Tipos de mantenimiento**

Dentro del área de mantención existe una división de tipos de mantenimiento las cuales emplean diferentes métodos dependiendo el trabajo que se va a realizar, principalmente, se distinguen 5 de estos (Garrido, 2003).

#### **2.2.1 Mantenimiento correctivo**

Este mantenimiento se define principalmente por el conjunto de tareas destinadas a la corrección de los defectos que se van presentando de manera incierta en los distintos equipos, además las fallas son comunicadas al departamento de mantenimiento de manera directa por los mismos usuarios de los equipos (Garrido, 2003).



### **2.2.2 Mantenimiento preventivo**

Es el mantenimiento que tiene como principal objetivo mantener un nivel alto de disponibilidad para los diferentes equipos, además de disminuir la cantidad de fallas inesperadas, programando las correcciones de los puntos más vulnerables en el momento más oportuno (Garrido, 2003).

### **2.2.3 Mantenimiento predictivo**

Este mantenimiento es el más técnico de los anteriormente mencionados, donde su objetivo principal es mantener un conocimiento e informar el estado y operatividad de los equipos, mediante el manejo de valores de diferentes variables representativas del estado y la operatividad. Para llegar a aplicar este mantenimiento es necesario identificar diferentes variables físicas (temperatura, vibraciones, consumo de energía, presión, etc.) cuyas variaciones en cierto rango, representen algún indicio de falla que pueda estar ocurriendo en el equipo. Para este tipo de mantenimiento al ser más tecnológico, es necesario contar con medios técnicos más avanzados, además de un mayor conocimiento matemático, físico y técnicos (Garrido, 2003).

### **2.2.4 Mantenimiento cero horas**

Este mantenimiento corresponde a un conjunto de tareas cuyo objetivo es la revisión de los equipos en intervalos programados antes de que aparezca ningún fallo o bien al momento en que la confiabilidad del equipo ha disminuido considerablemente, donde el continuar realizando alguna tarea o revisión sobre su capacidad productiva es arriesgado. La revisión del equipo consiste como lo dice la definición, dejarlo a cero horas, un equipo trabajando casi nuevo, donde en las revisiones se sustituyen o se reparan todos los elementos que fueron sometidos a desgaste prolongando así un buen funcionamiento del equipo durante mayor tiempo (Garrido, 2003).

### **2.2.5 Mantenimiento en uso**

Este tipo de mantenimiento es uno de los más básicos que se pueden realizar, su

objetivo es tomar cierta información la cual es recolectada por los mismos usuarios de los equipos. Alguna de las tareas que se realizan para la inspección son inspecciones visuales, limpieza, lubricación, reapriete de tornillos, etc. Para esto no es necesario tener una gran formación, basta con un breve entrenamiento (Garrido, 2003).

## **2.3 Evolución del mantenimiento**

El mantenimiento ha tenido más cambios que cualquier otra disciplina gerencial, esto durante los últimos veinte años. Estos cambios se deben principalmente a un gran aumento en la variedad de los activos físicos que deben ser mantenidos alrededor de todo el mundo, diseños más complejos de equipos, nuevos métodos de mantenimiento y un cambiante modelo de organización del mantenimiento y sus responsabilidades, donde se amplía la visión de esta área, además de nuevas expectativas como lo son la seguridad, el medio ambiente y los resultados finales de los activos (Moubray, 2004).

### **2.3.1 La primera generación de mantenimiento**

Esta generación cubre hasta la II guerra mundial donde la mayoría de las industrias existentes no tenían una muy buena mecanización de sus equipos, estos eran simples, utilizados solo para realizar una función determinada, contaban con un número limitado de piezas y partes, lo que facilitaba aún más la tarea de mantenimiento, ya que tenían una alta confiabilidad, además de una fácil y rápida reparación (Moubray, 2004).

### **2.3.2 La segunda generación de mantenimiento**

Toma lugar durante la II guerra mundial, donde al estar en tiempos de guerra aumentaba la necesidad de producción de diferentes tipos de productos, sumado a que la mano de obra industrial disminuyó considerablemente, se necesitaba algo que pudiese cumplir con las necesidades. Esto llevó a un aumento de la mecanización de diferentes equipos donde, hacia el año 1950 ya se habían creado equipos que cumplían con las necesidades de las industrias. A causa de esto, se creó una dependencia de las industrias a los equipos mecanizados, los cuales, si

bien cumplían sus funciones correctamente, se hizo cada vez más notorio el tiempo de improductividad de estos, lo que llevó al nacimiento del concepto de mantenimiento programado, el consistía en realizar revisiones completas del equipo en intervalos de tiempo fijo (Moubray, 2004).

### **2.3.3 La tercera generación**

Nace a mediados de los años setenta por el crecimiento continuo de la mecanización, los equipos tienen un impacto más grande en la producción, costo total y en el servicio al cliente en diferentes industrias.

Lo que creó un mayor interés y una mayor demanda en el área de mantenimiento fue el hecho de tomar en cuenta que si fallaba una pequeña pieza de los equipos podría llegar a paralizar toda la producción, además de que, al generar una mayor automatización de los equipos, el producto final y la calidad dependía del estado en el que se encontraba (Moubray, 2004).

Además de las nuevas expectativas, para estos tiempos se considera la nueva investigación, lo que está cambiando y continuará cambiando las creencias más básicas y los modelos de mantenimiento, que se hace más evidente actualmente en la menor conexión que existe entre el tiempo de funcionamiento de un equipo y la probabilidad de que este pueda fallar (Moubray, 2004).

A medida que se avanza la industria, también lo hace el mantenimiento, evolucionando sus expectativas, lo cual se puede apreciar en la figura 2.1.

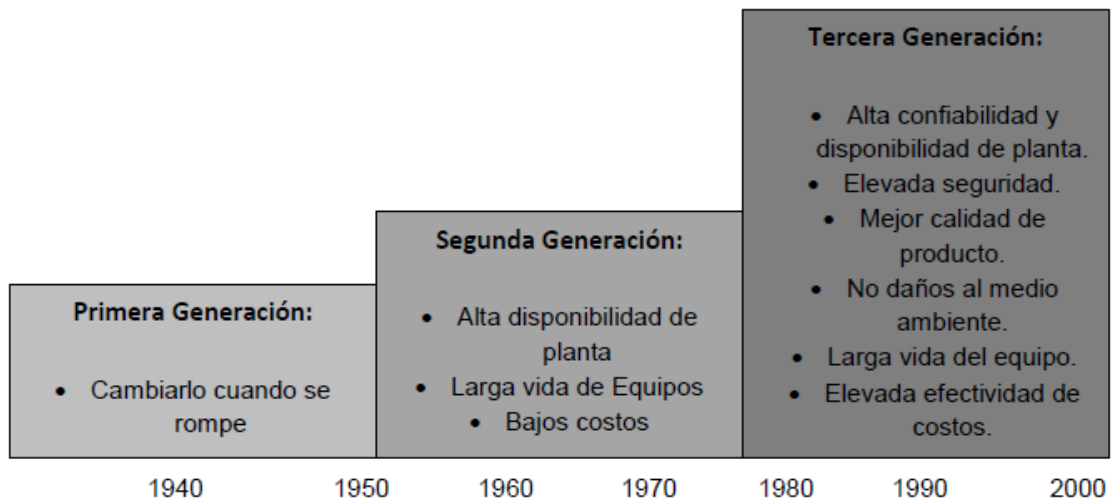


Figura 2.1: Crecimiento de las expectativas del mantenimiento (Moubray, 2004)

## 2.4 Norma ISO 9001-2008

“Esta Norma Internacional promueve la adopción de un enfoque basado en procesos cuando se desarrolla, implementa y mejora la eficacia de un sistema de gestión de la calidad, para aumentar la satisfacción del cliente mediante el cumplimiento de sus requisitos”. (ISO, ISO, 2008).

Se necesitan gestionar numerosas actividades para mantener en funcionamiento una organización, y de manera eficaz. Una actividad o el conjunto de tareas que se gestiona para permitir que los elementos se transformen en resultados, se puede considerar como un proceso, el cual frecuentemente servirá de entrada para el siguiente proceso. (ISO, ISO, 2008)

## 2.5 Norma ISO 55000-2014

Esta norma provee los aspectos generales para la gestión de activos y sistemas de gestión de activos utilizando un proceso estructurado, eficaz y eficiente que conduce a la mejora continua y a la creación de valor en ejecución al gestionar costos, desempeño y riesgos. Además, al ser una norma que se enfoca principalmente en la necesidad de un sistema de gestión, no necesita requisitos financieros contables o técnicos. (ISO, ISO 55000, 2014)

## **2.6 Ingeniería y gestión del mantenimiento**

El concepto proviene de la mejora continua del proceso de gestión del mantenimiento mediante el conocimiento, inteligencia y análisis a la hora de tomar decisiones, para mejorar resultados económicos y operacionales dentro de la organización (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

La ingeniería de mantenimiento permite renovar continua y justificadamente la estrategia, programación y planificación de actividades para garantizar la producción y resultados económicos al mínimo costo global. Además de la adecuada selección de nuevos equipos para evitar costos por la ineficiencia o por pérdidas de oportunidad por pérdida de producción (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

En base a la Norma ISO 9001-2008 y características reales de las unidades de mantenimiento se establece un diagrama de ciclo de trabajo continuo (figura 2.2), el cual representa la secuencia lógica del proceso táctico-operativo de las actividades de mantenimiento (planificación, programación, asignación de tareas/trabajos, y la ejecución correspondiente). Además de la representación de un ciclo de mejora continuo agregando dos nuevas tareas, el proceso de análisis de lo ya ejecutado para la búsqueda de oportunidades de mejora y el proceso de identificación de las tareas necesarias para cumplir con dichas mejoras. Por otro lado, dependiendo del nivel de emergencia de la mejora, se podrá saltar directamente de la identificación a el proceso de asignación de trabajo (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

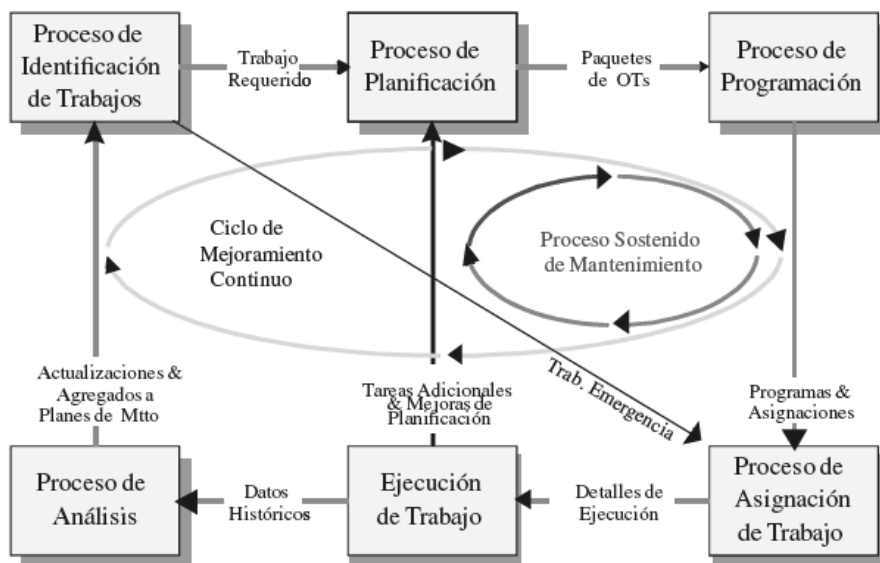


Figura 2.2: Ciclo de trabajo de mantenimiento (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013)

## 2.7 Estructura organizacional, niveles de gestión y objetivos

Los objetivos del mantenimiento son metas asignadas y aceptadas las cuales necesitan de las actividades de mantenimiento, estas pertenecen a diferentes niveles de control, desde el estratégico, hasta el operacional, lo cual definirá y direccionará el plan organizacional para el alcance de los objetivos (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013). En la figura 2.3 se representa la jerarquía de los objetivos y metas, además de aspectos fundamentales para la toma de decisiones. El flujo de decisiones y objetivos estratégicos, tácticos y operativos, siguen un formato Top-Down donde se inicia desde el nivel superior hasta el nivel operativo y de ejecución, sin embargo, la información necesaria para alimentar la toma de decisiones comienza desde la base, dando un soporte empírico a las decisiones.

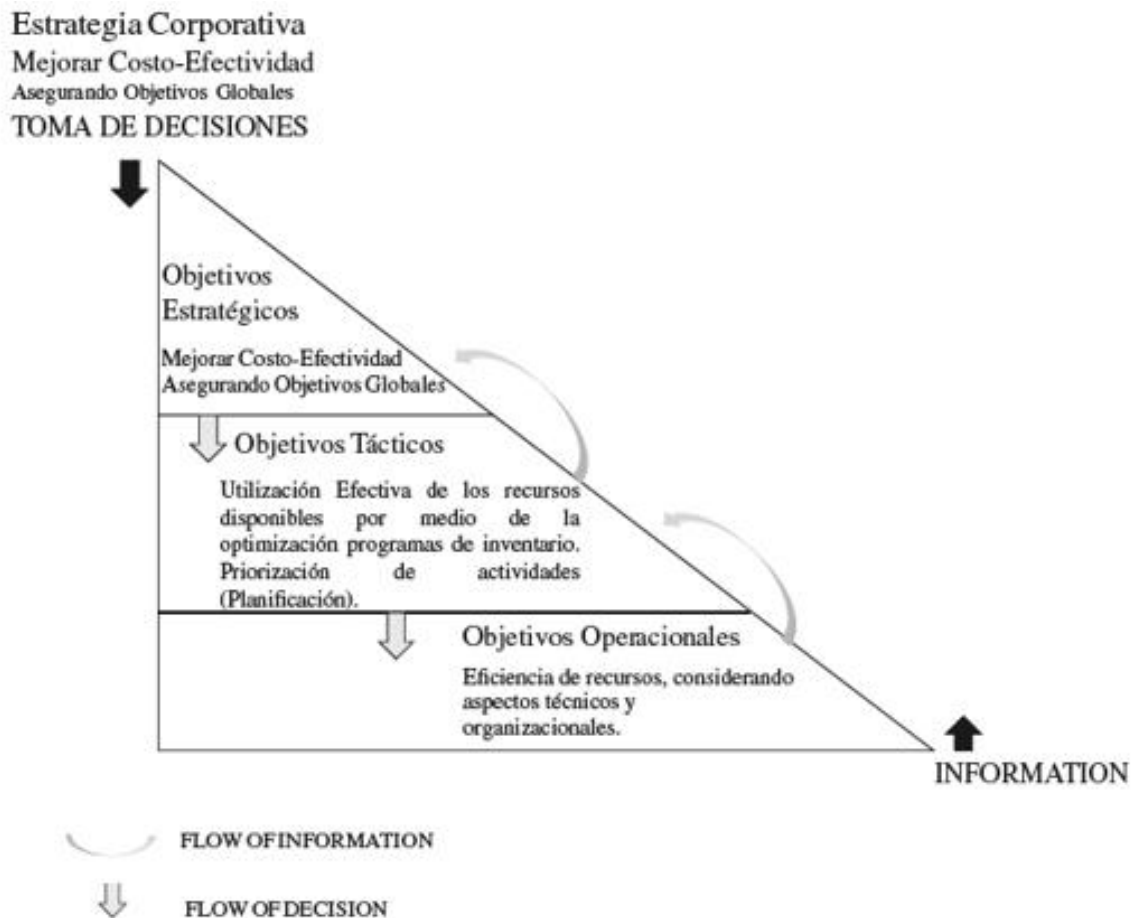


Figura 2.3: Objetivos según jerarquía organizacional (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013)

## 2.8 Análisis de criticidad

Dentro de las industrias, los equipos no siempre tienen una misma importancia, en la mayoría de los casos, existen equipos más importantes que otros. Dado que los recursos de una industria no son ilimitados, se necesita concentrar la mayor parte de estos en los equipos que se consideren o se definan más importantes, dejando una menor cantidad de recursos a los equipos que su falla, no afectaría de una manera tan significativa al proceso.

Si bien se tienen que seleccionar los equipos a los cuales se les destinara más recursos para su mantenimiento, se debe primero identificarlos y al momento de realizar o intentar diferenciar estos equipos, se está realizando un análisis de criticidad, donde se pueden diferenciar diferentes niveles:

A.-Equipos críticos: Los cuales su detención o mal funcionamiento afectan de una manera significativa a los resultados de la empresa.

B.-Equipos importantes: Cuya detención, avería o falla, afecta significativamente al mal funcionamiento de la empresa, que representa consecuencias que pueden ser asumibles.

C.-Equipos prescindibles: Cuya detención o mal funcionamiento no representan una mayor problemática para los resultados del proceso, a lo más podría generar alguna pequeña alteración que podría generar un pequeño coste adicional.

Si bien existen estas 3 categorías, algunas empresas optan por incluir una categoría más, la cual representa a los equipos altamente críticos.

Además de esto, se debe tener en consideración la mirada corporativa que tiene la empresa ante la criticidad, la cual pueden variar entre:

- Naturaleza y tipos de incertidumbre que pueden afectar a los resultados y objetivos.
- Cómo se van a definir y medir las consecuencias.
- Los factores relacionados con el tiempo.
- Coherencia en el uso de las mediciones.
- Cómo se va a determinar el nivel de riesgo.
- Cómo se tendrán en cuenta las combinaciones y las secuencias de múltiples riesgos.
- La capacitación de la organización.

Por otro lado, se deben identificar los riesgos donde la organización puede utilizar un rango de técnicas para la identificación de las incertidumbres que pueden afectar a uno o varios objetivos. Se deberían considerar los siguientes factores:

- Fuentes de riesgos tangibles e intangibles.
- Causas y eventos.



- Amenazas y oportunidades.
- Vulnerabilidades y capacidades.
- Cambios en los contextos externos e internos.
- Indicadores de riesgos emergentes.
- Naturaleza y valor de los activos y recursos.
- Consecuencias e impactos en los objetivos.
- Limitaciones de conocimiento y la confiabilidad de la información.
- Factores relacionados con el tiempo.
- Sesgos, supuestos y creencias de las personas involucradas.

Como se describe en (Norway, 2001) es un proceso de trabajo eficiente y racional que resulta en un programa de mantenimiento optimizado, basado en análisis de riesgo y principios de costo-beneficio.

Por un lado, se evalúan las consecuencias de fallas del sistema, pérdida de funciones principales y subfunciones, las cuales son independientes de los equipos que realizan las funciones.

Por el otro lado, se evalúa el equipo real y las condiciones operativas que afectan a la probabilidad de falla.

De manera general las consecuencias y probabilidades de falla se evalúan de forma independiente (Norway, 2001). Luego de la clasificación de los equipos por criticidad, se genera una contabilización respecto a las distintas criticidades, se crea una matriz donde se trabaja sobre los equipos y sus componentes, además en función de esta, se genera una criticidad y categorización de los equipos y sus componentes.

### **2.8.1 Proceso de análisis de criticidad de los equipos**

El análisis de criticidad en otras palabras define de manera jerárquica los procesos, sistemas y/o equipos, a través de un conjunto de metodologías, según el parámetro de valor conocido como criticidad, el cual es proporcional al riesgo, generando una estructura que facilita la toma de decisiones respecto a recursos técnico-económicos

en áreas que tienen mayor impacto en el negocio (Viveros Gunckel & Mena Bustos). Una vez definido objetivos, responsabilidades y se ha diseñado una estrategia de mantenimiento, es importante discretizar los activos físicos de la organización en base a un parámetro de criticidad, dependiendo del impacto en el sistema productivo (Viveros Gunckel & Mena Bustos).

Existen diferentes técnicas cualitativas, cualitativas-cuantitativas y cuantitativas para clasificar un activo como crítico (C), semicritico (SC) y no critico (NC) (Viveros Gunckel & Mena Bustos). En muchas ocasiones no se tiene información histórica de los cuales poder obtener índices probabilísticos de riesgo activo, en estos casos es posible utilizar técnicas de naturaleza más cualitativa con el objetivo de ir garantizando niveles iniciales adecuados de efectividad en las operaciones de mantenimiento (Viveros Gunckel & Mena Bustos).

### **2.8.2 Análisis cualitativo-cuantitativo**

Este modelo involucra diferentes datos para la generación de una guía de criticidad cuantificada según: frecuencia de falla, impactos en la producción (por falla), costos de reparación, tiempo de reparación, impactos en seguridad personal e impacto ambiental. El factor cualitativo se puede apreciar en la escala o criterio de los resultados de los ítems, y la definición final de la jerarquización de criticidad (Viveros Gunckel & Mena Bustos).

La criticidad o Riesgo está definida como el producto de la frecuencia por la consecuencia de la falla (ecuación 2.1). La frecuencia es el número de fallas en un determinado tiempo. Para cuantificar las consecuencias de las fallas (ecuación, se ponderan varios factores en función de las necesidades de la organización (Viveros Gunckel & Mena Bustos).

$$Riesgo = F \times C \quad (Ecuación 2.1)$$

*F = Numero de fallas en un tiempo determinado*

$$\begin{aligned} Consecuencia = & (Impacto Operacional \times Flexibilidad) \\ & + Costos de Mantenimiento \\ & + impacto (Seguridad - Ambiente) \end{aligned} \quad (Ecuación 2.2)$$

Estos factores, son evaluados en reuniones, en las cuales participan diferentes personas involucradas en el contexto operacional (operaciones, mantenimiento, procesos, seguridad y ambiente) (Viveros Gunckel & Mena Bustos). Dichos factores se pueden ver a continuación en la figura 2.4, como ejemplo para cada criterio a ser evaluado por las ecuaciones.

| <b>Frecuencia de Falla</b>      |          |
|---------------------------------|----------|
| Pobre, Mayor a 10 fallas al año | <b>4</b> |
| Promedio, 4-6 fallas al año     | <b>3</b> |
| Buena, 1-2 fallas al año        | <b>2</b> |
| Excelente, 0-1 fallas al año    | <b>1</b> |

| <b>Costo de Mantenimiento</b> |          |
|-------------------------------|----------|
| Mayor o igual 20.000 USD      | <b>2</b> |
| Inferior a 20.000 USD         | <b>1</b> |

| <b>Impacto Operacional</b>   |           |
|--|-----------|
| Perdida Total  | <b>10</b> |
| Parada del sistema o subsistema y repercute en otros sistemas        | <b>7</b>  |
| Impacta en niveles de inventario o calidad                           | <b>4</b>  |
| No genera ningún efecto significativo sobre producción y operaciones | <b>1</b>  |

| <b>Impacto en Seguridad Ambiente</b>   |          |
|--|----------|
| Afecta la seguridad Humana Tanto Interna como externa y requiere la notificación a entes externos a la organización. | <b>8</b> |
| Afecta el ambiente/Instalaciones   | <b>7</b> |
| Afecta las instalaciones causando daños severos  | <b>5</b> |
| Provoca daños menores (ambiente - seguridad)   | <b>3</b> |
| No provoca ningún tipo de daño a persona, instalaciones o al ambiente.   | <b>1</b> |

| <b>Flexibilidad Operacional</b>                             |          |
|---|----------|
| No Existe opción de producción y no hay función de repuesto | <b>4</b> |
| Hay opción de repuesto compartido/almacén                   | <b>2</b> |
| Función de repuesto disponible                              | <b>1</b> |

Figura 2.4: Ejemplo con factores ponderados. (Viveros Gunckel & Mena Bustos)

Los activos ya jerarquizados en base a su criticidad se pueden traducir con la obtención de la matriz de criticidad, a modo de referencia se utiliza la figura 2.5 a continuación.

|            |   | MATRIZ DE CRITICIDAD |    |    |    |    |    |
|------------|---|----------------------|----|----|----|----|----|
|            |   | SC                   | SC | C  | C  | C  | C  |
| FRECUENCIA |   | SC                   | SC | SC | C  | C  | C  |
|            |   | SC                   | SC | SC | C  | C  | C  |
|            | . | NC                   | SC | SC | SC | C  | C  |
|            | . | NC                   | NC | SC | SC | SC | C  |
|            | 2 | NC                   | NC | NC | SC | SC | C  |
|            | 1 | NC                   | NC | NC | NC | SC | SC |
|            | N | 1                    | 2  | .  | .  |    |    |
|            |   | CONSECUENCIA         |    |    |    |    |    |
|            |   | 1                    | 2  | .  | .  |    | M  |

Figura 2.5: Matriz de Criticidad. (Viveros Gunckel & Mena Bustos)

Como se muestra en la figura 2.5 y como especifica (Romero Carranza & Jose) en un eje se representa la frecuencia de las fallas y en el otro los impactos o consecuencias en los cuales incurriría la unidad o equipo en estudio si le ocurre una falla.

## 2.9 Análisis de Pareto

El principio de Pareto dice que hay muchos problemas sin importancia frente a solo unos graves. Ya que, por lo general, el 80% de los resultados totales se originan en el 20% de los elementos. Mediante el Diagrama de Pareto se pueden detectar los problemas que tienen más relevancia. (Sales, 2013)

Este análisis se hace a través del diagrama de Pareto, el cual consiste en una gráfica donde se organizan diversas clasificaciones de datos por orden descendente de izquierda a derecha, dicho gráfico, se representa con barras sencillas después de haber reunido los datos para calificar las causas, de modo que se pueda asignar un orden de prioridades. (Sales, 2013)

### 2.9.1 ¿Cómo realizar un análisis de Pareto?

Primero se debe determinar el problema a estudiar y analizar cuáles son las causas o factores que lo provocan para recoger los datos correspondientes los cuales deben estar definidos en magnitud, además de identificar las variables a analizar y clasificándolas para su análisis. Posterior a esto, como se ve en la figura 2.6, se deben ordenar los datos de mayor a menor en función de la magnitud de cada uno de ellos, calculando la magnitud total del conjunto, el porcentaje total (ecuación 2.3) que representa cada factor y el acumulado de este. (Domenech Roldán ).

| objeto   | dato objeto | datos ordenados | % total | % acum. |
|----------|-------------|-----------------|---------|---------|
| objeto 1 | 2           | 6               | 29%     | 29%     |
| objeto 2 | 3           | 5               | 24%     | 52%     |
| objeto 3 | 6           | 3               | 14%     | 67%     |
| objeto 4 | 1           | 2               | 10%     | 76%     |
| objeto 5 | 2           | 2               | 10%     | 86%     |
| objeto 6 | 2           | 2               | 10%     | 95%     |
| objeto 7 | 5           | 1               | 5%      | 100%    |

Figura 2.6: Ejemplo para análisis de Pareto. Elaboración propia.

$$\text{Porcentaje total} = 100 \times \frac{\text{Horas de detención}}{\text{Valor total de horas de detención}} \quad (\text{ecuación 2.3})$$

Luego se dibujan dos ejes verticales y un eje horizontal. En el eje vertical izquierdo la magnitud de cada factor y en el derecho se representa el porcentaje acumulado de los factores. Por último, el eje horizontal muestra los factores o datos recolectados anteriormente, ordenados de manera que el de mayor importante este más cercano al eje vertical izquierdo, como se puede apreciar en la figura 2.7 (Domenech Roldán )

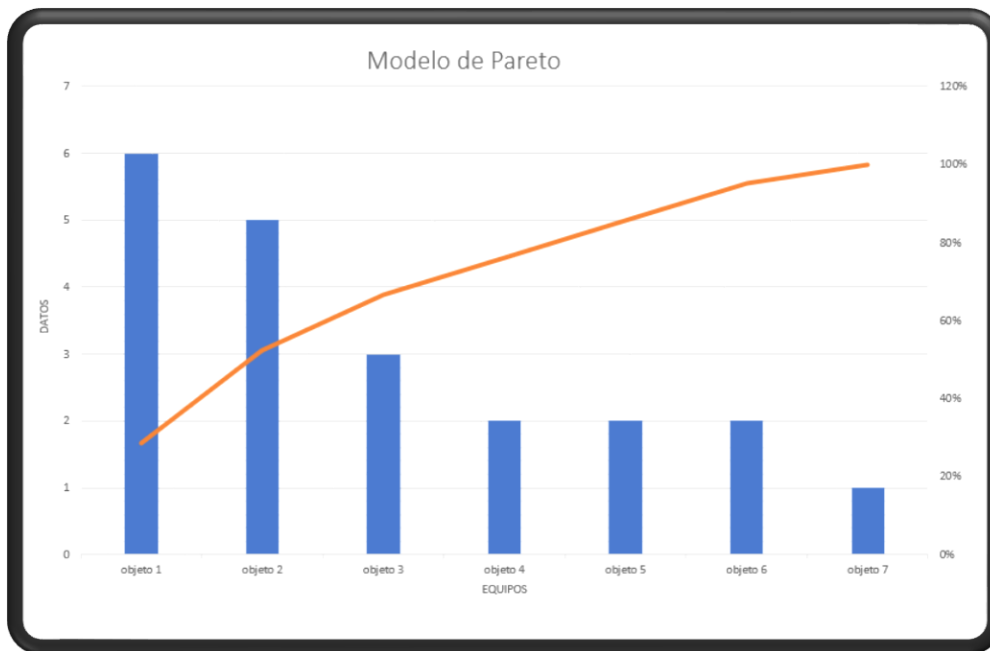


Figura 2.7: Ejemplo de análisis de Pareto. Elaboración propia.

## 2.10 Método de análisis Jack-Knife

Corresponde a un estudio de múltiples criterios de las variables involucradas en los modos de falla, tales como: frecuencia de ocurrencia de fallas, número de fallas, tiempo fuera de servicio (MTTR), costos asociados, entre otros. El método Jack-Knife corresponde a un mecanismo de análisis, el cual trabaja principalmente en dos dimensiones, las cuales corresponden a las variables a utilizar para el estudio. En el caso de estar trabajando con números de falla y tiempo fuera de servicio, al trazar líneas correspondientes al promedio de estas dos variables, se generarán cuatro cuadrantes, los que se pueden apreciar en la figura 2.8. Los modos de falla al caer dentro del primer cuadrante poseerán promedios de falla mayor al promedio (crónicos) y los tiempos promedio fuera de servicio, dentro del mismo cuadrante, poseerán un promedio superior al resto (agudos), clasificándolos como importantes en la escala de criticidad (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

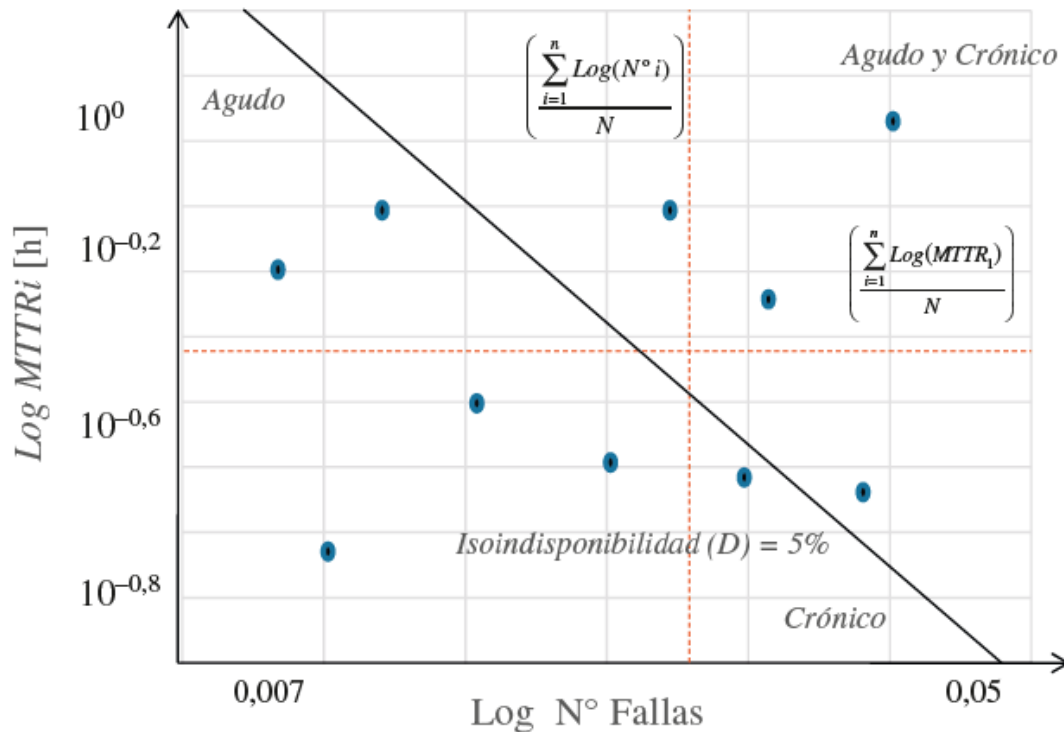


Figura 2.8: Representación gráfica de dispersión Jack-Knife (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013)

Para la creación del gráfico de dispersión, se utiliza el tiempo medio de reparación (ecuación 2.4) y los números de falla, por otro lado, mediante la ecuación 2.5, se puede obtener el tiempo medio entre fallas, mismo valor que utilizaremos en la ecuación 2.7 para el cálculo de la tasa de falla. Además, la ecuación 2.6, ilustra la indisponibilidad y las ecuaciones 2.8 y 2.9 los promedios del logaritmo de los números de falla y el tiempo medio de reparación.

$$MTTR_i = \text{Tiempo total de reparación} / \text{Fallas} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

$$N°_i = \text{Número de Intervenciones del Modo de falla } i$$

$$N = \text{Número de Modo de falla del Equipo o Sistema}$$

$$MTBF = \frac{\text{(Horas de operación en un determinado tiempo)}}{\text{(Total de fallas)}} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

$$\text{Indisponibilidad} = \text{N° de fallas} \times \text{MTTR} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

$$\text{Tasa de fallas} = 1 / \text{MTBF} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Log}(N^{\circ}_i)}{N}\right) = \text{Promedio del Logaritmo del Número de Intervenciones de los } N \text{ modos de falla.} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Log}(MTTR_i)}{N}\right) = \text{Promedio del Logaritmo del Tiempo Medio de Reparación de los } N \text{ modos de falla} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

### **2.10.1 Cuadrante agudo**

Aquel donde se agrupan los equipos que poseen un bajo número de fallas y un elevado MTTR, lo que significa una baja mantenibilidad.

### **2.10.2 Cuadrante Crónico-Agudo**

Este cuadrante representa a los equipos que poseen un alto número de fallas y elevado MTTR, lo que se traduce en equipos con baja mantenibilidad y confiabilidad.

### **2.10.3 Cuadrante crónico**

Se agrupan los equipos que poseen un alto número de detenciones y un bajo MTTR, en otras palabras, son las fallas o los equipos que poseen baja confiabilidad.

### **2.10.4 Cuadrante leve**

Es aquel donde se agrupan los equipos con bajos números de fallas y MTTR.

## **2.11 Análisis de modos y efectos de falla (AMEF)**

El Análisis de modos y efectos de falla es un método cualitativo que establece una lista de fallos con sus efectos, para su identificación, con el objetivo de generar cambios en el diseño, determinación de acciones de corrección o modificaciones en los procesos o equipos. (Dirección general).

El método AMEF ayuda a optimizar el tiempo y el costo en el proceso del producto, proceso o servicios al cual se aplica además de prevenir fallos potenciales que puedan tener. (Bestratén Bellovi, 2004).



Previo a la descripción de la metodología algunos aspectos importantes a conocer del AMEF se describen a continuación.

Producto: Pieza, conjunto de piezas, producto final obtenido de un proceso o incluso el mismo proceso. Dependiendo de la limitación del análisis (Bestratén Bellovi, 2004)

Frecuencia: Repetitividad u ocurrencia de un fallo. (Bestratén Bellovi, 2004)

Gravedad: Daño normalmente esperado que provoca el fallo en cuestión (Bestratén Bellovi, 2004)

Para la Realización del AMEF se debe seguir un orden y esquema definiendo principalmente a que va destinado, proyecto, producto o proceso, donde para cualquiera de los tres casos hay que seleccionar los elementos clave asociados al resultado esperado, el cual varía según la necesidad del usuario (Bestratén Bellovi, 2004).

Denominación del componente e identificación: Se debe identificar el producto o proceso y la identificación de los componentes o partes que se vayan a analizar.

Parte del componente Operación o función: Se debe incluir las partes del componente o proceso y sus subdivisiones, además de las funciones que realiza cada una de ellas.

Fallo o Modo de fallo: Se buscan modos de fallo potencial, los cuales se define como aquellos que pueden fallar al momento de cumplir con su función predefinida, requisitos y/o expectativas del usuario, donde se descarta el error humano como modo de fallo. Es recomendable numerarlos correlativamente.

Causas del modo de fallo: Las causas del modo de fallo se deben relacionar de manera directa con el origen de este. Dichas causas deberán relacionarse correctamente para poder tomar medidas correctivas ante la falla.

Gravedad: Determina la importancia y valoriza la consecuencia de cómo afecta el modo de fallo al usuario. El valor por determinar aumenta en función de la

insatisfacción del cliente, por disminución de rendimiento en producto o proceso y el costo de reparación asociados. Por otro lado, este valor se puede mejorar mediante acciones de diseño y no le afectaran acciones o controles que sean derivados de la aplicación del AMEF. Para esta valorización se diseña un cuadro como el de la tabla 2.1 que debe ser diseñado por cada empresa en función de sus productos o servicios, en números enteros con rangos normales de puntuación del 1 al 10, desde una leve insatisfacción hasta el caso más grave. En el caso donde la gravedad esté en rangos superior a 4 y la detectabilidad sea superior a 4, debe considerarse el fallo y las características que le corresponden como importantes.

Tabla 2.1: Clasificación de la gravedad del modo de fallo (Bestratén Belloví , Orriols Ramos, & Mata París, 2004).

| GRAVEDAD                          | CRITERIO  | VALOR |
|-----------------------------------|---|-------|
| Muy bajas, imperceptibles         | No se espera que este fallo de pequeña importancia origine un real efecto sobre el rendimiento del sistema, imperceptible.    | 1     |
| Bajas, repercusiones irrelevantes | El fallo generará un ligero inconveniente al cliente probablemente note un pequeño deterioro del sistema sin importancia.     | 2-3   |
| Moderada, relativa importancia    | El fallo produce cierto disgusto e insatisfacción en el cliente. Se observa deterioro en el rendimiento del sistema.          | 4-6   |
| Alta                              | El fallo puede ser crítico y verse inutilizado el sistema. Produce un grado de insatisfacción elevado.                        | 7-8   |
| Muy Alta                          | Fallo muy crítico que afecta el funcionamiento de seguridad del producto o proceso y/o involucra el incumplimiento de normas. | 9-10  |

Frecuencia: Es la probabilidad de que se produzca una causa potencial de fallo y dé lugar al modo de fallo. Una posible clasificación de esta frecuencia se muestra en la tabla 2.2, donde la única forma de reducir su índice es cambiando el diseño disminuyendo la probabilidad de que el fallo pueda ocurrir. Además, se aumenta o mejorar los sistemas de prevención y/o control que impiden que se produzca la causa de fallo.

Tabla 2.2: Clasificación de la frecuencia/ probabilidad de ocurrencia del modo de fallo (Bestratén Belloví , Orriols Ramos, & Mata París, 2004)

| FRECUENCIA           | CRITERIO  | VALOR |
|----------------------|---|-------|
| Muy Baja, Improbable | Ningún Fallo se asocia a procesos casi idénticos, ni se ha dado nunca en el pasado, pero es concebible.                   | 1     |
| Baja                 | Fallos aislados en procesos similares o casi idénticos. Es esperable pero poco probable que suceda.                       | 2-3   |
| Moderada             | Defecto aparecido ocasionalmente en procesos similares o previos al actual. Puede aparecer en la vida del equipo.         | 4-6   |
| Alta                 | El fallo se ha presentado con cierta frecuencia en el pasado en procesos similares o en previos procesos que han fallado. | 7-8   |
| Muy Alta             | Fallo casi inevitable. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente.  | 9-10  |

Controles actuales: Se definen los controles existentes actualmente para prevenir las causas de fallo en el sistema y detectar los efectos resultantes.

Detectabilidad: Índice que indica la probabilidad de que la causa y/o modo de fallo que ha aparecido, de detecte con anterioridad mediante los controles actuales para evitar daños. El índice de detectabilidad y el de riesgo será mayor a menor capacidad de detección, como se aprecia en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Clasificación de la facilidad de detección del modo de fallo (Bestratén Belloví , Orriols Ramos, & Mata París, 2004)

| DETECTABILIDAD | CRITERIO   | VALOR |
|----------------|--|-------|
| Muy Alta       | El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes.                                 | 1     |
| Alta           | El defecto, aunque sea obvio y fácilmente detectable, podría escapar a un primer control, pero sería detectado posteriormente. | 2-3   |
| Mediana        | El defecto es detectable y posiblemente no llegue al cliente. Posiblemente se detecte en los últimos estudios de producción.   | 4-6   |
| Pequeña        | El defecto es de tal naturaleza que resulta difícil detectarlo con los procedimientos establecidos hasta el momento.           | 7-8   |
| Improbable     | El defecto no puede detectarse. Casi seguro lo percibirá el cliente final.   | 9-10  |

Índice de prioridad de riesgo (IPR): Es el producto de los tres factores (Frecuencia, Gravedad y detectabilidad) que lo determinan, los cuales son traducibles a un código numérico adimensional, que permite solamente priorizar la urgencia con la cual se intervendrá el equipo y el orden de las acciones correctoras. Debe ser calculado para todas las causas de fallo. No se establece un criterio de clasificación de tal índice, por

otro lado, un IPR menor a 100 no requerirá intervención, salvo fuese de mejora fácil y contribuyera a la calidad del producto, procesos o trabajo.

Acción correctora: Para elegir la acción correctora se deben seguir los siguientes criterios de ser posible:

- Cambio en el diseño del producto, servicio o proceso general
- Cambio en el proceso de fabricación
- Incremento del control o la inspección

Siempre se considera principalmente la eficiencia del proceso y la minimización de los costos asociados. Por otro lado, la gravedad de las consecuencias de un modo de fallo es determinante en el índice de prioridad en el caso de que dos situaciones tuvieran el mismo índice de fallo.

Responsable y plazo: Se debe indicar quien es el responsable de las acciones correctivas y las fechas de ejecución.

Para la realización del AMEF, se utiliza el formato presentado en la tabla 2.4 a modo de ejemplo, para la recolección de información, donde F corresponde a la frecuencia, G a la gravedad y D a la detectabilidad

Tabla 2.4 Formato formulario AMEF (Bestratén Belloví , Orriols Ramos, & Mata París, 2004)

| OPERACIÓN O<br>FUNCIÓN | FALLO<br>Nº | FALLOS POTENCIALES |         |                             | ESTADO ACTUAL                            |   |   |   | ACCION<br>CORRECTIVA | RESPONSABLE/<br>PLAZO | SITUACION DE MEJORA |                         |   |   |   |
|------------------------|-------------|--------------------|---------|-----------------------------|--|---|---|---|----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|---|---|---|
|                        |             | MODOS DE FALLO     | EFECTOS | CAUSAS DEL<br>MODO DE FALLO | MEDIDAS DE ENSAYO Y<br>CONTROL PREVISTAS | F | G | D |                      |                       | IPR                 | ACCIONES<br>IMPLANTADAS | F | G | D |

### 3. METODOLOGÍA

Se comenzó con la recolección de los datos, los cuales fueron proporcionados por personal del área de mantenimiento y operadores de la minera Paicaví, para la creación de una base de datos, la cual fue crucial para realizar los posteriores análisis. Se continuó con el análisis de criticidad, aplicando técnicas como matriz de criticidad, para la determinación del proceso más crítico del proceso mina (perforación, carguío y transporte), además de un análisis de Pareto a cada uno de los equipos que esté dentro de la categoría crítico o semicrítico en los procesos para la identificación del porcentaje de fallas, causantes del 80% de los problemas. Posteriormente se realizó el cálculo de las variables que tienen relación al tiempo de operación del equipo, es decir, el tiempo medio para reparar (MTTR), el tiempo medio entre fallas (MTFB) y la tasa de fallas.

Se hizo un diagrama de Jack-Knife según el número de intervenciones y el tiempo medio de reparación, logrando clasificar las fallas en cuatro categorías: agudo, crónico, agudo/crónico y leve. Por último, se realizó un análisis AMEF para reconocer y evaluar los fallos y modos de fallo del equipo más crítico para disminuir o eliminar dichas fallas, con el fin de que el equipo cumpla con las necesidades del cliente.

Se comenzó el estudio con la recolección de información directamente del área mina y específicamente del área de mantenimiento de la minera Paicaví, de equipos que se encuentran actualmente en operación, para la creación de la base de datos. Dentro de los datos obtenidos, se recopiló información acerca de los equipos que fallaron durante el periodo de análisis el cual va desde el 9 de diciembre de 2021 hasta el 10 de abril de 2022.

Se registró para la base de datos la siguiente información:

- Tipo de equipo
- Kilometraje
- Fecha de inicio
- Fecha de termino
- Hora de inicio
- Hora de termino
- Horas de detención

- Tipo de trabajo
- Problema
- Solución

Luego de la creación de la base de datos, se continuó con el análisis cuantitativo, para ello se utilizó una matriz de criticidad basada en el riesgo, en su eje vertical se encuentra la frecuencia de fallas, es decir el número de fallas en un tiempo determinado. En su eje horizontal se encuentra la consecuencia de la falla.

Se debe tener en cuenta que esta técnica depende de la información que se posea, ya que está sujeta a ciertos criterios, que dependiendo del entorno pueden generar variaciones o igualdades en ciertas empresas, es decir, los factores se definieron en función de las necesidades de la empresa.

Los resultados obtenidos en la matriz de criticidad arrojan valores altos, medios y bajos, dependiendo de la frecuencia de falla y consecuencia, a los que se realiza más énfasis son los valores altos y medios, es decir los críticos y semicríticos, por lo tanto, se continúa con la aplicación de Pareto a los equipos pertenecientes a cada uno de estos procesos.

Se continuó con la realización del análisis de Jack-Knife, esto para clasificar las fallas y entregar información más detallada a la minera. Este posee 2 ejes, el eje X se grafica el número de fallas y en el eje Y se grafica el tiempo medio para reparar, todo esto en se encuentra en escala logarítmica. Existen 2 "líneas", vertical y horizontal, que permiten crear los cuadrantes para definir las fallas, una corresponde al promedio del tiempo medio para reparar (TMPR) y el otro al promedio de números de falla, respectivamente. Por último, con los datos obtenidos de los análisis anteriores, se creó un análisis de modos y efectos de falla, basado en el registro de datos de la minera y en el manual del fabricante.

Para el estudio se utilizó un método basado en el riesgo, principalmente por el hecho de cumplir con las normas de la organización Internacional de normalización (ISO), las cuales promueven la adopción de un enfoque basado en el proceso, para satisfacer al cliente mediante el cumplimiento de sus requisitos (ISO 9001) y por otro

lado la norma que provee aspectos generales de gestión de activos, que crea valor y una mejora continua a través de actividades basadas en el riesgo (ISO 55000).

### 3.1 Matriz de criticidad basada en el Riesgo

Para la creación de la matriz, fue importante las visitas a la minera Paicaví, ya que mediante esto se pudo obtener los datos, que permitieron calcular la frecuencia de fallo y los factores para poder realizar el cálculo de las consecuencias de cada proceso. Se registraron las actividades de mantenimiento de los procesos de perforación, carguío y transporte, de los cuales en total constan de 6 equipos, camión tolva, compresor de aire, perforadora Jack leg, retroexcavadora CAT, Scoop france loader y Scoop Wagner.

### 3.2 Pareto

Para la realización de Pareto, se tienen las fallas de cada equipo, de cada proceso, obtenidas de la base de datos de la minera Paicaví, las cuales se ordenaron de manera descendente y se calculó el porcentaje que representa cada uno de esos valores del total de las horas. Se realizó un gráfico combinado, donde su eje X, posee las fallas del equipo y su eje Y está basado en el tiempo total de falla y el porcentaje acumulado (Línea), uno ubicándose a la derecha y el otro a la izquierda. Haciendo énfasis en los equipos que posean los valores más altos y pertenezcan al porcentaje de las fallas, causantes del 80% de las detenciones.

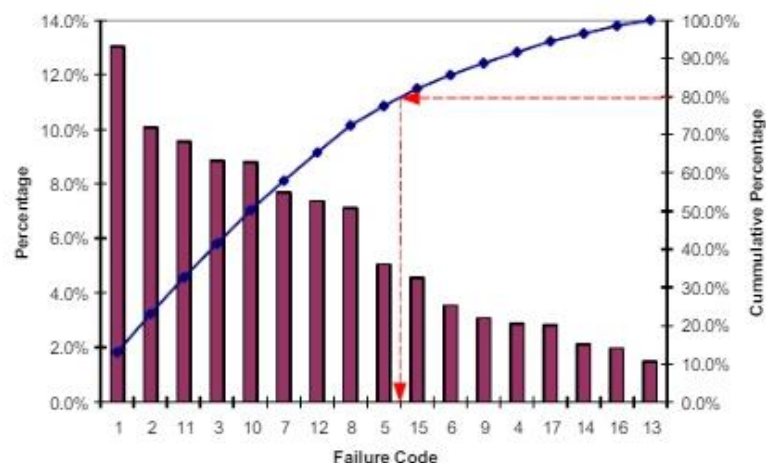


Figura 3.1 Pareto de tiempo de inactividad eléctrica imagen referencial (Knights, 2004)

### **3.3 Jack-Knife**

Las variables más importantes involucradas fueron, el número de intervenciones, el tiempo medio para reparar (MTTR), el tiempo medio entre falla (MTBF), la tasa de fallas y la indisponibilidad (Di). El MTTR es el tiempo promedio que el encargado se demora en reparar la falla (Ecuación 2.4) el MTBF se calculó como el cociente entre el tiempo de operación y la cantidad total de fallas (Ecuación 2.5), la tasa de falla es la inversa del tiempo medio entre falla (ecuación 2.7) y la indisponibilidad es el resultado del producto entre el número de intervenciones y MTTR (Ecuación 2.6).

Los datos que se obtuvieron fueron graficados, teniendo en el eje X el tiempo medio para reparar y en eje Y el tiempo medio de reparación. Además, para generar los cuadrantes se calculó la media del MTTR (Ecuación 2.9) como del número de intervenciones (ecuación 2.8), graficándolo como rectas, destacando que una es horizontal y otra vertical, respectivamente.

Se generó el diagrama que posee los 4 cuadrantes, dándole más énfasis al cuarto, donde se encuentran los puntos crónicos y agudos, es decir que presentan valores altos de tiempo de reparación, tasa de fallo e indisponibilidad. (figura 2.8) Terminando con la realización de las curvas de iso-indisponibilidad, las cuales se calcularon respecto a las horas totales de detención.

### **3.4 Análisis de Modo y Efectos de Falla (AMEF)**

Considerando los resultados obtenidos en el análisis de criticidad, se seleccionó el equipo más crítico para comenzar con el análisis AMEF, el cual considera variables como sistema/subsistema, equipo, descripción de la función, falla funcional, modos de fallo, efectos, causas del modo de fallo, gravedad, frecuencia y detectabilidad. Datos con los cuales se genera una descripción detallada del equipo y sus modos de falla, además del índice de riesgo, que permite generar la prioridad al momento de realizar acciones correctivas.



## 4. RESULTADOS

Para decidir qué equipo es el más crítico del área mina, de la mina Paicaví, fue indispensable recurrir a la base de datos entregada por el personal de mantenimiento, donde cada operador al momento de la realización de una intervención debía registrar en una planilla todos los datos correspondientes. Además, mediante reuniones e idas a terreno, se obtuvo información de los factores a analizar sobre impacto operacional, flexibilidad, seguridad y medioambiente y frecuencia de falla, debido a que es necesario para la creación de la matriz de criticidad, generando así un alza de conocimiento en el área de mantenimiento, ya que priorizaron las necesidades de la empresa para el análisis.

### 4.1 Registros de fallas de los equipos

Se analizó el registro de fallas, que tenía información de las actividades de mantenimiento en un periodo de 4 meses, comprendido entre el 9 de diciembre de 2021 hasta el 10 de abril de 2022, se concluyó que el equipo que presentó más falla en este corto período es el Scoop Wagner con un total de 47 intervenciones, equivalentes a 282,53 horas de detención, correspondiente a 31 días de trabajo aproximadamente, considerando el horario laboral de la minera. Por otro lado, el compresor de aire tiene el menor número de intervenciones, con 8 actividades relacionadas con mantenimiento, llevado a tiempo de detención son 9 horas. En la Figura 4.1 se puede apreciar el total de intervenciones por cada equipo.

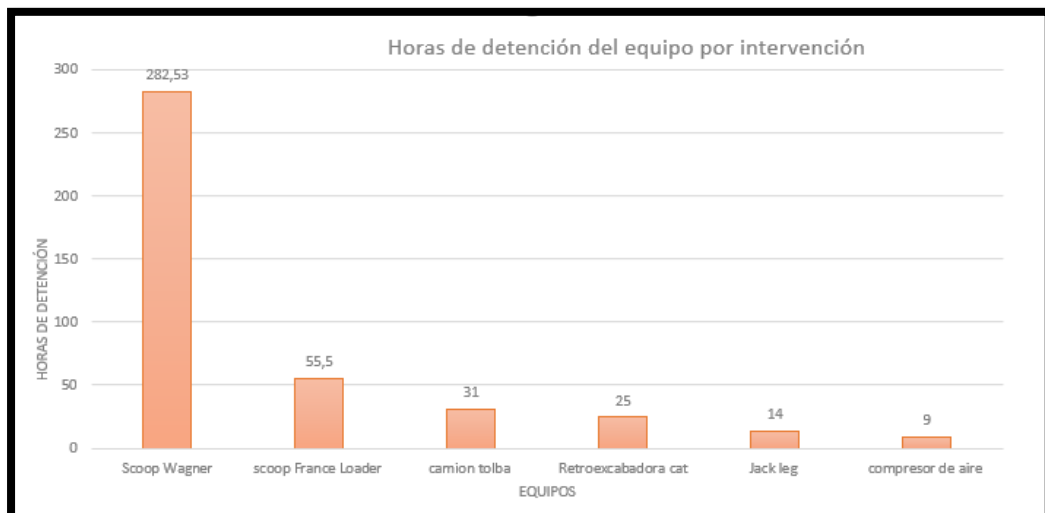


Figura 4.1: Gráfico de horas de detención del equipo por intervenciones (elaboración propia).

## **4.2 Consecuencia de las fallas de los Equipos.**

Para la consecuencia existen diversos factores o criterios de importancia, de acuerdo a las necesidades de la empresa, para esto, se consideraron los factores definidos en reuniones de trabajo con personal que tiene conocimiento del factor a evaluar, es decir en términos de producción, calidad, costos de mantenimiento, mantenibilidad, medio ambiente y seguridad.

Los factores que tuvieron mayor relevancia en la minera Paicaví son 3, impacto operacional, flexibilidad operacional, seguridad y medio ambiente, a los cuales se les asigno un peso para el cálculo de la consecuencia, donde impacto operacional y flexibilidad operacional, se les asigno un peso del 30% a cada uno y el 40% fue asignado a seguridad y medioambiente.

## **4.3 Aplicación de la Matriz de criticidad basa en el riesgo**

Esta aplicación se basa en los tres procesos mina, perforación, carguío y transporte, considerando la frecuencia de falla y las consecuencias que involucran el impacto operacional, la flexibilidad operacional y la seguridad y medio ambiente. Por lo tanto, se concluyó que, respecto a la frecuencia de falla, el proceso de carguío es el que posee el mayor valor de frecuencia, mientras que, transporte y perforación poseen el mismo valor.

En el ámbito de las consecuencias, para el factor de impacto operacional los tres procesos poseen la misma valoración, ya que, todos al detenerse producen un impacto en otro proceso.

Para el factor de Flexibilidad operacional se destaca que, carguío y transporte poseen un valor más elevado, esto debido a que ambos procesos tienen repuestos compartidos, por ejemplo, en carguío se encuentran dos Scoop, que comparten repuestos al ser básicamente iguales. Por otro lado, perforación posee un valor en flexibilidad operacional muy bajo, ya que existen muchas opciones de repuestos disponibles en la minera.

En seguridad y medioambiente carguío posee un valor elevado puesto que al tener una falla a nivel hidráulica puede generar un grave accidente al operario y también a los que lo rodean. El tema de la fuga de aceite que es constante genera un gran impacto medioambiental, debido a la contaminación provocada en los suelos, además provoca emisiones de gases tóxicos, dañinos para los operarios.

Todo esto fue conversado con el personal que realiza el mantenimiento, llegando a la observación que carguío, donde se encuentran los Scoop, son los que poseen más efectos negativos en los resultados, debido a las constantes fugas de aceite que se generan y que, por el contrario, transporte posee cifras más bajas producto que se posee un solo camión tolva y su falla más recurrente es la reparación de los neumáticos por las condiciones del terreno.

A continuación, se presentan los aspectos considerados tanto para la frecuencia de falla como para cada consecuencia, en ambos casos se considera una escala del 1 al 10, donde 1 es el menos grave y 10 el más grave.

Frecuencia de fallas:

- Mayor a 20 fallas en el periodo.
- 4-19 Fallas en el período.
- 1-3 Fallas en el período.
- 0-1 Fallas en el período.

Consecuencias:

- Impacto operacional.
  - Pérdida total.
  - Parada del sistema o subsistema y repercute en otros sistemas.
  - Impacta en niveles de inventario o calidad.
  - No Afecta a la producción.
- Flexibilidad Operacional.
  - No existe opción de producción y no hay función de repuesto.
  - Hay opción de repuesto compartido.
  - Repuesto disponible.
- Seguridad y medioambiente.
  - Afecta la seguridad humana, el medio ambiente interna y externa y requiere notificación a externos.

- Afecta a la instalación, seguridad humana y ambiental grave.
- Afecta a las instalaciones y seguridad humana como incidente/accidente y medioambientales medianos.
- Provoca daños a humanos y medioambientales leves.

Para cada proceso se realizó su análisis, considerando la escala del 1 al 10 tanto para la frecuencia de fallas como para cada uno de los factores. Se cuantifico la consecuencia, como el producto entre el impacto operacional y la flexibilidad, más el impacto de seguridad y medioambiente (Ecuación 2.3). Posteriormente se calculó la criticidad o riesgo como el producto entre la frecuencia de falla y la consecuencia. Aplicando así, una escala de criticidad, donde, los valores de riesgo mayores igual a 1 y menores a 10, caen en la categoría de no críticos (NC), los valores mayores igual a 10 y menores igual a 20, caen en la categoría de semicriticos (SC) y los valores mayores a 20 y para este análisis, menores a 60, caen en la categoría de críticos (C), como se aprecia en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Escala de criticidad (Elaboración propia).

| Rangos de Criticidad |        |           |    |
|----------------------|--------|-----------|----|
| $1 \leq$             | Riesgo | $<10$     | NC |
| $10 \leq$            | Riesgo | $\leq 20$ | SC |
| $20 <$               | Riesgo | $<60$     | C  |

Con toda la información obtenida anteriormente se realizó la matriz de criticidad, observada en la figura 4.2

Tabla 4.2 Matriz de criticidad asociada a los procesos minera Paicaví (Elaboración propia).

| Factor de consecuencias |                      |                |                  |                   |                           |              |        |
|-------------------------|----------------------|----------------|------------------|-------------------|---------------------------|--------------|--------|
| Proceso                 | Fallas en el periodo | Frec. de falla | Imp. operacional | Flex. operacional | Seguridad y medioambiente | Consecuencia | Riesgo |
| Perforación             | 18                   | 5              | 2,4              | 0,3               | 2,8                       | 3,52         | 17,6   |
| Carguío                 | 76                   | 10             | 2,4              | 0,9               | 3,2                       | 5,36         | 53,6   |
| Transporte              | 8                    | 5              | 2,4              | 0,9               | 1,2                       | 3,36         | 16,8   |

Con los datos obtenidos en la matriz de criticidad, se pueden observar de manera grafica la criticidad de los procesos, en la aplicación de matriz, que se muestra en la tabla 4.3, basada en la tabla 4.1 de rangos de criticidad. En la cual se grafican las frecuencias de falla y las consecuencias, para la interpretación grafica del riesgo.

Tabla 4.3 Aplicación de la matriz de criticidad (Elaboración propia).

| Frecuencia de falla | Aplicación de matriz de criticidad |    |    |    |    |    |
|---------------------|------------------------------------|----|----|----|----|----|
|                     | 20                                 | SC | C  | C  | C  | C  |
|                     | 15                                 | SC | C  | C  | C  | C  |
|                     | 10                                 | SC | SC | C  | C  | C  |
|                     | 5                                  | NC | SC | SC | SC | SC |
|                     | 1                                  | NC | NC | NC | NC | NC |
|                     |                                    | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |
|                     | Consecuencia                       |    |    |    |    |    |

#### 4.4 Diagrama de Pareto

Al analizar la matriz de criticidad, se determinó que el proceso más crítico es carguío, el cual posee solo 3 equipos en su proceso como se mencionó anteriormente, debido a esto, para el análisis de Pareto se consideraran los equipos críticos y semicriticos, es decir perforación carguío y transporte, realizando así 6 análisis de Pareto.

Para este análisis se realizó un gráfico combinado de barras y líneas considerando en el eje X las fallas de cada equipo independiente y en eje Y, en el lado izquierdo, las horas de detención de los equipos y en lado derecho los porcentajes acumulados de las horas de detención. Primeramente, se ordenó los datos de manera descendente, luego se calculó el porcentaje de detención de cada falla, es decir el cociente entre las horas de detención y el total de horas de mantenimiento, pudiendo calcular el porcentaje acumulado. Para finalizar se posiciona un eje vertical donde se produce el límite a discriminar, para este caso, se seleccionó un límite correspondiente al 80% de las horas de detención.

A continuación, se presentan los 6 análisis de Pareto, realizado a los 6 equipos de la minera Paicaví.

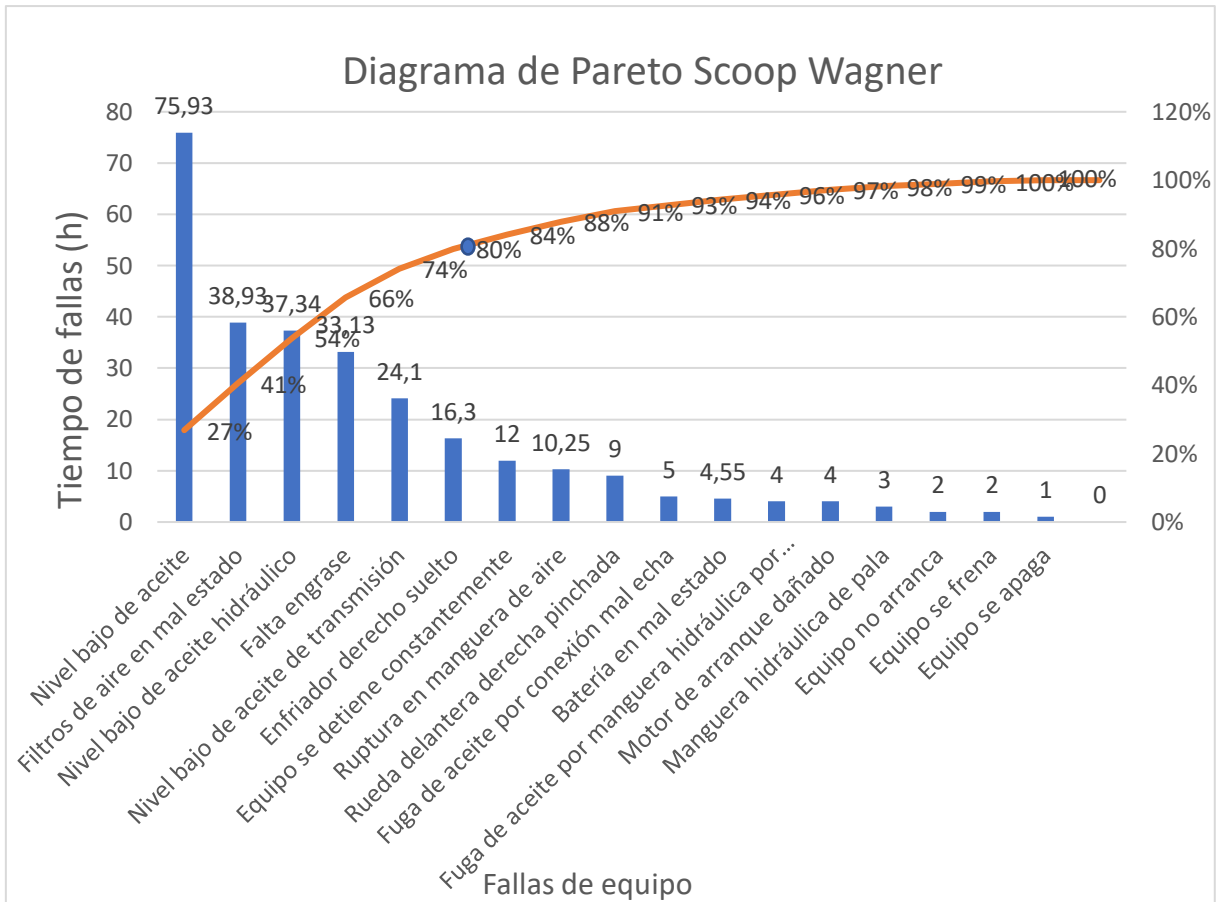


Figura 4.2: Gráfico de Pareto de pérdidas por falla Scoop Wagner. (elaboración propia).

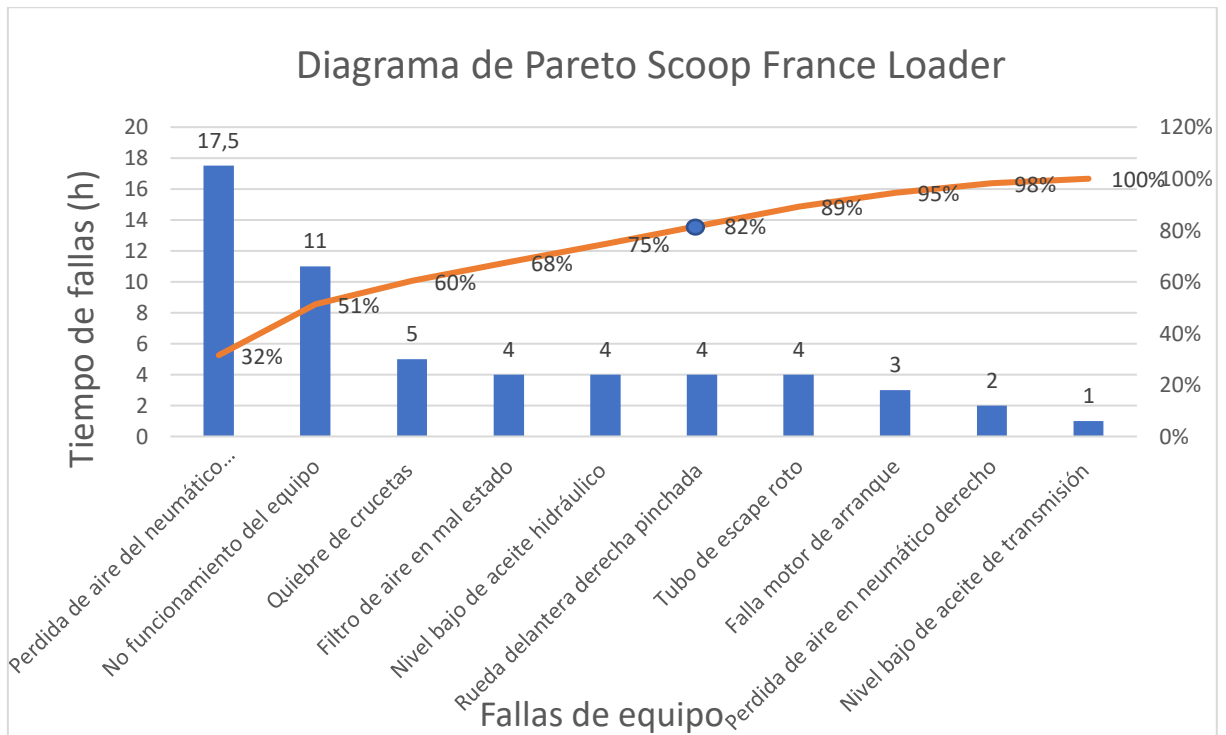


Figura 4.3: Gráfico de Pareto de pérdidas por falla Scoop France Loader. (elaboración propia).

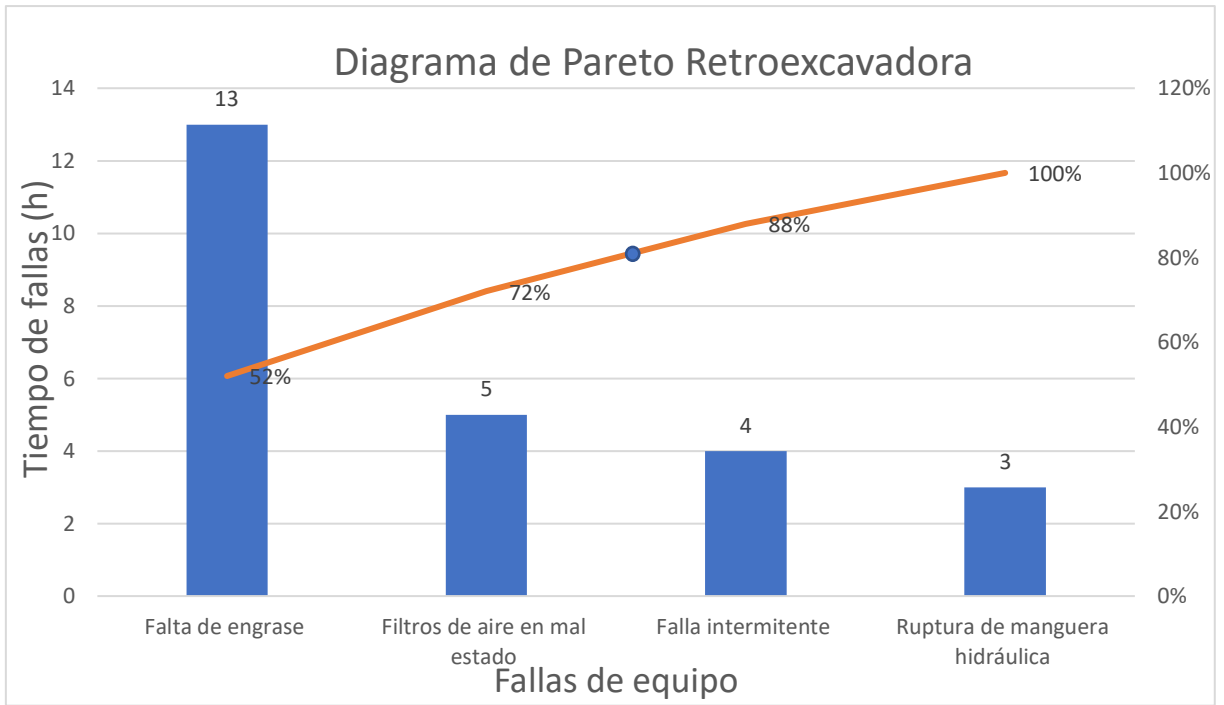


Figura 4.4: Gráfico de Pareto de pérdidas por falla Retroexcavadora. (elaboración propia).

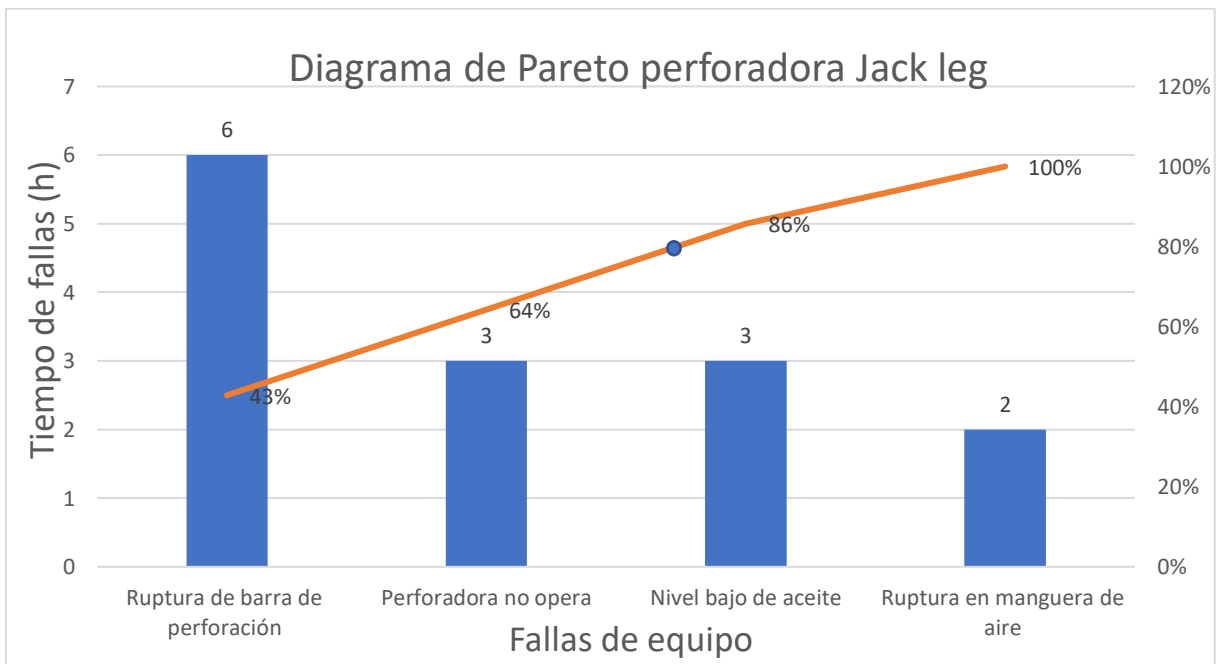


Figura 4.5: Gráfico de Pareto de pérdidas por falla Jack leg. (elaboración propia).

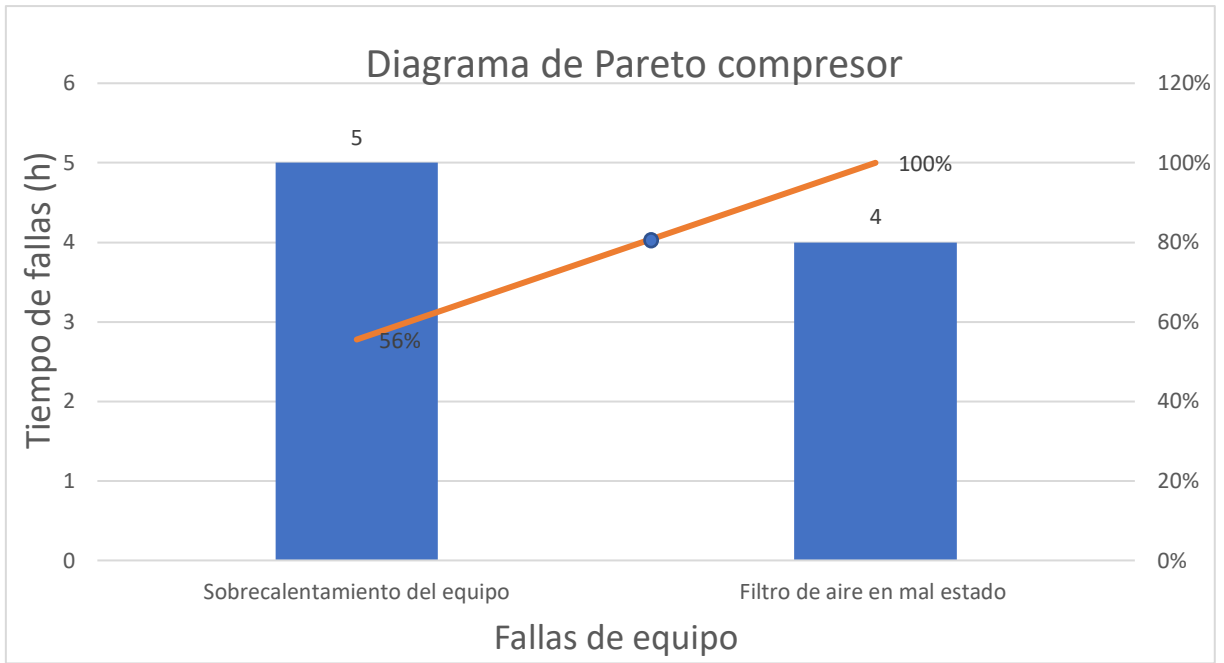


Figura 4.6: Gráfico de Pareto de pérdidas por falla compresor. (elaboración propia).

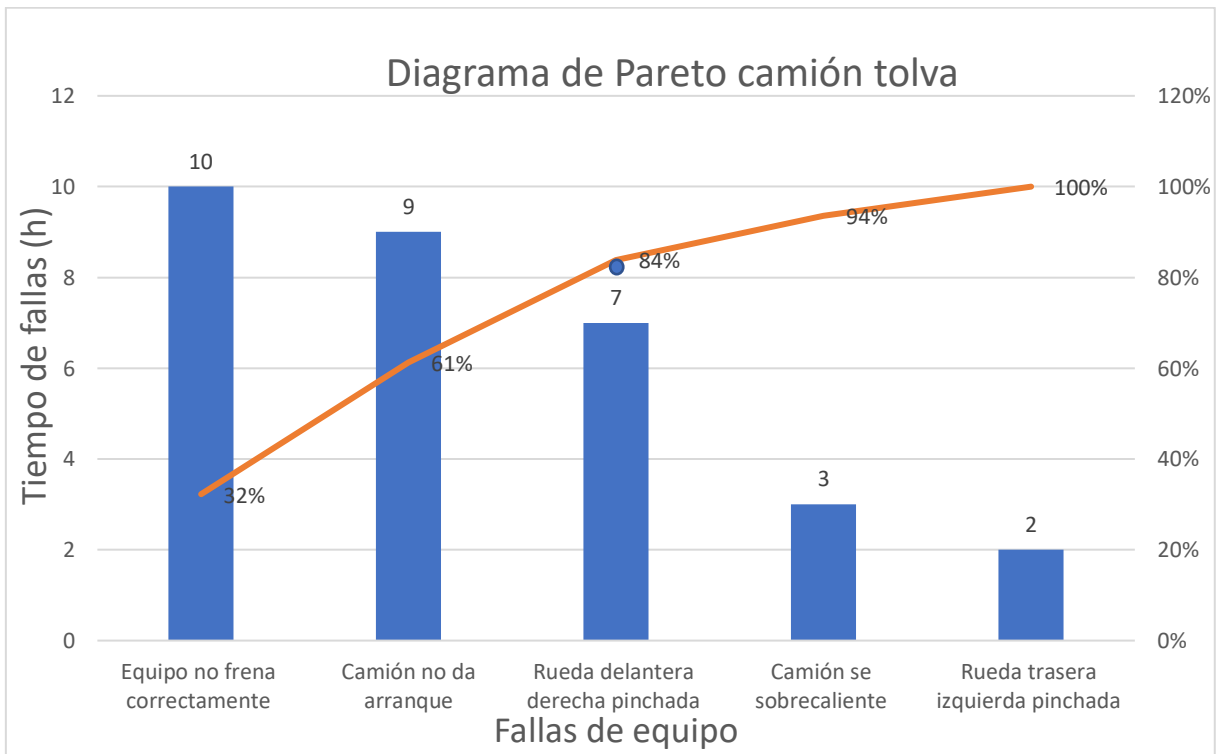


Figura 4.7: Gráfico de Pareto de pérdidas por falla camión tolva. (elaboración propia)



## **4.5 Jack knife**

Este análisis permite entregar a los encargados del área de mantenimiento más información acerca de las fallas más importantes sobre sus equipos del área mina. Según el estudio realizado con la matriz de criticidad, se obtuvo el proceso más crítico, es decir carguío, pero debido a los pocos equipos existentes, se realizó énfasis, también en los procesos semicríticos (perforación y transporte), por ende, se consideró nuevamente los 6 equipos del área, los cuales son: compresor de aire, camión tolva, retroexcavadora Cat, Jack leg, Scoop france loader y Scoop Wagner. Las variables consideradas en este estudio que permiten trabajar en dos dimensiones fueron el tiempo medio de reparación (MTTR) y la cantidad de fallas.

Para la realización fue necesario calcular el tiempo medio para reparar, esto se puede observar en, tabla A.1, tabla A.2, tabla A.3, tabla A.4, tabla A.5 y tabla A.6.

### **4.5.1 Realización del diagrama de Jack Knife**

Mediante la información obtenida, se pudo realizar el gráfico de dispersión, para cada uno de los equipos, donde principalmente se hace énfasis en el cuadrante 4 (agudo-crónico), es decir que la falla posee una alta frecuencia y sobrepasa el promedio del tiempo para reparar. Se debe considerar que los ejes corresponden a las variables mencionadas anteriormente, donde tiempo medio de reparación se consideró en el eje Y y el número de fallas en el eje X. Además, se calculó el promedio del N° de fallas y del tiempo medio para reparar, estos representados en la gráfica como una línea vertical y horizontal respectivamente, generando los cuadrantes. Posterior a esto, se determina una variable como eje X, correspondiente a una sucesión numérica y en el eje Y una constante que comienza desde el valor más alto en términos de pérdida de tiempo por detención del equipo, disminuyendo el valor en rangos hasta el mínimo valor del eje Y. Obtenidos estos datos, se calculara el cociente entre el eje X y el eje Y para graficar las líneas graficas de la iso-indisponibilidad, las cuales se observaran de manera curva llevando el gráfico logarítmico de Jack Knife a escala normal, para

poder observar, que equipo mantiene una mayor indisponibilidad dependiendo de la lejanía de los puntos desde el punto x=0, Y=0 hasta su posición correspondiente en el gráfico de dispersión.

A continuación, se presentan 6 diagramas de Jack Knife con las curvas de iso-indisponibilidad y en el apartado de apéndice, se pueden encontrar los diagramas con los cuadrantes sin la iso-indisponibilidad, en las siguientes figuras, figura B.1, figura B.2, figura B.3, figura B.4, figura B.5 y figura B.6.

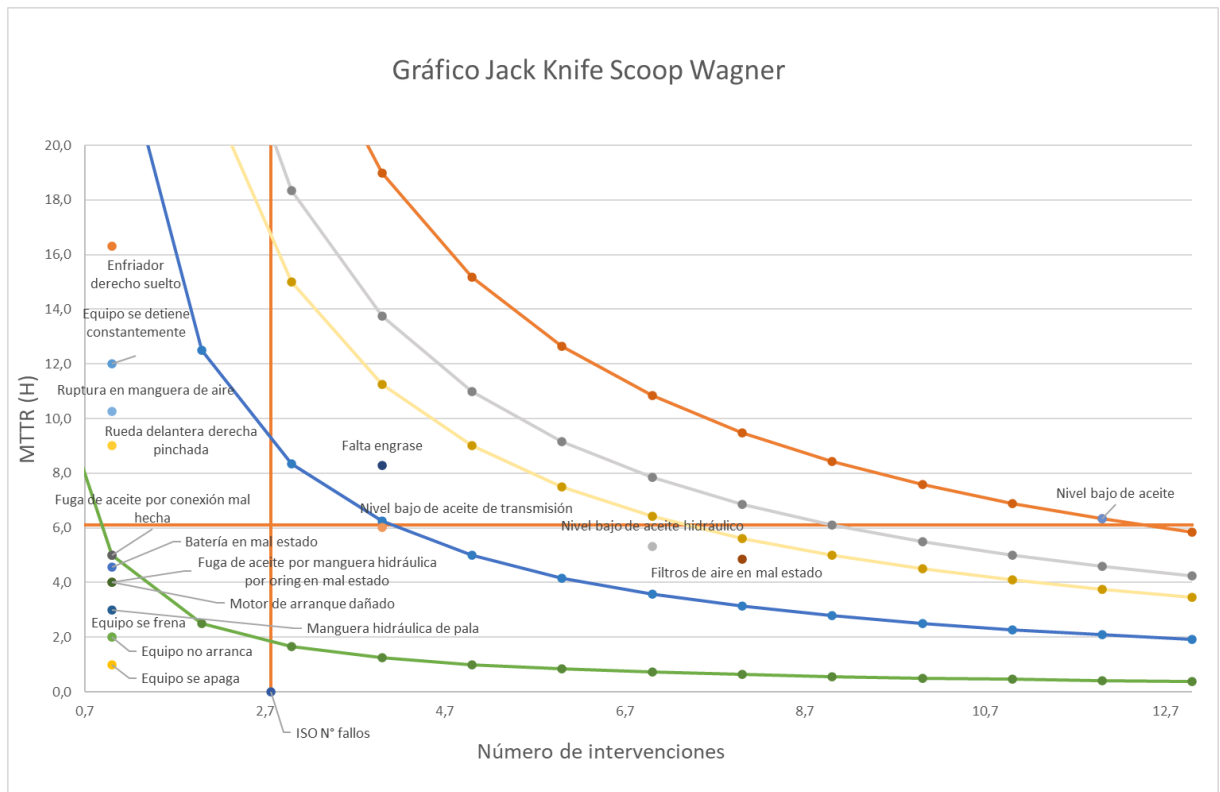


Figura 4.8: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR Scoop Wagner iso. (elaboración propia).

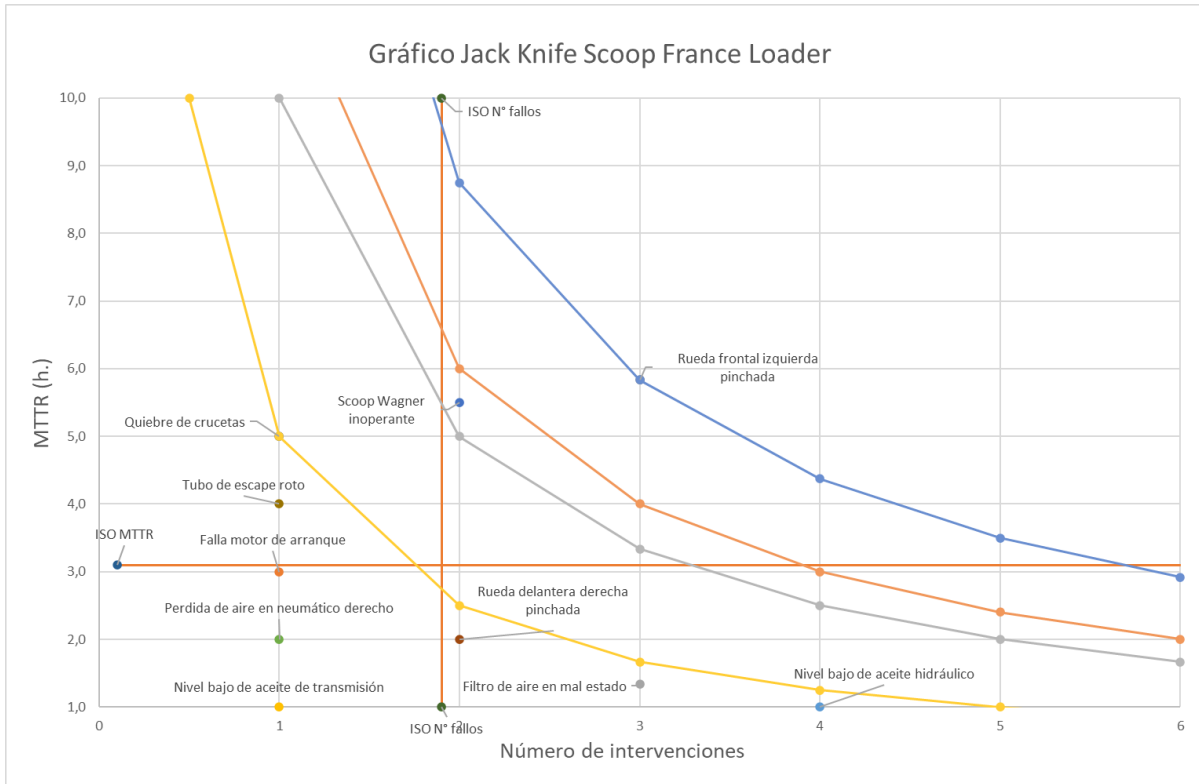


Figura 4.9: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR Scoop France Loader iso. (elaboración propia).

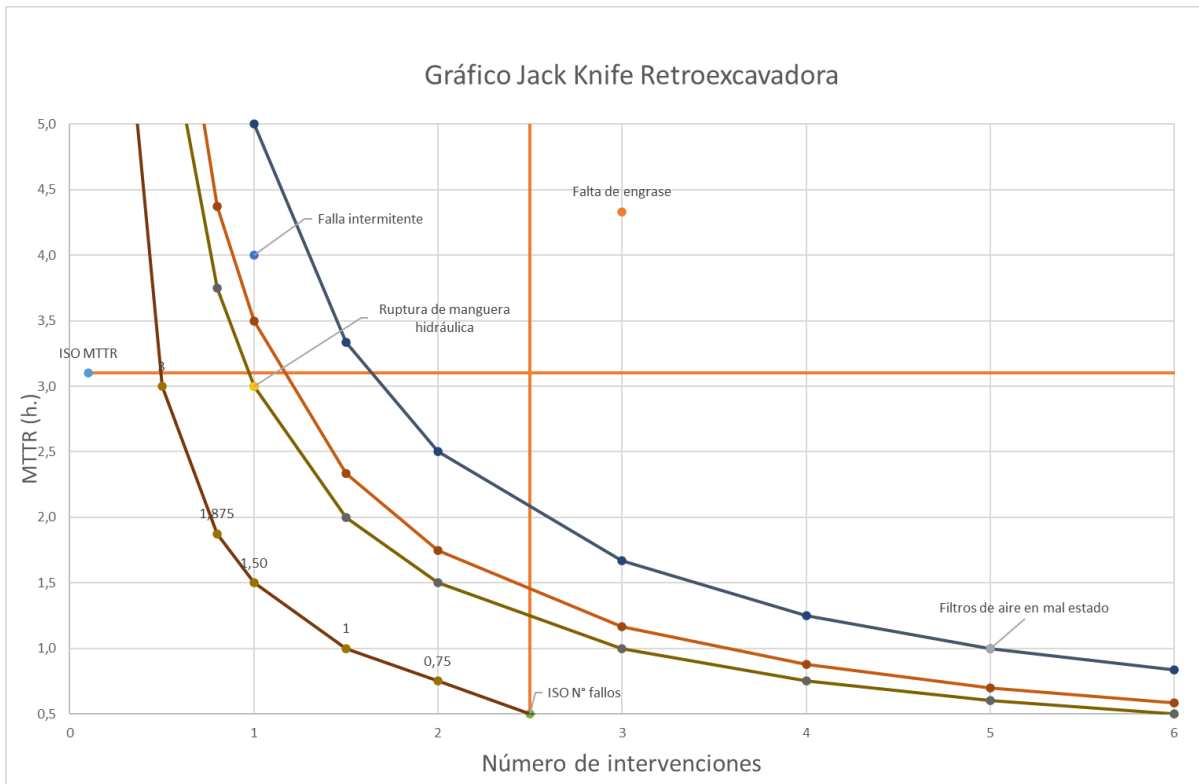


Figura 4.10: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR Retroexcavadora iso. (elaboración propia).

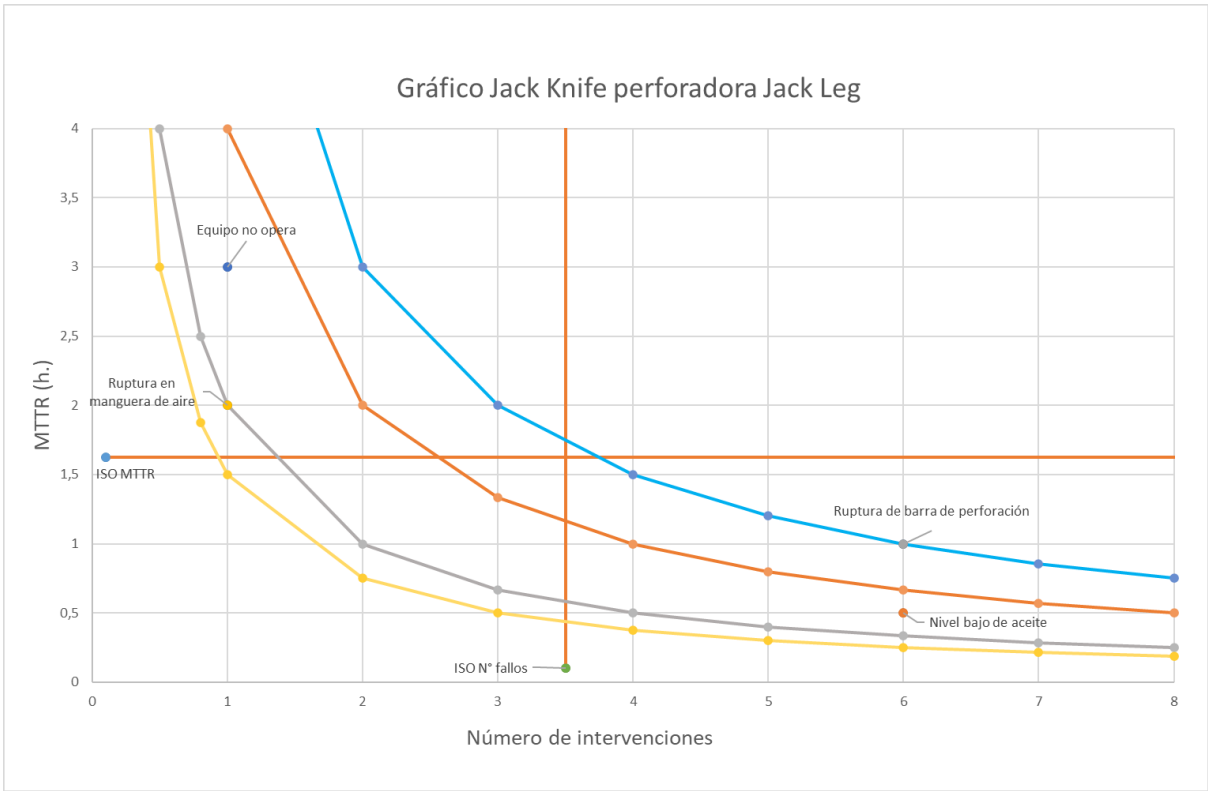


Figura 4.11: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR Jack leg iso. (elaboración propia).

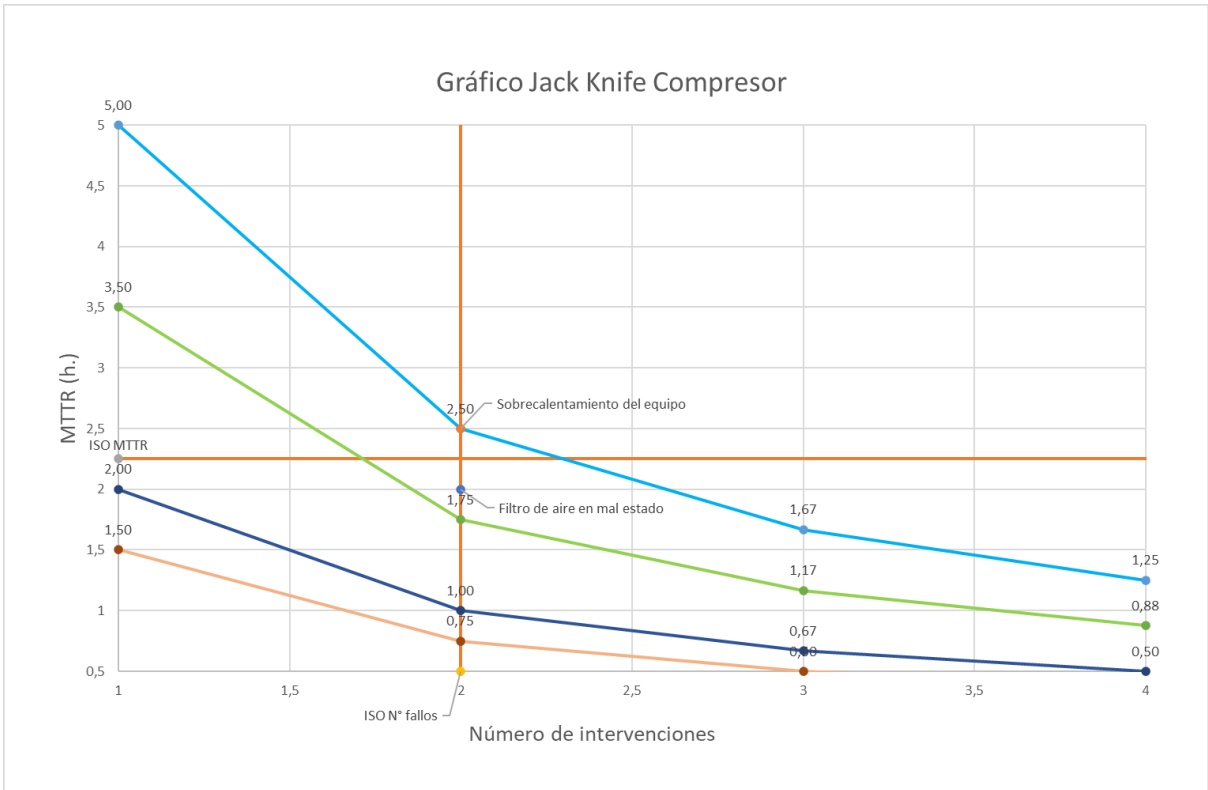


Figura 4.12: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR compresor iso. (elaboración propia).

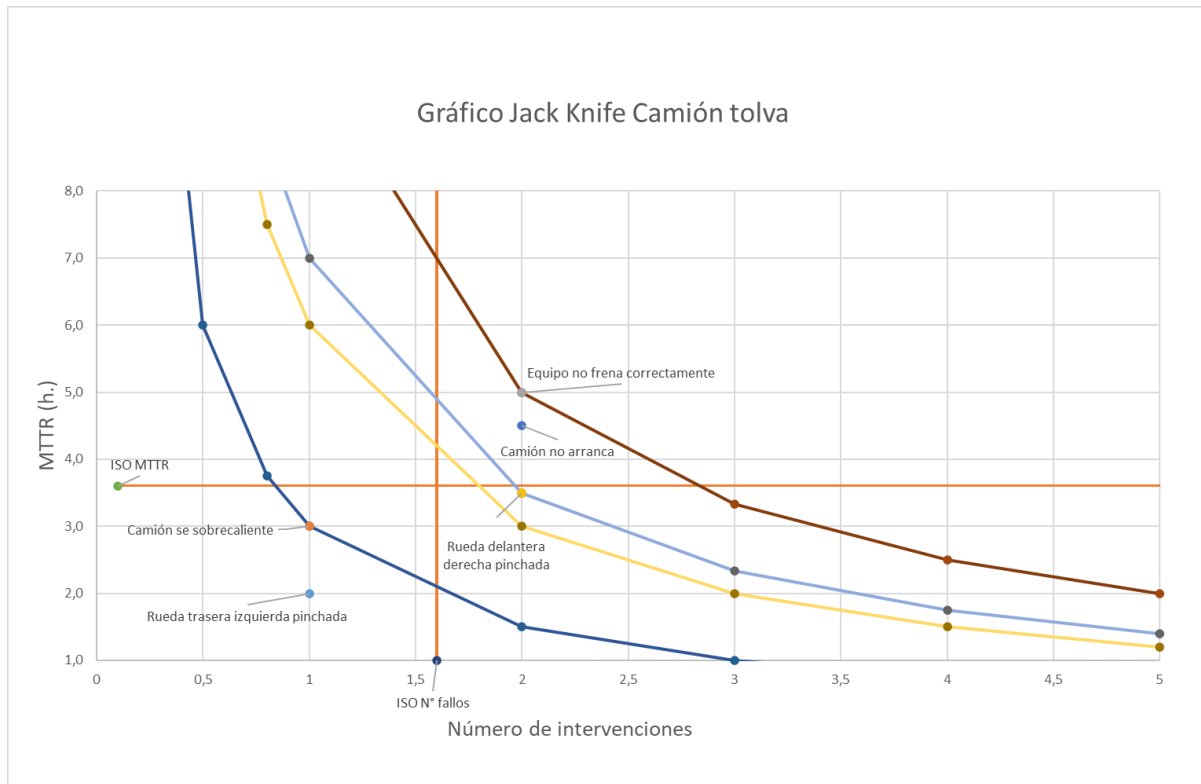


Figura 4.13: Gráfico de dispersión Jack Knife número de intervenciones vs MTTR camión tolva iso. (elaboración propia).

## 4.6 Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)

Para la realización del análisis de modos y efectos de falla, se consideró el equipo más crítico, observando los resultados obtenidos en el análisis de criticidad, enfocándonos principalmente en el análisis de Pareto y el diagrama de Jack Knife, considerando el equipo que presente un tiempo medio de reparación superior al promedio y una mayor número de intervenciones. El equipo seleccionado para el análisis corresponde al Scoop Wagner, definido como sistema de análisis, el cual fue separado por equipos que presentaban mayor cantidad de fallas, los cuales son:

- Motor
- Sistema Hidráulico
- Sistema Eléctrico
- Transmisión
- Ruedas y Neumáticos.

De los cuales en primera instancia se realizó la descripción de cada uno de ellos y su

falla funcional, como se puede observar a continuación.

- Motor:
  - Descripción: transformar la energía de combustibles fósiles en energía mecánica para el movimiento del equipo.
  - Falla funcional: Pérdida total de movilidad del equipo.
  
- Sistema Hidráulico:
  - Descripción: proveer el aceite hidráulico necesario para mover componentes mecánicos del equipo.
  - Falla funcional: pérdida total de movimiento del sistema hidráulico.
  
- Sistema Eléctrico:
  - Descripción: proveer de energía al sistema completo (arranque, sensores, luces, palancas, accesorios).
  - Falla funcional: pérdida de movimiento y control del equipo.
  
- Transmisión:
  - Descripción: transferir la potencia generada por el motor a las ruedas del equipo para su movimiento.
  - Falla funcional: pérdida de movimiento del equipo.
  
- Ruedas y Neumáticos.
  - Descripción: absorber el peso del equipo, transmitir la tracción al piso, y permitir el cambio de dirección.
  - Falla funcional: limita el movimiento del equipo.

Posterior a esto, se continuo con la descripción de los fallos potenciales (Modos de fallo, efectos y causas del modo de fallo) y su estado actual, observados a continuación un extracto de cada uno de sus subsistemas.

- Motor:
  - Modo de fallo: el motor no gira.
  - Efectos: no puede ser utilizado.
  - Causas del modo de fallo: problemas eléctricos.
  - Frecuencia: 4
  - Gravedad: 7
  - Detectabilidad: 1
  - Índice de prioridad de riesgo: 28
  
- Sistema Hidráulico:
  - Modo de fallo: fuga de aceite.
  - Efectos: sobrecalentamiento y pérdida de funcionalidad.
  - Causas del modo de fallo: línea de manguera desgastada o rota.
  - Frecuencia: 9
  - Gravedad: 4
  - Detectabilidad: 1
  - Índice de prioridad de riesgo: 36
  
- Sistema Eléctrico:
  - Modo de fallo: motor de arranque gira lentamente.
  - Efectos: equipo no puede ser utilizado.
  - Causas del modo de fallo: motor de arranque defectuoso.
  - Frecuencia: 2
  - Gravedad: 7
  - Detectabilidad: 1
  - Índice de prioridad de riesgo: 14
  
- Transmisión:
  - Modo de fallo: vibración o ruido excesivo.
  - Efectos: afloje de componentes y desgaste de piezas.

- Causas del modo de fallo: rodamientos desgastados o lubricación insuficiente.
  - Frecuencia: 2
  - Gravedad: 9
  - Detectabilidad: 1
  - Índice de prioridad de riesgo: 18
- 
- Ruedas y Neumáticos.
    - Modo de fallo: fuga de aire en neumático.
    - Efectos: equipo no puede ser utilizado.
    - Causas del modo de fallo: corte en neumático.
    - Frecuencia: 6
    - Gravedad: 7
    - Detectabilidad: 1
    - Índice de prioridad de riesgo: 42

Toda esta información esta resumida dentro del análisis de modos y efectos de falla la tabla (A.7). ubicada en el apartado de apéndice.



## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1 Registros de fallas de los equipos**

Dentro de la base de datos recopilada en el periodo de 4 meses, se definen 102 fallas en total, respecto a todos los equipos estudiados, correspondientes a 417 horas de detención. Esto, se traduce a un promedio de 4 horas de detención por falla aproximadamente y un total de 46 días hábiles de trabajo, considerando el horario de trabajo de la minera. Por otro lado, el equipo que presenta más fallas en el periodo corresponde al Scoop Wagner, con un total de 47 fallas, seguido del Scoop France Loader, el cual presentó 19 fallas. Considerando que solo estos 2 equipos mueven el mineral desde el interior mina, hacia el exterior, detener uno en su totalidad, afectaría al 50% de la extracción del mineral, por lo cual se considerarían esenciales dentro del proceso.

### **5.2 Matriz de criticidad basa en el riesgo**

Como se mencionó en el capítulo 4, dentro de la matriz de criticidad, se separaron los equipos por procesos, perforación (compresor de aire y perforadora Jack Leg), carguío (Scoop Wagner, Scoop France Loader y retroexcavadora Cat) y transporte (camión tolva), de los cuales, el proceso de carguío fue el que presento una mayor cantidad de fallos.

Al comparar los 3 procesos dentro de la matriz de criticidad (tabla 4.2) considerando las variables asociadas, arroja una notoria diferencia de valor de riesgo en el proceso de carguío en comparación a los de perforación y tronadura, donde, dentro de la escala de criticidad creada, indicaría que el proceso critico asociado a la minera, seria carguío, con un riesgo de 53,6 seguido por los procesos semicriticos de perforación y transporte, con un riesgo de 17,6 y 16,8.

### **5.3 Diagrama de Pareto**

Con la información obtenida de la base de datos y la matriz de criticidad, se consideraron para el diagrama de Pareto el análisis de los equipos críticos y semicriticos, obteniendo como resultado los 6 gráficos de Pareto asociado a cada uno

de los equipos de los procesos. Se puede apreciar, en el primer gráfico de Pareto, perteneciente al equipo Scoop Wagner (figura 4.2), que el nivel bajo de aceite genera la mayor causa de las horas de detención, seguido de los filtros de aire en mal estado, el nivel bajo de aceite hidráulico, la falta de engrase, el nivel bajo de aceite de transmisión y el enfriador derecho suelto. Los que corresponderían al 35% de los modos de fallas que generan el 80% de las detenciones asociados al equipo, siendo el nivel bajo de aceite el que mantiene el mayor tiempo de detención por fallas, el cual corresponde a 76 horas, equivalente a 9 días de trabajo aproximadamente y al 27% del total de las horas de detención del equipo.

Por otro lado, el segundo gráfico, correspondiente al Scoop France Loader (figura 4.3), mantiene como modo de falla principal, la pérdida de aire del neumático delantero izquierdo, seguido del no funcionamiento del equipo, quiebre de crucetas, filtro de aire en mal estado y nivel bajo de aceite hidráulico. Lo que correspondería al 50% de los modos de fallas que generan el 80% de las detenciones, además, las 17,5 horas de detención por pérdida de aire en neumático delantero izquierdo, equivalentes a 2 días de trabajo, corresponden al 32% de las horas totales de detención del equipo en el periodo estudiado.

Respecto al tercer gráfico, correspondiente a la retroexcavadora (figura 4.4), al igual que en el gráfico del Scoop France, el 50% de los modos de fallo representan el 80% de las detenciones, pero para este caso, el número de fallas asociadas al equipo, son mucho menores. Así, la falla principal que mantiene un tiempo de detención de 13 horas, equivalente a 1 día y medio de trabajo aproximadamente, es la falta de engrase, con un 52% de las horas totales de detención por fallas en el periodo, seguido por filtros en mal estado, falla intermitente y ruptura de manguera hidráulica.

Para el cuarto gráfico de Pareto, correspondiente a la perforadora Jack Leg (figura 4.5), la cantidad de modos de fallos es mucho menor a las anteriores, con 6 horas como el máximo de horas detenidas, donde el 50% de los modos de fallos representan el 80% de las detenciones, correspondientes a la ruptura de la barra de perforación con 6 horas en total de detención, que corresponde a un 43% del total, seguido de la Perforadora no opera, con 3 horas de detención.

El quinto gráfico de Pareto corresponde al compresor (figura 4.6), el cual también maneja el 50% de los modos de fallos como el 80% de las detenciones del equipo, considerando como máximo 5 horas de detención, y considerando que existen solo 2 modos de fallos, el sobrecalentamiento representa el 56% del total de las horas detenidas, seguido por los filtros de aire en mal estado, que representan el 44% restante.

Para el último gráfico de Pareto, correspondiente al camión tolva (figura 4.7), el 40% de los modos de fallo, representan el 80% de las detenciones del equipo, donde, el equipo no frena correctamente, con 10 horas de detención, representa el 32% de las horas totales de detención, seguido por el camión no da arranque, con 9 horas de detención, que representa un 29% de las horas totales de detención del equipo.

#### **5.4 Jack knife**

Al igual que para el diagrama de Pareto, para el método de Jack knife, se utilizó los equipos críticos y semicríticos, entregados por la matriz de criticidad. El cual arroja como resultado 6 gráficos asociados a los equipos, considerando variables de tiempo medio de reparación y número de intervenciones en el periodo estudiado. Lo principal y donde debemos enfocar nuestra atención dentro del gráfico de Jack knife, es en el cuadrante crónico-agudo, ya que son los modos de falla que mantienen un mayor tiempo medio de reparación y un mayor número de fallas, para el caso del gráfico del Scoop Wagner (figura 4.8), se puede apreciar que dentro de este cuadrante, encontramos los modos de falla como el nivel bajo de aceite y la falta de engrase, además del nivel bajo de aceite de transmisión, que se encuentra en el límite entre el cuadrante crónico-agudo y el cuadrante crónico. Para el cuadrante agudo, encontramos modos de falla como enfriador derecho suelto, equipo se detiene constantemente, ruptura en mangueras de aire y rueda delantera derecha pinchada. En el caso del cuadrante crónico, se encuentran dos modos de falla, filtros de aire en mal estado y nivel bajo de aceite hidráulico. Para el cuadrante leve, se encuentran los demás modos de falla poco frecuentes y con bajo tiempo medio de reparación. Por otro lado, considerando las líneas de iso-indisponibilidad, que corresponderían a los límites de los indicadores de tiempos de detención, se considera como modo de falla más crítico el nivel bajo de aceite, que se encuentra sobre la línea de iso-

indisponibilidad del 100% que corresponderían a 75 horas de detención, seguido de la falta de engrase y los filtros de aire en mal estado, que al estar entre las líneas de iso-indisponibilidad del 33% y 66%, mantendrían un mismo estado crónico-agudo.

Para el gráfico del equipo Scoop France Loader (figura 4.9), se aprecia que los modos de falla que entran dentro del cuadrante crónico-agudo, con alta frecuencia y alto tiempo medio de reparación, corresponden a la rueda frontal izquierda pinchada y al modo de falla del Scoop Wagner inoperante. En el cuadrante agudo se encuentran los modos de falla de quiebre de crucetas y tubo de escape roto, lo que significa que son poco frecuentes, pero que mantienen un alto tiempo medio de reparación. Para el caso del cuadrante crónico, podemos encontrar modos de fallas como rueda delantera derecha pinchada, filtro de aire en mal estado y nivel bajo de aceite hidráulico, las cuales serían frecuentes, pero con bajo tiempo medio de reparación. Para el cuadrante leve, se encuentran los demás modos de falla poco frecuentes y con bajo tiempo medio de reparación. Por otro lado, considerando las líneas de iso-indisponibilidad, se considera a la rueda frontal izquierda pinchada como modo de falla más crítica al estar sobre la línea de iso-indisponibilidad del 100% que correspondería a 17.5 horas de detención, seguido de Scoop Wagner inoperante, que se encontraría entre las líneas de iso-indisponibilidad del 60% y 70%, manteniendo un estado crónico-agudo.

En el gráfico tres, correspondiente a la Retroexcavadora (figura 4.10), se aprecia solamente un modo de falla en el cuadrante crónico-agudo, la cual correspondería a falta de engrase, lo que nos indicaría que mantiene una alta frecuencia y tiempo medio de reparación. Para el cuadrante agudo, se puede observar solo un modo de falla, la cual sería falla intermitente, presentando alto tiempo medio de reparación, pero poca frecuencia. En el cuadrante crónico, al igual que en el agudo, existe solamente un modo de falla, la cual correspondería a filtros de aire en mal estado, con alto número de fallas, pero con bajo tiempo medio de reparación. Para el caso del cuadrante leve, existe al igual que para los demás cuadrantes, un solo modo de fallo, el cual correspondería a la ruptura de manguera hidráulica, que, si bien se acerca bastante al cuadrante agudo, no alcanza a tener un tiempo medio de reparación tan alto, como para caer en dicha categoría. Tomando en consideración las líneas de iso-indisponibilidad, la falta de engrase queda por lejos, como el modo de falla más crítico

a tener en consideración, seguida de los filtros de aire en mal estado, que sobrepasa por muy poco a la línea del 100% de la iso-indisponibilidad, correspondiente a 5 horas de detención.

Para el cuarto gráfico (figura 4.11), correspondiente a la perforadora Jack Leg, no existen modos de falla dentro del cuadrante crónico-agudo, lo que corresponde a que el equipo no tiene problemas que sean frecuentes y con alto tiempo medio de reparación. Por el lado del cuadrante agudo, existen dos modos de fallas, las cuales corresponden a la ruptura en manguera de aire y el equipo no opera, que mantienen un alto tiempo medio de reparación. Para el cuadrante crónico existen también dos modos de fallas correspondientes a ruptura de barra de perforación y nivel bajo de aceite, que mantendría un alto número de fallas, pero a bajo tiempo medio de reparación. Por el cuadrante leve, al igual que en el crónico-agudo, no existen modos de falla, pero para este caso, es perjudicial para el equipo al no tener modos de fallas que no sean frecuentes y no sean rápidas de reparar. Por otro lado, considerando las líneas de iso-indisponibilidad, los modos de falla a tener en consideración, serían las de nivel bajo de aceite y Jack Leg inoperante, las cuales se encuentran entre el 60% y 70%, por lo que tendrían una misma importancia al momento de tomar acciones.

En el gráfico cinco (figura 4.12), correspondiente al compresor, se puede observar que no existen modos de falla en el cuadrante crónico-agudo, pero sin una muy cercana, que se encuentra en el cuadrante agudo, lo que significa que, para este modo de falla correspondiente a sobrecalentamiento de equipo, mantiene un alto tiempo medio de reparación y un número de fallas intermedio que no alcanza para caer en la categoría de crónico-agudo. Para el cuadrante crónico ocurre lo mismo, pero para el modo de falla de filtros de aire en mal estado, la cual no sobrepasa la línea hacia el cuadrante crónico, pero está bastante cerca, aun así, se considerará como leve, pero es necesario mantenerla en observación. Respecto a lo que nos indican las líneas de iso-indisponibilidad, el modo de falla que deberíamos tener más a consideración sería la del sobrecalentamiento de equipo que cae sobre la iso-indisponibilidad del 100%, correspondiente a 5 horas, seguido de la del filtro de aire, que se encuentra entre el 70% y 100%.

Para el último de los gráficos Jack knife, correspondiente al camión tolva (figura 4.13),

se observan, dos modos de falla en el cuadrante crónico-agudo, correspondientes a el camión no frena correctamente y camión no arranca, mantienen fallas frecuentes y que mantienen un alto tiempo medio de reparación. Por el lado del cuadrante agudo, no existe ningún modo de falla que mantengan un tiempo medio de reparación elevado y bajo número de fallas. Para el cuadrante crónico, existe solo un modo de falla correspondiente a rueda delantera derecha pinchada, la cual esta cercana al cuadrante crónico-agudo, mantiene un alto número de fallos, pero sus tiempos medios de reparación no alcanzan a superar el promedio para corresponder al cuadrante crónico-agudo. Con respecto al cuadrante leve, se encuentran los modos de falla de rueda trasera izquierda pinchada y camión se sobrecalienta con bajo número de fallos y bajo tiempo medio de reparación. Por otro lado, considerando las líneas de iso-indisponibilidad, el modo de falla a tener en mayor consideración, corresponde a el equipo no frena correctamente, que cae sobre la curva de iso-indisponibilidad de 100% equivalentes a 10 horas de detención en promedio, seguido del camión no arranca, que se encuentra entre el 60% y el 70%.

### **5.5 Análisis de modos y efectos de falla (AMEF) y recomendaciones**

El equipo utilizado para el análisis de modos y efectos de falla, como se mencionó en el capítulo 4, es el Scoop Wagner, el cual, para los distintos análisis de criticidad, arrojó ser el más crítico respecto a los tiempos de detención. Se debe tener en consideración que, según los resultados entregados por la matriz de criticidad, el análisis de Pareto y la metodología de Jack Knife, los modos de fallo que presentan mayores complicaciones al equipo, es el nivel bajo de aceite y la falta de engrase, donde para el primero, representa un total de 76 horas de detención en el periodo para el equipo u ocho días aproximadamente, teniendo un mayor número de fallas y tiempo medio de reparación. Para la falta de engrase, representa un total de 33 horas de detención en el periodo o cuatro días aproximadamente, este presenta muchas fallas, con un tiempo medio de reparación alto. Ambos modos de falla, llevado al gráfico de Jack Knife, correspondería al cuadrante crónico-agudo, por lo tanto, deberán ser los principales a tener en consideración a la hora de la realización del mantenimiento, aplicando un análisis causa raíz (RCA), esto con la finalidad de poder mover dichos modos de falla, al cuadrante leve, para mantener un equipo con mayor confiabilidad. Por otro lado, respecto a los demás modos de falla como enfriador

derecho suelto, equipo se detiene constantemente, ruptura en manguera de aire, rueda delantera derecha pinchada, es recomendado la realización de un mantenimiento predictivo, con el mismo objetivo de posicionar dichos modos de falla al cuadrante leve dentro del gráfico de Jack knife, disminuyendo su tiempo medio de reparación, para una mayor confiabilidad del equipo. Para los modos de falla que mantienen altas detenciones, a bajo tiempo medio de reparación tales como filtros de aire en mal estado y nivel bajo de aceite hidráulico, se recomienda la aplicación de un mantenimiento basado en la condición (RCB), para la disminución de la cantidad de detenciones con el mismo objetivo de posicionar estos modos de falla en el cuadrante leve dentro del diagrama de Jack Knife para aumentar la confiabilidad del equipo.

Respecto al análisis de modos y efectos de fallo (AMEF), realizado en base a el manual del fabricante, fue necesario separar el sistema (Scoop Wagner) en equipos, los cuales fueron seleccionaron, respecto a los modos de falla ocurridos durante el periodo de estudio. Por lo que se recomienda la utilización de este análisis, el cual está separado por equipo y por fallos potenciales (modo de falla, efectos y causas del modo de falla), Para la fácil identificación del problema y para la creación de un plan de mantenimiento que incluya los diferentes puntos de cada uno de los equipos del sistema, con la finalidad de disminuir el número de detenciones no deseadas del equipo, aumentar su productividad y mejorar su confiabilidad. Además, es necesario tener en consideración, futuros estudios de análisis de criticidad a los procesos y equipos, para verificar su nuevo estado de criticidad y comprobar la existencia de nuevos procesos o equipos críticos.

## 6. CONCLUSIONES

Dentro del trabajo realizado, se logró con el cumplimiento del objetivo general, de la identificación del equipo más crítico de la minera Paicaví, a través del análisis de criticidad, además de la obtención del análisis de modos y efectos de falla, lo que permitirá a minera Paicaví, tomar medidas, respecto a el equipo más crítico del sector mina.

Respecto al estudio sobre bases teóricas, bibliográficas y creación de la base de datos, se realizó correctamente, con ayuda del equipo de mantenimiento de la minera Paicaví, realizando un estudio de las fallas asociadas a los equipos del sector mina, durante un periodo de 4 meses, entre el 9 de diciembre de 2021 hasta el 10 de abril de 2022, en el cual se guardó la información de cada falla en formato físico, para la creación de la base de datos.

En relación con lo anterior, considerando la información de la base de datos y en conversación con el equipo de mantenimiento, operaciones y gerencia, se definieron los factores asociados a los procesos, para la obtención de la frecuencia y la consecuencia, logrando la jerarquización de los procesos, donde se concluyó, que el proceso más crítico pertenece a el proceso de carguío, el cual mantiene el doble del valor de la frecuencia de falla en comparación a los demás procesos, además si bien afecta en un mismo valor al factor de impacto operacional, mantiene un valor muy elevado para el factor de seguridad y medio ambiente, por lo que afecta directamente al proceso, por su baja confiabilidad y representa un alto riesgo para los operadores de los equipos utilizados en ese proceso.

Obtenida ya la jerarquización de los procesos, y con la utilización del análisis de Pareto, se pudo obtener los problemas de mayor importancia dentro de los procesos críticos y semicríticos, basado en su tiempo de detención, definiéndolos respecto a cada equipo asociado a los diferentes procesos. Donde los equipos asociados a los problemas más críticos son, el Scoop Wagner, Scoop France Loader y la retroexcavadora CAT.



En base a los resultados obtenidos anteriormente (base de datos, matriz de criticidad y análisis de Pareto), se consideraron los equipos críticos y semicríticos para la aplicación del análisis de Jack knife, con lo que se obtuvo un análisis más detallado y los modos de fallo más críticos respecto a cada equipo, con lo que se pudo definir que, para este caso, el equipo más crítico, corresponde al Scoop Wagner y sus modos de falla a tener en consideración para la realización de un futuro plan de mantenimiento, corresponderían principalmente a la falta de engrase y el nivel bajo de aceite.

Para finalizar, seleccionado el equipo más crítico, se logró la aplicación del análisis de modo y fallo de efectos al Scoop Wagner, considerando la información obtenida de la base de datos, además de la información obtenida por el manual del fabricante del equipo. Con la cual se pudo generar recomendaciones y acciones correctivas de mantenimiento, respecto a cada causante del modo de falla del sistema.

## 7. REFERENCIAS

- Ardila Perez , G., & Mantilla Gonzales, J. J. (2008). *DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO BASADA EN RCM PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS Y RECIPROCANTES, COMPRESORES Y MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA DE LA PLANTA DE INYECCIÓN DE AGUA CASABE, PLANTA DE REINYECCIÓN DE AGUA RESIDUAL CANTAGALLO Y ESTACIÓN 2 DE RECOLEC.* Bolivia.
- Bestratén Belloví , M., Orriols Ramos, R., & Mata París, C. (2004). Análisis modal de fallos y efectos. AMFE. 4-5-6.
- Bestratén Bellovi, O. (2004). Analisis modal de fallos y efectos AMFE. *Notas tecnicas de prevención NTP*, 8.
- Dictionary, C. (s.f.). *Cambridge Dictionary* . Obtenido de <http://dictionary.cambridge.org>
- Dirección general, d. p. (s.f.). guía técnica métodos cualitativos para el análisis de riesgos. *guía técnica métodos cualitativos para el análisis de riesgos.*
- Domenech Roldán , J. (s.f.). Diagrama de Pareto . *Diagrama de Pareto* .
- Española, R. A. (s.f.). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <http://dle.rae.es>
- Flores Cerpa, A. I. (2019). *Diseño de un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM a chipper 96 fulghum fibres Coronel.* Concepcion.
- Fuentes Salcedo , F. A. (2019). *material de mi autoría para el modulo de gestión del mantenimiento industrial.* Curico.
- Garrido, S. G. (2003). *Organización y Gestión Integral de Mantenimiento* . Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- ISO. (2008). *ISO*. Obtenido de ISO 9001:2008(ES) Sistemas de gestion de la calidad - Requisitos: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9001:ed-4:v2:es>
- ISO. (2014). *ISO 55000*. Obtenido de ISO 55000:2014(es) Gestion de activos: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:55000:ed-1:v2:es>
- Knights, P. (2004). *Downtime priorities, Jack-knife diagrams and the business cycle.* surrey.

- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. North Carolina: Industrial Press.
- Norway, S. (2001). *Norsok Standard*. Noruega.
- Pistarelli, A. (2017). *Manual de Mantenimiento: Ingeniería, Gestión y Organización*. Argentina: A.J Pistarelli.
- Provedano, G. D. (11 de Enero de 2021). *Terotecnic*. Obtenido de Terotecnic Ingeniería : <https://terotecnic.com/ingenieria/iso-55000-todo-lo-que-tiene-que-saber-al-respecto/>
- Rivas Saldaña, F., & Gattas Beher , F. (marzo de 2020). Reporte Técnico Proyecto Chépica Minera Paicaví S.A.
- Romero Carranza, P., & Jose. (s.f.). ANALISIS DE CRITICIDAD Y ESTUDIOS RCM DEL EQUIPO DE MAXIMA CRITICIDAD DE UNA PLANTA DESMOTADORA DE ALGODON. *ANALISIS DE CRITICIDAD Y ESTUDIOS RCM DEL EQUIPO DE MAXIMA CRITICIDAD DE UNA PLANTA DESMOTADORA DE ALGODON*. ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA , SEVILLA.
- Sales, M. (2013). Diagrama de Pareto. *Planificación y control de proyectos*.
- Viveros Gunckel, P., & Mena Bustos, R. (s.f.). Analisis RAM-RBD.
- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013). PROPUESTA DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO Y SUS PRINCIPALES HERRAMIENTAS DE APOYO. *INGENIARE*, 125-138.

## 8. APÉNDICE

Tabla A.1 Especificaciones fallas del Scoop Wagner (elaboración propia).

| Etiquetas de fila  | Numero de intervenciones | Horas de detención | MTRR        |
|--|--------------------------|--------------------|-------------|
| Batería en mal estado  | 1                        | 4,55               | 4,6         |
| Enfriador derecho suelto                                       | 1                        | 16,3               | 16,3        |
| Equipo no arranca  | 1                        | 2                  | 2,0         |
| Equipo se apaga  | 1                        | 1                  | 1,0         |
| Equipo se detiene constantemente                               | 1                        | 12                 | 12,0        |
| Equipo se frena  | 1                        | 2                  | 2,0         |
| Falta engrase  | 4                        | 33,13              | 8,3         |
| Filtros de aire en mal estado                                  | 8                        | 38,93              | 4,9         |
| Fuga de aceite por conexión mal hecha                          | 1                        | 5                  | 5,0         |
| Fuga de aceite por manguera hidráulica por oring en mal estado | 1                        | 4                  | 4,0         |
| Manguera hidráulica de pala                                    | 1                        | 3                  | 3,0         |
| Motor de arranque dañado                                       | 1                        | 4                  | 4,0         |
| Nivel bajo de aceite   | 12                       | 75,93              | 6,3         |
| Nivel bajo de aceite de transmisión                            | 4                        | 24,1               | 6,0         |
| Nivel bajo de aceite hidráulico                                | 7                        | 37,34              | 5,3         |
| Rueda delantera derecha pinchada                               | 1                        | 9                  | 9,0         |
| Ruptura en manguera de aire                                    | 1                        | 10,25              | 10,3        |
| <b>Promedio general</b>  | <b>2,76</b>              | <b>16,62</b>       | <b>6,11</b> |

Tabla A.2 Especificaciones fallas del Scoop France Loader (elaboración propia).

| Etiquetas de fila                    | Numero de intervenciones | Horas de detención | MTRR         |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------|
| Equipo no hace nada                  | 2                        | 11                 | 5,5          |
| Falla motor de arranque              | 1                        | 3                  | 3,0          |
| Filtro de aire en mal estado         | 3                        | 4                  | 1,3          |
| Nivel bajo de aceite de transmisión  | 1                        | 1                  | 1,0          |
| Nivel bajo de aceite hidráulico      | 4                        | 4                  | 1,0          |
| Perdida de aire en neumático derecho | 1                        | 2                  | 2,0          |
| Quiebre de crucetas                  | 1                        | 5                  | 5,0          |
| Rueda delantera derecha pinchada     | 2                        | 4                  | 2,0          |
| Rueda frontal izquierda pinchada     | 3                        | 17,5               | 5,8          |
| Tubo de escape roto                  | 1                        | 4                  | 4            |
| <b>Promedio general</b>              | <b>1,9</b>               | <b>5,55</b>        | <b>3,067</b> |

Tabla A.3 Especificaciones fallas Retroexcavadora (elaboración propia).

| Etiquetas de fila              | Numero de intervenciones | Horas de detención | MTRR        |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------|
| Falla intermitente             | 1                        | 4                  | 4,0         |
| Falta de engrase               | 3                        | 13                 | 4,3         |
| Filtros de aire en mal estado  | 5                        | 5                  | 1,0         |
| Ruptura de manguera hidraulica | 1                        | 3                  | 3,0         |
| <b>Promedio general</b>        | <b>2,5</b>               | <b>6,25</b>        | <b>3,08</b> |

Tabla A.4 Especificaciones fallas Jack Leg (elaboración propia).

| Etiquetas de fila               | Numero de intervenciones | Horas de detención | MTRR         |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------|
| Equipo no opera                 | 1                        | 3                  | 3            |
| Nivel bajo de aceite            | 6                        | 3                  | 0,5          |
| Ruptura de barra de perforación | 6                        | 6                  | 1            |
| Ruptura en manguera de aire     | 1                        | 2                  | 2            |
| <b>Promedio general</b>         | <b>3,5</b>               | <b>3,5</b>         | <b>1,625</b> |

Tabla A.5 Especificaciones fallas Compresor (elaboración propia).

| Etiquetas de fila             | Numero de intervenciones | Horas de detención | MTRR        |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------|
| Filtro de aire en mal estado  | 2                        | 4                  | 2           |
| Sobrecalentamiento del equipo | 2                        | 5                  | 2,5         |
| <b>Total general</b>          | <b>2</b>                 | <b>4,5</b>         | <b>2,25</b> |

Tabla A.6 Especificaciones fallas Camión Tolva (elaboración propia).

| Etiquetas de fila                | Numero de intervenciones | Horas de detención | MTTR       |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| Camión no arranca                | 2                        | 9                  | 4,5        |
| Camión se sobrecaliente          | 1                        | 3                  | 3,0        |
| Equipo no frena correctamente    | 2                        | 10                 | 5,0        |
| Rueda delantera derecha pinchada | 2                        | 7                  | 3,5        |
| Rueda trasera izquierda pinchada | 1                        | 2                  | 2,0        |
| <b>Total general</b>             | <b>1,6</b>               | <b>6,2</b>         | <b>3,6</b> |

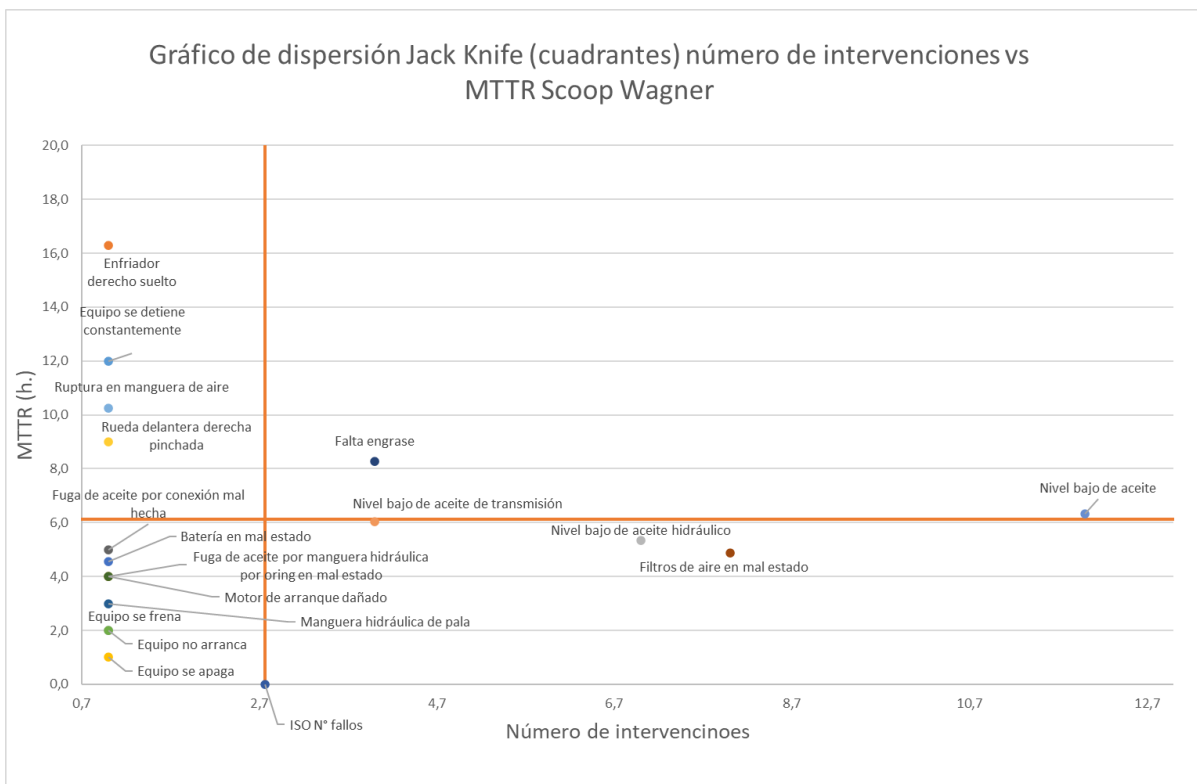


Figura B.1: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR Scoop Wagner. (elaboración propia).

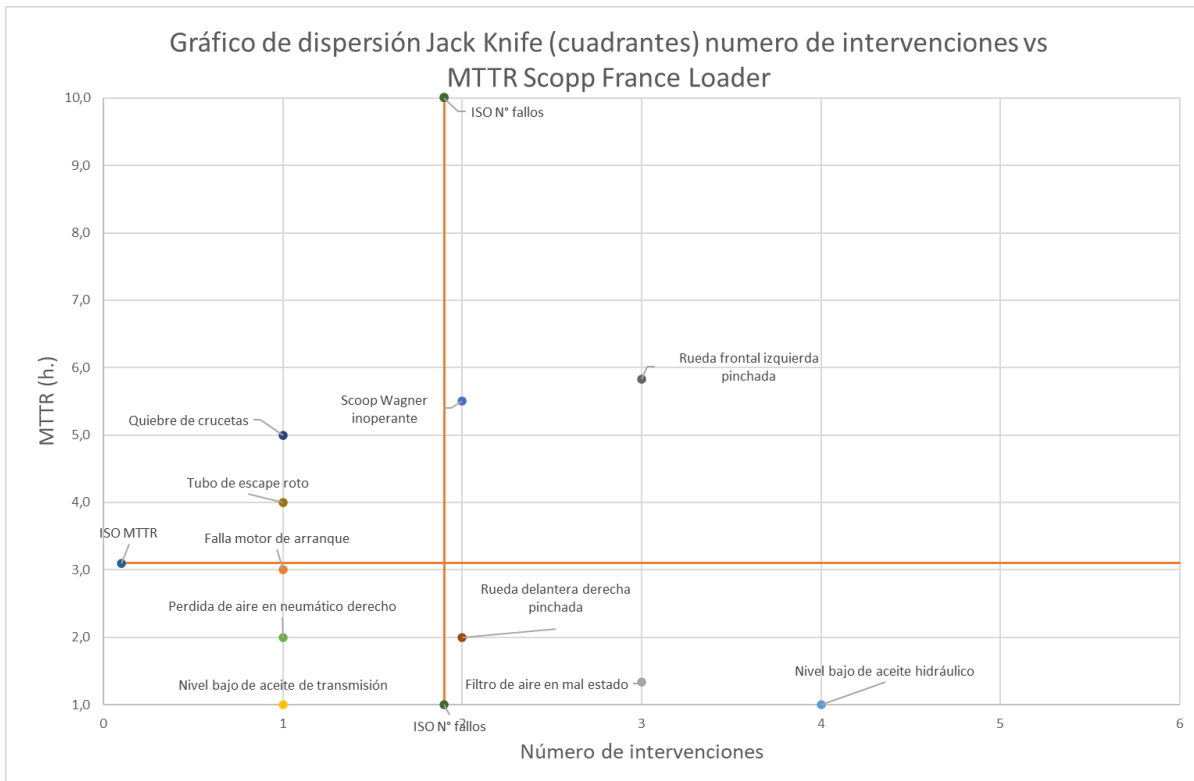


Figura B.2: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR Scoop France Loader. (elaboración propia).

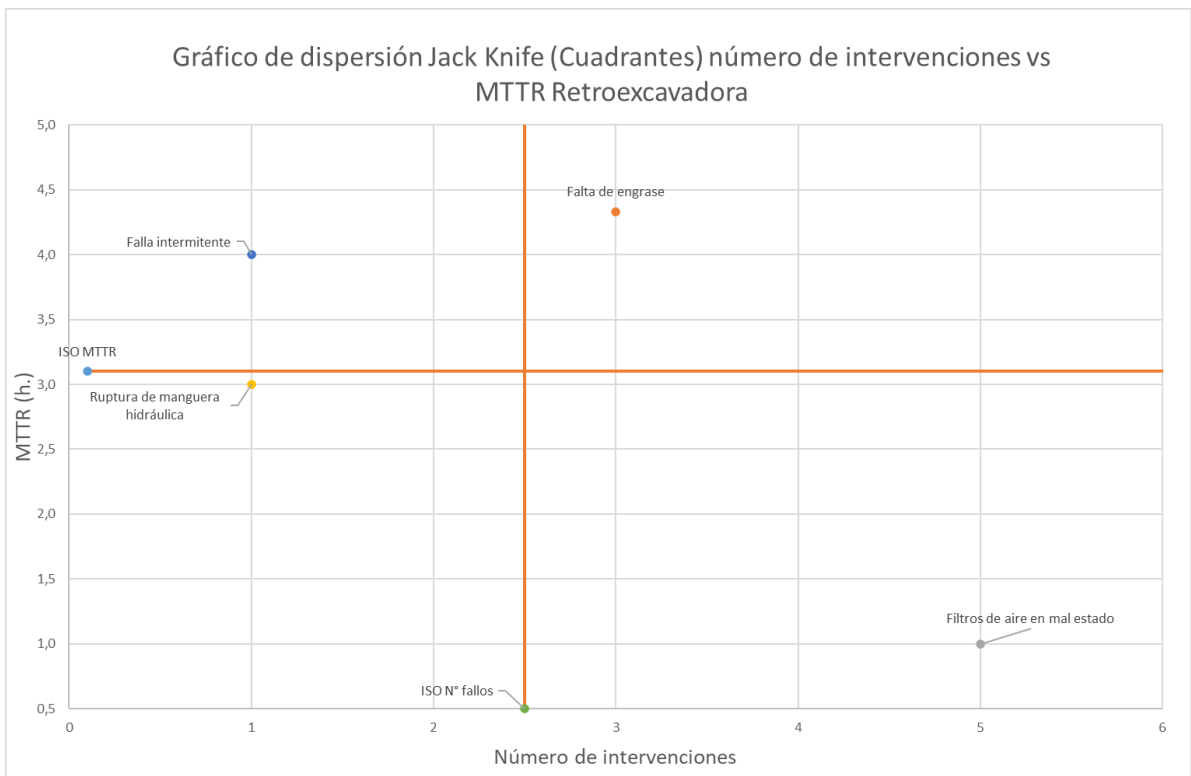


Figura B.3: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR Retroexcavadora. (elaboración propia).

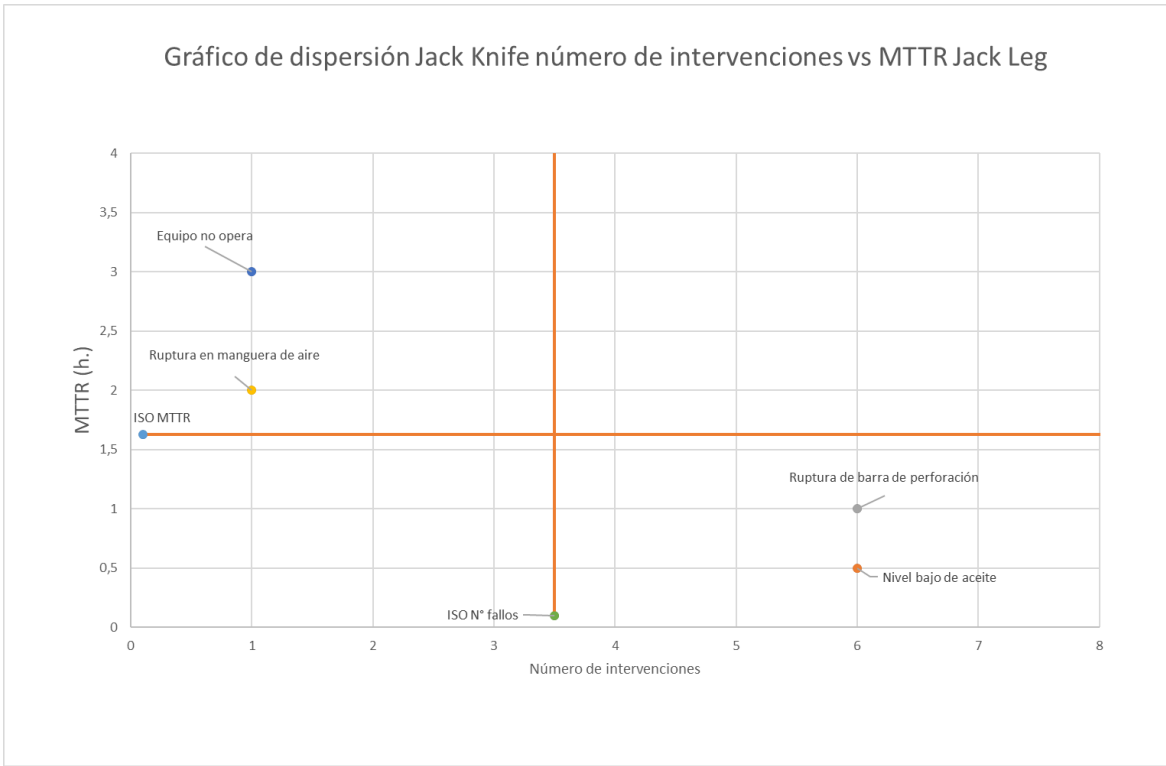


Figura B.4: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR Jack leg. (elaboración propia).

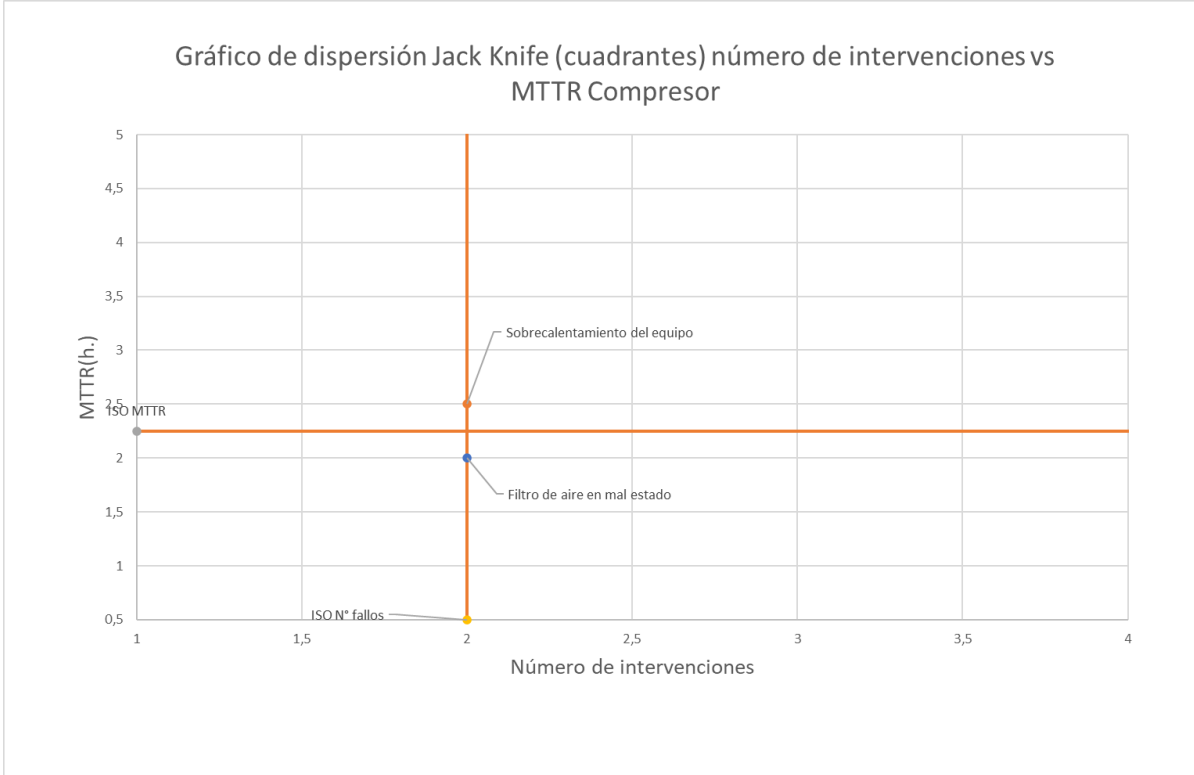


Figura B.5: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR compresor. (elaboración propia).

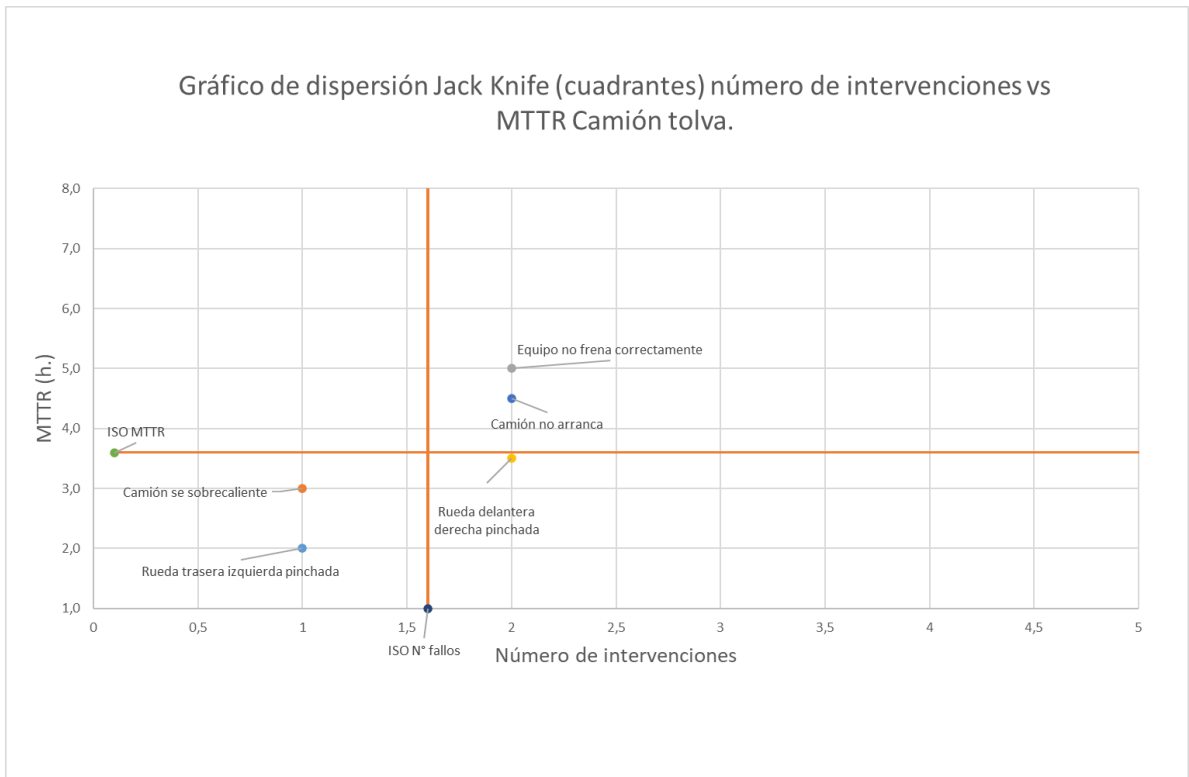


Figura B.6: Gráfico de dispersión Jack Knife (cuadrantes) número de intervenciones vs MTTR camión tolva. (elaboración propia).

Tabla A.7 análisis de modos y efectos de falla Scoop Wagner (elaboración propia).



| SISTEMA/SUBSISTEMA                               | EQUIPO     | DESCRIPCIÓN DE LA FUNCIÓN   | FALLA FUNCIONAL                       | FALLO N° | FALLOS POTENCIALES           |   |  | ESTADO ACTUAL |   |   |     | ACCIÓN CORRECTIVA  |
|--|------------|---|---------------------------------------|----------|------------------------------|---|--|---------------|---|---|-----|--|
|  |            |   |                                       |          | MODOS DE FALLO               | EFECTOS                                       | CAUSAS DEL MODO DE FALLO                         | F             | G | D | IPR |  |
|  | Motor      | Transformar la energía de combustibles fósiles en energía mecánica para el movimiento del equipo. | Perdida total de movilidad del equipo | 1        | El motor no gira             | No puede ser utilizado                        | Problemas eléctricos                             | 4             | 7 | 1 | 28  | Consultar tabla de averías eléctricas.   |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Problemas con el arranque                        |               |   |   |     | Inspección de carbones y embobinado.   |
|  |            |   |                                       | 2        | Ruidos secos en las válvulas | Sobrecalentamiento y mal funcionamiento       | Nivel del aceite bajo o lubricación deficiente   | 4             | 4 | 4 | 64  | Llene con el aceite adecuado hasta el nivel adecuado.  |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Resortes de válvulas defectuosos                 |               |   |   |     | Cambie los resortes de la válvula.   |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Juego de válvula incorrecto, válvulas dañadas    |               |   |   |     | Ajuste y si es necesario cambie.   |
|  |            |   |                                       | 3        | Aceite en el escape          | Pérdida de potencia del equipo                | Aros de pistones gastados                        | 1             | 4 | 1 | 4   | Realice un cambio de aros de pistón.   |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Guías de válvulas gastadas                       |               |   |   |     | Realice el cambio de las válvulas.   |
|  |            |   |                                       | 4        | Excesivo humo negro o gris   | Mala combustión, falta de potencia del equipo | Filtro de aire taponado                          | 2             | 2 | 1 | 4   | Limpie los filtros y si es necesario cambie.   |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Válvula o válvulas de inyección defectuosas      |               |   |   |     | Limpieza de inyectores y si es necesario cambie.   |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Combustible de mal calidad                       |               |   |   |     | Drene el sistema, cambie el filtro de combustible y vuelva a llenarlo con un combustible de buena calidad. |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Tubería de escape restringida                    |               |   |   |     | Limpie la tubería de escape y si es necesario, cambie.   |
|  |            |   |                                       | 5        | Baja presión del aceite      | Sobrecalentamiento del equipo                 | Bomba de aceite defectuosa                       | 2             | 7 | 2 | 28  | Reemplace.   |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Medidor de presión defectuoso                    |               |   |   |     |  |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Tubo de succión de la bomba de aceite defectuoso |               |   |   |     |  |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Rodamientos o árbol de levas gastados            |               |   |   |     |  |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Rodamientos o cigüeñal gastados                  |               |   |   |     |  |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Rodamiento gastado en engranaje loco             |               |   |   |     |  |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Enfriador o filtro del aceite sucio              |               |   |   |     |  |
|  |            |   |                                       | 6        | Consumo excesivo de aceite   | Sobrecalentamiento y desgaste del motor       | Fugas de aceite                                  | 9             | 7 | 1 | 63  | Identificación de fuga y reparar.  |
|  |            |   |                                       |          |                              |   | Temperatura del aceite muy alta                  |               |   |   |     | Controle la operación y repare el enfriador del aceite si fuera necesario.                                 |
| Guías de válvula gastadas                        | Reemplace. |   |                                       |          |                              |   |  |               |   |   |     |  |
| Aros de pistones y camisas de cilindros gastados |            |   |                                       |          |                              |   |  |               |   |   |     |  |
| Anillos de sello en el turboalimentador gastados |            |   |                                       |          |                              |   |  |               |   |   |     |  |

Scoop Wagner

|  |   |  |  |  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
|--|---|--|--|--|--|---|------------------|-------------------------------|--------------------------|----|---|---|----|-----------------------------------|
| Sistema Hidráulico   | Proveer el aceite hidráulico necesario para mover componentes mecánicos | Perdida total de movimiento del sistema hidráulico | 1  | Fuga de aceite   | Sobrecalentamiento y pérdida de funcionalidad    | Línea de manguera desgastada o defectuosa                 | 9                | 4                             | 1                        | 36 | Reemplace.  |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Conectores incorrectos o dañados                          |                  |                               |                          |    | Limpie o reemplace.   |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Suciedad o pintura sobre los sellos o por debajo de éstos |                  |                               |                          |    | Reemplace.  |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Placas de sellos flojas                                   |                  |                               |                          |    | Localice y repare la fuga.  |   |    |                                   |
|  |   |  | 2  | Espuma excesiva en el aceite   | Oxidación, cavitación y reducción de lubricación | Fuga en el lado de succión de la bomba                    | 4                | 7                             | 2                        | 56 | Purgue el sistema hidráulico y vuelva a llenar con el aceite apropiado.               |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Aceite del tipo o viscosidad inadecuada                   |                  |                               |                          |    | Reemplace la bomba.   |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Bomba desgastada  |                  |                               |                          |    | Limpieza de enfriador y si es necesario reemplace.                                    |   |    |                                   |
|  |   |  | 3  | Temperatura del aceite excesiva  | Deterioro de aceite hidráulico y de sellos       | Enfriador de aceite hidráulico obstruido o sucio          | 4                | 7                             | 2                        | 56 | Agregue aceite hidráulico.  |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Nivel de aceite del sistema bajo                          |                  |                               |                          |    | Purgue el sistema hidráulico y vuelva a llenar con el aceite apropiado.               |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Aceite del tipo o viscosidad inadecuada                   |                  |                               |                          |    | Consulte al manual.   |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Ciclado excesivo de la carga                              |                  |                               |                          |    | Reemplace la bomba.   |   |    |                                   |
|  |   |  | 4  | Presión insuficiente   | No funcionamiento del equipo hidráulico          | Fuga interna pasados los sellos o cilindros               | 2                | 7                             | 2                        | 28 | Desarme e inspeccione. Repare o reemplace si es necesario.                            |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Válvula de carga defectuosa                               |                  |                               |                          |    | Medir flujo y presión, reemplazar si es necesario.                                    |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Bomba desgastada  |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
|  |   |  | Sistema eléctrico  | Proveer de energía al sistema completo (arranque, sensores, luces, palancas, accesorios) | Perdida de movimiento y control del equipo       | 1   | El motor no gira | Equipo no puede ser utilizado | Carga de la batería baja | 2  | 7   | 1 | 14 | Compruebe la gravedad específica. |
|  |   |  |  |  |  |   |                  |                               | No hay electricidad      |    |   |   |    | Compruebe alimentación.           |
| Interruptor de arranque defectuoso   | Reemplace.  |  |  |  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
| Interruptor de seguridad del arranque abierto                              | Coloque la transmisión en neutro y aplique el freno de estacionamiento. |  |  |  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
| Interruptor de seguridad de arranque ajustado inadecuadamente o defectuoso | Reajuste o reemplace.   |  |  |  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
| Alta resistencia en el circuito  | Limpie y apriete todas las conexiones.                                  |  |  |  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
| Motor de arranque defectuoso   | Revisar conexión a batería y masa si es necesario, reemplace.           |  |  |  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
| Solenoides de arranque defectuoso  | Reemplace.  |  |  |  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
| 2  | El motor de arranque gira lentamente                                    | Equipo no puede ser utilizado                      |  |  |  | Motor de arranque defectuoso                              | 2                | 7                             | 1                        | 14 | Reemplace.  |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Alta resistencia en el circuito                           |                  |                               |                          |    | Compruebe que no exista corrosión, limpie y apriete todas las conexiones.             |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Carga de la batería baja                                  |                  |                               |                          |    | Compruebe gravedad específica, si no reemplace.                                       |   |    |                                   |
| 3  | Salida de la batería baja   | falta de fuerza para arranque                      |  |  |  | Carga o arrastre excesivo del motor                       | 2                | 4                             | 2                        | 16 | Compruebe que la viscosidad del aceite sea adecuada, localice averías de subsistemas. |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Celda de batería defectuosa                               |                  |                               |                          |    | Reemplace la batería.   |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Bajo nivel del electrolito                                |                  |                               |                          |    | Ajuste la tensión de la correa. Reemplace las correas si es necesario.                |   |    |                                   |
|  |   |  |  |  |  | Caja de la batería dañada                                 |                  |                               |                          |    | Apague todos los interruptores cuando apague el motor.                                |   |    |                                   |
|  |   |  | Las correas impulsoras resbalan  | Revisar y limpiar todos los terminales y tierras.  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
|  |   |  | Los circuitos eléctricos quedan energizados cuando el motor está apagado | Reemplace.   |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
|  |   |  | Alta resistencia en circuito.  | Revisar los mantenimientos básicos, sino reemplace.                                      |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
| Cableado defectuoso.   |   |  |  |  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |
| Alternador defectuoso.   |   |  |  |  |  |   |                  |                               |                          |    |   |   |    |                                   |

|   |  |                                   |                     |   |  |  |                   |                               |                    |    |  |
|---|--|-----------------------------------|---------------------|---|--|--|-------------------|-------------------------------|--------------------|----|--|
| Transmisión                                     | Transferir la potencia generada por el motor a las ruedas del equipo para su movimiento.   | Perdida de movimiento del equipo. | 1                   | Vibración o ruido excesivo  | Afloje de componentes y problemas de salud                   | Rodamientos desgastados o lubricación insuficiente | 2                 | 9                             | 1                  | 18 | Revisar que no estén flojos, si es así, reemplace.   |
|   |  |                                   |                     |   |  | Línea de transmisión doblada o desequilibrada      |                   |                               |                    |    | Compruebe separación entre piezas vencidas y alinear, si esta muy doblada o dañada, reemplace.                               |
|   |  |                                   |                     |   |  | Montaje flojo                                      |                   |                               |                    |    | Reemplace tornillos y casquetes y apriete adecuadamente.   |
|   |  |                                   |                     |   |  | Separación insuficiente                            |                   |                               |                    |    | Revisar que no estén flojos, si es así, reemplace.   |
|   |  |                                   | 2                   | Desgaste excesivo de los conjuntos de rodamientos de cruceta                                    | Desgaste mas rápido del equipo, calentamiento de transmisión | Mala alineación o descentramiento                  | 2                 | 4                             | 4                  | 32 | Revise la alineación, descentramiento y equilibrio. Repare o cambie como corresponda.  |
|   |  |                                   |                     |   |  | Línea de transmisión desequilibrada                |                   |                               |                    |    | Compruebe que los contrapesos sean los adecuados y que la línea de transmisión no esté distorsionada, si lo esta, reemplace. |
|   |  |                                   | 3                   | La línea de transmisión no transmite potencia   | Equipo no puede ser utilizado                                | Fallo de junta                                     | 2                 | 7                             | 1                  | 14 | Reemplace.   |
|   |  |                                   |                     |   |  | Estrías dañadas                                    |                   |                               |                    |    |  |
|   |  |                                   |                     |   |  | Yugo dañado  |                   |                               |                    |    |  |
|   |  |                                   | Ruedas y neumáticos | Absorber el peso del equipo, transmitir la tracción al piso, y permitir el cambio de dirección. | limita el movimiento del equipo.                             | 1  | Fuga en neumático | Equipo no puede ser utilizado | Corte en neumático | 6  | 7  |
| Válvula defectuosa                              | Apretar las piezas.  |                                   |                     |   |  |  |                   |                               |                    |    |  |
| Junta tórica dañada                             | Reemplace la junta tórica.   |                                   |                     |   |  |  |                   |                               |                    |    |  |
| Fuga entre el reborde del neumático y la llanta | Limpie, e inspeccione la banda del asiento del reborde del neumático reemplace las piezas defectuosas, vuelva a montar con lubricante. |                                   |                     |   |  |  |                   |                               |                    |    |  |
| Llanta o soldadura resquebrajada                | Agregue "Tyre Life". Reemplace las piezas defectuosas.   |                                   |                     |   |  |  |                   |                               |                    |    |  |
|   |  |                                   |                     |   |  |  |                   |                               |                    |    |  |