

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

1

Mantenimiento basado en riesgo mediante métodos semicuantitativos aplicados a equipos  
de transporte vertical en empresas de construcción.

Juan Camilo Arenas cardona

Trabajo de Grado para Optar al Título de:

Maestría en Gerencia de Mantenimiento

Director

David Alberto Pertuz Comas

Doctor

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Maestría en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2025

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

2

**Dedicatoria**

Dedico el resultado de este trabajo a quienes hicieron posible ser el profesional que soy hoy en día, que con su constante apoyo, motivación y fe en mi este sueño se hizo posible, mis padres Magnolia y Juan David que han sido mi motor a lo largo de este camino lleno de sacrificio, dedicación y que también sintieron en algunos momentos mi ausencia, espero se sientan muy orgullosos de mí, de poder decirles... si se pudo ¡¡. Al señor Manuel Celedón que desde mi pregrado también fue un apoyo económico y moral que por su generosidad quiso darle un aporte a la sociedad de un profesional integro, a él le debo también quien soy profesionalmente hoy en día.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

3

**Agradecimientos**

El desarrollo de este trabajo merece un amplio agradecimiento a todos mis profesores de maestría quienes entregaron su conocimiento ilimitadamente para que este proyecto se hiciera realidad, a la Universidad Industrial de Santander por abrirme su puertas al conocimiento, su apoyo en todos los aspectos, su buena atención a nosotros como estudiantes y haber habilitado su capacidad científica y herramientas que nos ofrece a nosotros los estudiantes, a mi director de tesis Alberto Pertuz Comas por su apoyo, orientación y conocimiento en la resolución de inquietudes para que este trabajo se desarrollara de manera exitosa.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

4

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	21
1. Planteamiento del problema.....	24
2. Objetivos.....	28
2.1 Objetivo General.....	28
2.2 Objetivos Específicos.....	28
3. Marco teórico .....	29
3.1 Análisis de riesgos .....	31
3.2 Evaluación de probabilidad.....	36
3.2.1 Opinión de expertos .....	37
3.2.1.1 Teoría de posibilidad o Z-número Fuzzy .....	40
3.2.1.2 Calculo peso expertos $W$ .....	42
3.3 Evaluación de consecuencia .....	45
3.3.1 Matriz de criticidad .....	46
3.4 Estimación del riesgo .....	48
3.4.1 Matriz grafica de riesgo .....	50
3.4.1.1 Asignación del SIL .....	53

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

		5
3.5	Aceptación del riesgo.....	54
3.5.1	Criterio ALARP (As Low As Reasonably Practicable).....	54
3.6	Planeación de mantenimiento .....	56
3.7	Diagrama de proceso mantenimiento basado en riesgo .....	57
3.7	Costo de ciclo de vida.....	62
3.7.1	Costo del activo según legislación colombiana .....	67
3.7.2	Valor residual o salvamento.....	67
3.7.3	Toma de decisiones de inversión .....	67
3.7.3.1	Índices para evaluar proyectos de inversión .....	68
3.7.3.1.1	Valor presente neto (VPN).....	68
3.7.3.1.2	Tasa interna de retorno (TIR) .....	69
3.7.3.1.3	Relación costo beneficio .....	70
4	Metodología .....	70
4.1	Descripción general equipo malacate .....	71
4.2	Taxonomía del equipo malacate .....	76
4.3	Aplicación método FMECA .....	77
4.4	Proceso de encuesta a expertos .....	81

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

6

4.5	Cálculo de número prioridad de riesgo (NPR) .....	84
4.5.1	Asignación funciones de membresía en herramienta.....	85
4.5.2	Proceso de cálculo probabilidad de ocurrencia Fuzzy .....	89
5.5.2.1	Proceso desfuzzificacion para nivel de confianza .....	89
4.5.2.2	Adición de peso nivel de confianza a opinión expertos.....	90
4.5.2.3	Cálculo peso experto W .....	93
4.5.2.4	Agregación peso W a opinión de expertos .....	99
4.5.2.5	Cálculo valor promedio fuzzy (Crisp value).....	101
4.5.2.6	Probabilidad de falla del modo de falla por año .....	101
4.5.3	Proceso de cálculo severidad fuzzy .....	104
4.5.4	Resultado número prioridad de riesgo (NPR).....	107
4.6	Análisis Hazop .....	110
4.7	Actualización de plan de mantenimiento .....	119
4.8	Costo del Ciclo de vida (LCC).....	119
4.8.1	Cálculos financieros.....	126
5.	Conclusiones.....	129
6.	Recomendaciones .....	133

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

	7
Referencias Bibliográficas .....	134
Apéndices.....	136

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

8

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Tiempos de elevación y número de viajes diarios en tipos de malacates</i> .....	25
Tabla 2 <i>Desarrollo de las filosofías del mantenimiento a través del tiempo</i> .....	29
Tabla 3 <i>Clasificación de metodologías de análisis de riesgos de acuerdo a información disponible</i> .....	32
Tabla 4 <i>Diseño factores de probabilidad de ocurrencia o frecuencia</i> .....	47
Tabla 5 <i>Diseño factores de consecuencia en matriz de criticidad</i> .....	48
Tabla 6 <i>Diseño de matriz de criticidad</i> .....	49
Tabla 7 <i>Probabilidad de falla en demanda <math>PFD_{avg}</math> requerimientos de seguridad integral</i> .....	50
Tabla 8 <i>Parámetro de consecuencia o nivel de severidad <math>C</math></i> .....	51
Tabla 9 <i>Parámetro de nivel de exposición al evento peligroso <math>F</math></i> .....	52
Tabla 10 <i>Parámetro de nivel de evasión del evento peligroso <math>P</math></i> .....	52
Tabla 11 <i>Parámetro de tasa de demanda en ausencia de SIF <math>W</math></i> .....	53
Tabla 12 <i>Matriz grafica de riesgo</i> .....	53
Tabla 13 <i>Vida útil de los activos según ley 1819 de 2016</i> .....	66
Tabla 14 <i>Criterio de decisión de inversión vía VPN</i> .....	69
Tabla 15 <i>Especificaciones técnicas de equipo malacate de carga <math>c_{max}</math> SC200</i> .....	70

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

9

Tabla 16 <i>Subdivisión taxonómica equipo malacate</i> .....	77
Tabla 17 <i>Funciones primarias y secundarias de elemento parte</i> .....	78
Tabla 18 <i>Falla funcional y su tipología</i> .....	78
Tabla 19 <i>Modo de falla equipo malacate</i> .....	80
Tabla 20 <i>Respuestas frecuencia modos de falla dada por expertos</i> .....	82
Tabla 21 <i>Respuestas severidad modos de falla dados por expertos</i> .....	83
Tabla 22 <i>Número fuzzy según expresión lingüística para asignación de frecuencia</i> .....	86
Tabla 23 <i>Proceso asignación funciones de membresía a cada expresión lingüística</i> .....	87
Tabla 24 <i>Resultados proceso desfuzzificación de funciones de membresía del nivel de confianza</i> .....	90
Tabla 25 <i>Adición peso nivel de confianza a opinión experto 4</i> .....	91
Tabla 26 <i>Adición peso nivel de confianza a opinión experto 2</i> .....	91
Tabla 27 <i>Adición peso nivel de confianza a opinión experto 1</i> .....	92
Tabla 28 <i>Adición peso nivel de confianza a opinión experto 5</i> .....	92
Tabla 29 <i>Criterios comparativos expertos encuestados</i> .....	94
Tabla 30 <i>Tabla número fuzzy para evaluar criterio comparación</i> .....	95
Tabla 31 <i>Criterio de comparación trabajo expertos</i> .....	96
Tabla 32 <i>Criterio de comparación experiencia expertos</i> .....	96

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

	10
Tabla 33 <i>Criterio de comparación educación expertos</i> .....	97
Tabla 34 <i>Criterio de comparación edad expertos</i> .....	97
Tabla 35 <i>Matriz síntesis de comparación principal</i> .....	98
Tabla 36 <i>Peso <math>W_i</math> por cada dimensión experto</i> .....	98
Tabla 37 <i>Peso <math>W</math> por experto</i> .....	99
Tabla 38 <i>Resultados agregación peso <math>W</math> expertos a números fuzzy opinión</i> .....	100
Tabla 39 <i>Valor promedio de números fuzzy (Crisp Value) por cada modo de falla para probabilidad</i> .....	101
Tabla 40 <i>Resultados probabilidad de falla por año equipos malacate en orden de importancia</i> .....	103
Tabla 41 <i>Valor promedio de números fuzzy (Crisp Value) por cada modo de falla para severidad</i> .....	104
Tabla 42 <i>Factores de severidad o consecuencia</i> .....	105
Tabla 43 <i>Matriz de criticidad</i> .....	106
Tabla 44 <i>Resultados severidad de falla en equipos malacate</i> .....	106
Tabla 45 <i>Resultado número prioridad de riesgo (NPR)</i> .....	108
Tabla 46 <i>Análisis Hazop top 15 modos de falla</i> .....	112
Tabla 47 <i>Matriz grafica de riesgo</i> .....	116

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

	11
Tabla 48 <i>Eventos no esperados (modos de falla) para estudio SIL</i> .....	117
Tabla 49 <i>Evaluación eventos peligrosos en matriz grafica de riesgo</i> .....	118
Tabla 50 <i>Datos iniciales para análisis del costo de ciclo de vida</i> .....	120
Tabla 51 <i>Costos de importación y nacionalización equipo nuevo</i> .....	121
Tabla 52 <i>Valores de depreciación del activo</i> .....	122
Tabla 53 <i>Valores de salvamento fin de vida útil</i> .....	122
Tabla 54 <i>Costo energía para la operación</i> .....	123
Tabla 55 <i>Costos mano de obra operador</i> .....	123
Tabla 56 <i>Costos insumos mantenimiento preventivo por año</i> .....	124
Tabla 57 <i>Costos repuestos importantes overall</i> .....	124
Tabla 58 <i>Costos mano de obra técnicos de mantenimiento</i> .....	124
Tabla 59 <i>Costo de servicios para la operación</i> .....	125
Tabla 60 <i>Costo trasportes logísticos</i> .....	125
Tabla 61 <i>Costo póliza de aseguramiento anual</i> .....	125
Tabla 62 <i>Costos operacionales y margen anual equipo malacate</i> .....	126
Tabla 63 <i>Tasa oportunidad e impuesto de renta</i> .....	126
Tabla 64 <i>Resultados financieros equipo A</i> .....	127

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

12

Tabla 65 *Resultados financieros equipo B*..... 127

Tabla 66 *Resultados consolidados y criterios de evaluación de proyectos*..... 128

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

13

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Representación del proceso lógico de análisis del mantenimiento basado en riesgo ...</i>	30
Figura 2 <i>Esquema de jerarquización de expertos fuzzy AHP .....</i>	94

**Lista de ilustraciones**

Ilustración 1 <i>Resultados esperados en el desarrollo de un análisis Hazop</i> .....	34
Ilustración 2 <i>Procedimiento general proceso Hazop</i> .....	35
Ilustración 3 <i>Metodología probabilística para integrar opinión de experto</i> .....	39
Ilustración 4 <i>Función de membresía trapezoidal de Z-numero</i> .....	41
Ilustración 5 <i>Función de membresía triangular de Z- Número</i> .....	41
Ilustración 6 <i>Funciones de membresía fuzzy</i> .....	42
Ilustración 7 <i>Matriz de comparación general</i> .....	43
Ilustración 8 <i>Números par de comparación asociados a números triangulares fuzzy</i> .....	43
Ilustración 9 <i>Matrices de comparación aditiva para análisis expertos</i> .....	44
Ilustración 10 <i>Diagrama ALARP</i> .....	54
Ilustración 11 <i>Proceso reducción ALARP en base a consecuencias y probabilidad de ocurrencia</i> .....	55
Ilustración 12 <i>Diagrama de proceso FMECA mediante métodos semicuantitativos</i> .....	58
Ilustración 13 <i>Diagrama de proceso de definición mantenimiento basado en frecuencia o en base a riesgo</i> .....	59
Ilustración 14 <i>Diagrama de proceso de análisis de peligros mediante técnica Hazop</i> .....	59
Ilustración 15 <i>Diagrama de proceso para aplicación criterio ALARP</i> .....	60

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

15

Ilustración 16 <i>Diagrama de proceso de la evaluación del riesgo mediante análisis en Función Instrumentada de Seguridad SIF</i> .....	61
Ilustración 17 <i>Diagrama de proceso para actualización de plan de mantenimiento en base resultados del SIL</i> .....	62
Ilustración 18 <i>Etapas y aspectos del costo de ciclo de vida del activo</i> .....	65
Ilustración 19 <i>Ensamble general equipo malacate d construcción cmax CS200</i> .....	72
Ilustración 20 <i>Mecanismo de freno de motor</i> .....	73
Ilustración 21 <i>Sistema de seguridad pasadores y celdas de carga</i> .....	73
Ilustración 22 <i>Dispositivo de seguridad</i> .....	74
Ilustración 23 <i>Mecanismo interno dispositivo de seguridad</i> .....	74
Ilustración 24 <i>Sección mástil modular con sistema anclaje a loza</i> .....	75
Ilustración 25 <i>Sistema rodadura de trayectoria lineal</i> .....	76
Ilustración 26 <i>Modelo de pregunta y opciones de respuestas lingüísticas</i> .....	82
Ilustración 27 <i>Funciones de membresía trapezoidal o triangular de acuerdo a expresiones lingüísticas</i> .....	85
Ilustración 28 <i>Matriz pares de comparación de criterios de números fuzzy</i> .....	95

**Lista de Apéndices**

- Apéndice A.** Subdivisión taxonómica de equipo malacate – funciones – modos de falla.  
.....Los apéndices están adjuntos
- Apéndice B.** Matlab 2024b códigos..... Los apéndices están adjuntos
- Apéndice C.** Link encuestas expertos.....Los apéndices están adjuntos
- Apéndice D.** Análisis Hazop.....Los apéndices están adjuntos
- Apéndice E.** Plan de Mantenimiento actualizado.....Los apéndices están adjuntos
- Apéndice F.** Análisis de costo de vida del activo LCC.....Los apéndices están adjuntos

## Glosario

**Encuesta:** Procedimiento de investigación cuantitativa

**Taxonomía:** clasificación ordenada y jerárquica

**Sistema:** conjunto de elementos interrelacionados entre sí

**Fmeca:** Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis

**Función:** Realizar actividad para que fue diseñado

**Falla funcional:** No cumple la función para que fue diseñado

**Modo de falla:** Forma en que una cosa falla

**Probable:** Posibilidad de que algo suceda

**Probabilidad:** Medida de la posibilidad expresada en un numero de 0 a 1, donde cero es imposible y 1 es absolutamente cierto que ocurra.

**MTBF:** Mean time between failures

**Matriz criticidad:** Identifica y prioriza riesgos

**Número prioridad de riesgo (NPR):** valor numérico que se utiliza en el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF o FMEA por sus siglas en inglés) para priorizar los riesgos identificados en un proceso o sistema

**Opinión experto:** juicios o creencias de personas con amplio conocimiento y experiencia en un área específica

**Nivel de confianza:** Certeza de lo que se dice

**Incertidumbre lingüística:** reconoce la vaguedad y ambigüedad inherente a los idiomas hablados.

**Riesgo:** efectos de alguna de las formas de la incertidumbre. La incertidumbre puede dirigir hacia una positiva o negativa consecuencia o ambas.

**Peligro:** fuente, situación o acto que tiene el potencial de causar daño

**Consecuencia:** Efectos generados por la ocurrencia de un riesgo que afecta los objetivos o un proceso de la entidad

**Jerarquización:** proceso de ordenar o clasificar elementos, objetos, información o ideas según un criterio de importancia, nivel o rango

**Peso experto:** Valor de la experiencia

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

18

**Número fuzzy:** extensión de la lógica booleana (que sólo utiliza valores entre 0 y 1, exclusivamente)

**Defuzzificación:** Defuzzificación es el proceso de obtener un valor cuantificable en Lógica

**Función de membresía:** Función matemática que asigna un valor (entre 0 y 1) a un elemento de un universo de discurso, indicando su grado de pertenencia a un conjunto difuso

**Factor de consecuencia:** cualquier característica o evento que puede generar consecuencias, ya sean positivas o negativas, en un proceso o sistema

**Factor de severidad:** magnitud o gravedad de las consecuencias que podrían resultar de un evento peligroso

**Hazop:** Hazard and Operability Study

**Matriz de riesgo:** herramienta de gestión que sirve para identificar, evaluar y priorizar los riesgos en un proyecto o proceso

**Alarp:** As Low As Reasonably Practicable

**SIS:** Sistema Instrumentado de Seguridad

**SIL:** Safety Integrity Level significa Nivel de Integridad de Seguridad

**SIF:** Safety Instrumented Function

**Capa de protección:** es un mecanismo o sistema independiente que se implementa para prevenir o mitigar los peligros de un proceso

**Capex:** Capital Expenditure, Inversión utilizada para comprar, instalar y poner en funcionamiento un activo

**Opex:** Operating Expenses, Gastos utilizados para operación y mantenimiento, incluidos los costos asociados como logística y repuestos.

**Costo ciclo de vida:** Costos de un activo relacionados desde su diseño, operación y fin de vida útil

**VPN:** valor presente neto

**TIR:** Tasa interna de retorno

# MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

19

## Resumen

**Título:** Mantenimiento basado en riesgo mediante métodos semicuantitativos aplicados a equipos de transporte vertical en empresas de construcción.

**Autor:** Juan Camilo Arenas Cardona

**Palabras Clave:** Probabilidad, consecuencia, número prioridad de riesgo, opinión expertos, número fuzzy, función de membresía, modo de falla, jerarquización, peso experto, crisp value, Sil, Sif, Hazop, matriz grafica de riesgo, matriz de criticidad, criterio Alarp, plan de mantenimiento, costo de ciclo de vida, valor presente neto, tasa interna de retorno, valor anual equivalente, costo beneficio.

**Descripción:** El desarrollo de este proyecto contiene 4 etapas generales en el mantenimiento basado en riesgo. Primero se desarrolla un análisis de taxonomía de acuerdo a norma ISO 14224 donde dividimos los componentes del equipo en sistemas, partes e ítem mantenibles de todo el equipo malacate de carga de transporte vertical. Una vez tenemos la taxonomía del activo, procedemos a realizar la descripción de la función para identificar los modos de fallo de todos los ítems mantenibles identificados en el quipo definiendo el tipo de falla y su falla funcional de acuerdo a la norma FMECA ISO 60812. Al final de todo este procedimiento se identificaron 281 modos de falla los cuales serían analizados en la siguiente etapa. Para el análisis de los modos de falla y poder calcular su número de prioridad de riesgo (NPR), fué necesario desarrollar un código de cálculo en la herramienta Matlab, teniendo en cuenta previamente un proceso de encuesta a expertos mediante la técnica de lógica difusa Fuzzy, pues los criterios dados por los expertos fueron traducidos en estimaciones de probabilidad y severidad numérica dando tratamiento semicuantitativo al estudio. Una vez identificado y jerarquizado los modos de falla fueron seleccionados los principales para realizar análisis de peligros mediante análisis Hazop definida en la norma ISO 31010 y posteriormente evaluarlos en matriz grafica de riesgos de acuerdo a norma ISO 61511 donde se identificaron 2 riesgos que requieren tratamiento mediante funciones de seguridad instrumentada SIL. Para estos hallazgos fueron estructurados planes de acción que requieren una mejora en su diseño y acciones de monitoreo, como resultado de este estudio se actualizó el plan de mantenimiento actual del equipo. Como objetivo último de este estudio, se hizo el análisis de ciclo de vida del activo LCC en términos de costos con información histórica del equipo y realizando una proyección futura a 10 años más de operación. Una vez construida la información financiera con costos de operación con sus beneficios se hizo la evaluación aplicando el criterio de valor presente neto, tasa interna de retorno, valor anual equivalente y costo beneficio con el fin de conocer si es necesario o no realizar cambio o renovación tecnológica de equipo.

Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Maestría en Gerencia de Mantenimiento. Director: David Alberto Pertuz Comas. PhD.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

20

**Abstract**

**Title:** Risk-based maintenance using semi-quantitative methods applied to vertical transportation equipment in construction companies

**Author(s):** Juan Camilo Arenas Cardona

**Key Words:** Probability, consequence, risk priority number, expert opinion, fuzzy number, membership function, failure mode, hierarchy, expert weight, crisp value, Sil, Sif, Hazop, graphical risk matrix, criticality matrix, Alarp criterion, maintenance plan, life cycle cost, net present value, internal rate of return, equivalent annual value, cost benefit.

**Description:** The development of this project involves four general stages in risk-based maintenance. First, a taxonomy analysis is performed according to ISO 14224, dividing the equipment components into systems, parts, and maintainable items for all vertical transport winch equipment. Once the asset taxonomy is established, we proceed to perform a functional description to identify the failure modes of all maintainable items identified in the equipment, defining the type of failure and its functional failure according to FMECA ISO 60812. At the end of this entire procedure, 281 failure modes are identified, which will be analyzed in the next stage. To analyze the failure modes and calculate their risk priority number (RPN), it was necessary to develop a calculation code in the Matlab tool, previously taking into account a survey process of experts using the Fuzzy fuzzy logic technique, since the criteria given by the experts were converted into probability predictions and numerical severity, giving a semi-quantitative treatment to the study. Once the failure modes were identified and prioritized, the main ones were selected to perform hazard analysis using Hazard Analysis defined in the ISO 31010 standard and subsequently evaluated using a graphical risk matrix according to ISO 61511 standard, where 2 risks were identified that require treatment by safety instrumented functions (SIL). For these findings, action plans were structured that require an improvement in their design and monitoring actions. As a result of this study, the current maintenance plan for the equipment was updated. As the ultimate objective of this study, a life cycle analysis of the LCC asset was performed in terms of costs with historical information of the equipment and making a future projection for 10 more years of operation. Once the financial information was compiled, including operating costs and benefits, an evaluation was made using the criteria of net present value, internal rate of return, annual equivalent value, and cost to determine whether or not a technological change or renewal of equipment is necessary.

Degree work

Faculty of Engineering. School of Mechanical Engineering. Master's Degree in Maintenance Management. Director: David Alberto Pertuz Comas. PhD.

## **Introducción**

Para la gestión del mantenimiento en las empresas es de gran importancia que los activos desempeñen de manera eficiente la función para los cuales fueron diseñados, que los equipos sean seguros en su operación y a la vez que cumplan con los requerimientos de seguridad necesarios para evitar todo tipo de riesgos en las empresas, es por esto que se busca desarrollar un análisis mediante técnicas de mantenimiento que identifique aquellas situaciones que impacten negativamente la operación o generen eventos catastróficos que involucren las personas. En la actualidad las empresas han comenzado a asumir conciencia sobre el tratamiento y la gestión del riesgo que involucran sus procesos, los cuales se gestionan de manera independiente. Así mismo, son gestionados los procesos de mantenimiento y sus riesgos asociados a las actividades que desempeña el personal técnico y operativo. El contenido de este estudio propone desarrollar una metodología que fusiona o brinda tratamiento de las actividades definidas para el mantenimiento de equipos y también el tratamiento de peligros relacionados a la operación por medio de análisis de riesgos, con el propósito de priorizar actividades que pueden afectar el negocio. El mantenimiento basado en riesgo es una metodología que ofrece un enfoque de integridad y confiabilidad en la estrategia de gestión de riesgo para un plan de mantenimiento óptimo (Faisal I. Khan M. R., 2004)

Actualmente los equipos malacates de carga verticales en las empresas de construcción se estiman como equipos inseguros, de alto riesgo y que por su condición de deterioro generado por su trabajo diario, se considera que es necesario una renovación tecnológica con alta frecuencia para evitar accidentes catastróficos a nivel fatalidad; sin embargo la constructora ha solicitado al

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

22

área de mantenimiento realizar una valoración que permita tener un panorama claro y respaldado acerca del futuro de estos equipos respecto a su renovación tecnológica o su continuidad operacional.

En la actualidad las actividades de mantenimiento se vienen realizando en base a frecuencia, además actualmente no se cuenta con información histórica de los eventos pasados, tiempos perdidos de falla o tiempos de reparación que brinde a un mejor análisis sobre la condición actual del equipo. Desde el comienzo de la nueva administración del departamento se viene realizando mejoramientos e inversiones a nivel de componentes que por mal uso o fin de vida útil se ha visto la necesidad de cambiar, además se estableció rutina preoperacional que brinde información oportuna de la condición operacional del equipo. Para este tipo de equipos, por la condición de trabajo y sector productivo en que se utiliza se ve en la necesidad de establecer un plan de mantenimiento que sea implementado teniendo en cuenta el riesgo, considerando los peligros asociados a las posibles fallas funcionales, así mismo la darle la importancia necesaria a la criticidad de este equipo, considerando los diferentes aspectos operacionales que representa en la empresa tanto en el avance del proyecto constructivo de la estructura, la afectando el cronograma de actividades donde se traduce en retrasos reflejados en sus costos. Durante el proceso de construcción de edificios el uso de los malacates verticales un componente importante ya que por medio de este se transporta los materiales de mampostería a los diferentes niveles, el personal de obreros sube a sus actividades o secciones contratadas y asignadas; por tanto, las condiciones operativas, su buen desempeño y seguridad de las personas hace que el equipo sea considerado un proceso crítico.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

23

La búsqueda de información para este estudio será obtenida mediante encuesta a expertos, pues se aplicará un método que mediante cuestionarios se pueden definir pesos de acuerdo a las características de cada experto, esta técnica es llamada lógica difusa fuzzy, mediante la cual es posible tener resultados de probabilidad y severidad de falla a partir de respuestas lingüísticas convirtiendo sus respuestas en consideraciones numéricas. Por medio de esta información numérica se desea conocer, además, el número de prioridad de riesgo (NPR) por cada modo de falla identificado en el análisis FMECA, donde se podrá jerarquizar y priorizar las actividades de mantenimiento evaluando estos modos de falla en la matriz de criticidad. Para los departamentos de mantenimiento será una forma distinta de obtener datos a partir de las personas que conforman el equipo de mantenimiento que cuentan con muchos años de experiencia y que su criterio profesional es valioso para las empresas.

Para las constructoras y empresas de renta de equipos esta metodología podría ayudarles a gestionar el mantenimiento de equipo, tener una estrategia más segura para las partes involucradas, les ayudará a identificar la severidad sobre los modos de falla al brindarles un tratamiento encaminada a la seguridad funcional del equipo. Este estudio complementará los planes de mantenimientos actuales, y dará una hoja de ruta para aquellos mejoramientos de los sistemas de seguridad de los equipos por medio de rediseños, también actividades sobre su tratamiento para la eliminación o reducción de las probabilidades. La toma de decisiones de acuerdo a los resultados obtenidos sobre la gestión del riesgo estará precedida por una evaluación de costo de vida del activo, pues mediante la proyección de costos de inversión, gastos operacionales y beneficios se tienen los argumentos necesarios para concluir si es viable o no continuar con la operación de estos equipos en la compañía.

## **1. Planteamiento del problema**

En las empresas constructoras es común que se perciba un ambiente de incertidumbre cuando se habla de la operación y mantenimiento de los equipos, pues la gestión de mantenimiento se define que es mínima en la mayoría de ellas. Es común observar en los proyectos constructivos que se prefiera comprar los activos nuevos o también usarlos mediante el modelo renting. Aquellas constructoras con un modelo de departamento de mantenimiento implementado buscan gestionar los activos mediante técnicas que garantice la confiabilidad, optimizar los recursos y disminuir la incertidumbre alrededor de los equipos por medio de actividades donde se tenga presente la valoración del riesgo como factor principal en la operación y mantenimiento.

En los proyectos de construcción la instalación temporal del malacate vertical de carga es una actividad clave para el cumplimiento del cronograma, en este equipo se transporta material y personas a través de la estructura del edificio. No tener malacate para transportar material para las actividades de acabados internos, transporte de equipos, herramientas y demás suministros sería una tarea demorada que pone en riesgo la entrega oportuna de los proyectos, pues de otra manera toda la carga operacional de transporte vertical la asumiría otros equipos como la torre grúa, la cual tarda bastante realizando uno por uno el transporte de material. La confiabilidad y disponibilidad de estos equipos requiere un estudio completo considerando metodologías actualizadas de mantenimiento que ayuden a mejorar las condiciones de los activos, que reduzcan los retrasos en la entrega de los proyectos por causa de los equipos, además brinden impactos positivos en los indicadores estratégicos, de oportunidad y confianza de la compañía.

**MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN**

La operación a baja velocidad de trabajo es una condición que hay que considerar; por tanto, la confiabilidad operacional hace un peso importante que se debe garantizar, pues lleva a que los cronogramas en su mayoría de veces superen las fechas esperadas y esto en términos financieros, genera un aumento de costos de manera exponencial (Cho, 2009). Los proyectos de construcción de edificios por lo general cuentan con un equipo torre grúa, un equipo malacate ambos para el izaje y transporte de cargas en los diferentes niveles del edificio. De acuerdo a estudios los malacates de carga están clasificados de acuerdo al propósito de uso, condiciones de acuerdo a la instalación en sitio, altura de transporte, método de ensamble en el edificio, velocidad, y tamaño (Lee & Han, 2008). Las marcas más conocidas en el sector son Truemax y Cmax de fabricación China, los cuales tiene una capacidad de carga de 2000 kilogramos y una velocidad promedio de 30-38m/min. Según los estudios realizados para un equipo instalado en un edificio entre 80 y 100 metros de altura tiene un promedio de viaje de 14,21 y 15,26 minutos por trayecto operando al 70% de un turno de 8 horas que es igual a 24 y 23 viajes diarios de carga con periodos de 10 min promedio de carga y descarga (Cho, 2009)

**Tabla 1** *Tiempos de elevación y número de viajes diarios en tipos de malacates*

Lifting height (m)	Lead time (min)	Low speed type		Medium speed type		High speed type	
		Time of single lift (min)	Number of daily travels (travels/day)	Time of single lift (min)	Number of daily travels (travels/day)	Time of single lift (min)	Number of daily travels (travels/day)
20	10	11.05	31	10.57	32	32.00	33
40	10	12.11	28	11.14	31	31.00	32
60	10	13.16	26	11.71	29	29.00	31
80	10	14.21	24	12.29	28	28.00	30
100	10	15.26	23	12.86	27	27.00	29
120	10	16.32	21	13.43	26	26.00	28
140	10	17.37	20	14.00	24	24.00	28
160	10	18.42	19	14.57	24	24.00	27
180	10	19.47	18	15.14	23	23.00	26
200	10	20.53	17	15.71	22	22.00	26
220	10	21.58	16	16.29	21	21.00	25
240	10	22.63	15	16.86	20	20.00	24
260	10	23.68	15	17.43	20	20.00	24
280	10	24.74	14	18.00	19	19.00	23
300	10	25.79	14	18.57	19	19.00	23
320	10	26.84	13	19.14	18	18.00	22

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

26

*Nota:* En la tabla se describen 3 tipos de malacates según las velocidades de trabajo y de acuerdo a la altura del proyecto constructivo el tiempo requerido de desplazamiento, también el número de transportes promedio por día. Tomado de: *Basic Study of Smart Robotic Construction Lift For Increasing Resource Lifting Efficiency in High-Rise Building Construction*. 2009. (p 269)

De acuerdo al estudio realizado se determina que el modelo óptimo para el izaje de cargas en un proyecto constructivo está definido por el número de máquinas instaladas, su eficiencia y su estado (Lee & Han, 2008).

Actualmente la compañía tiene implementado en su política el tratamiento oportuno del riesgo principalmente en estos dos equipos de transporte, a su vez el departamento de seguridad vigila su operación, sus condiciones estructurales pues su objetivo es garantizar la vida de los colaboradores, es por eso que el objetivo de este estudio busca unificar los criterios de mantenimiento y riesgo industrial, teniendo en cuenta los peligros que los modos de falla. Los equipos actualmente cuentan con una vida útil reconocida de 10 años y se busca determinar si es viable o no continuar con la operación o definitivamente es hora de pensar en nuevas inversiones en maquinaria.

La información documental actual de departamento no cuenta con modelos de clasificación de criticidad, es por esto que desarrollar un modelo de mantenimiento basado en riesgo nos dará un radar para evaluar los peligros y darle su respectivo tratamiento. Así mismo no se cuenta con información histórica de fallas o tiempos perdidos de operación, por tanto, hace complejo el análisis en base indicadores.

Por parte de la gerencia de la compañía se quiere conocer un estudio responsable y confiable sobre la continuidad o no de la operación de estos equipos, reconocen que son equipos

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

27

que requieren toda la atención y tratamiento, producen en sus usuarios miedo, además, se conoce de 2 eventos en el pasado de desplome de cabina sin consecuencias graves, sin embargo, es una alerta que implica tomar acciones rápidas. El departamento de mantenimiento no cuenta con información de estudios financieros de ingresos y egresos sobre la vida financiera del activo para el cálculo del costo de ciclo de vida, por esto como parte de los objetivos de alcance de este proyecto se busca conocer la vida financiera del equipo y cuantificar el beneficio monetario que tiene la compañía por su uso.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Desarrollar un plan de mantenimiento basado en riesgo, utilizando la evaluación de probabilidad y ocurrencia en equipo malacate en el sector de la construcción.

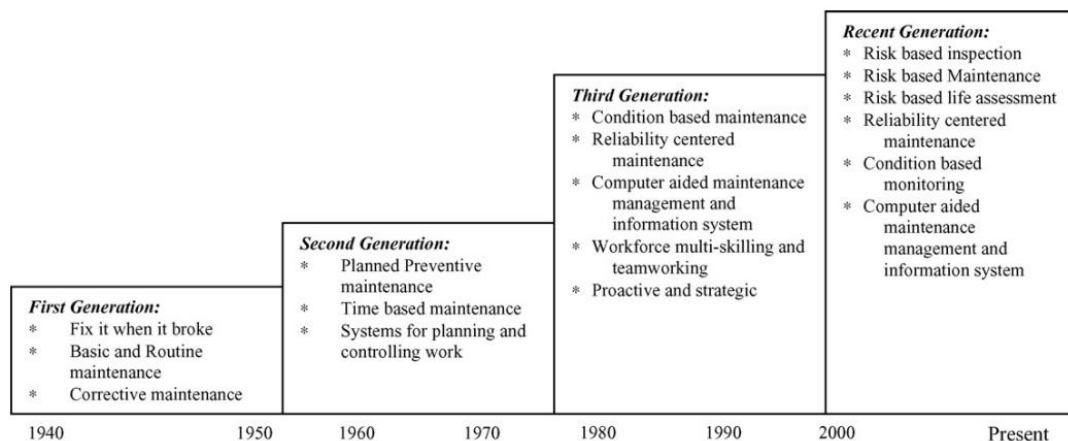
### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar fallas principales relacionadas a la operación funcional mediante método FMECA (Failure Mode and Effect Criticality Analysis) según UNE-EN IEC 60812
- Evaluar el riesgo de los equipos malacates a través del método de jerarquización AHP (Analisis Hierarchy Process).
- Proponer actividades de mantenimiento de acuerdo a resultados obtenidos en la identificación de fallas y evaluación de criticidad.
- Calcular el costo de ciclo de vida LCC y compararlo con el costo de una nueva inversión para la toma de decisiones respecto a la continuidad de la operación de los equipos de transporte vertical o viabilidad de renovación tecnológica.

### 3. Marco teórico

Actualmente el método de mantenimiento basado en riesgo es comúnmente utilizado en plantas petroquímicas, donde los niveles de seguridad y monitoreo son altos, sin embargo, estos métodos pueden ser aplicados y ajustados a cualquier tipo de industria de acuerdo a los requerimientos de seguridad y confiabilidad establecidos por cada compañía. (N.S. Arunraj, 2006) plantea en su artículo todo un estudio de técnicas y estado del arte de los métodos utilizados y su evolución en el tiempo, el cual muestra al mantenimiento basado en riesgo RBM (Risk Based Maintenance) como una de las técnicas de actualidad para la gestión del mantenimiento de activos.

**Tabla 2** Desarrollo de las filosofías del mantenimiento a través del tiempo



*Nota:* Este diagrama muestra la evolución de las diferentes filosofías de mantenimiento a lo largo del tiempo. En la actualidad se muestra la integración del manejo del riesgo con las actividades de mantenimiento de activos. Tomado de: *Journal of Hazardous Materials, Risk-based maintenance—Techniques and applications*. N.S. Arunraj, J. Maiti, 2006. (p 654)

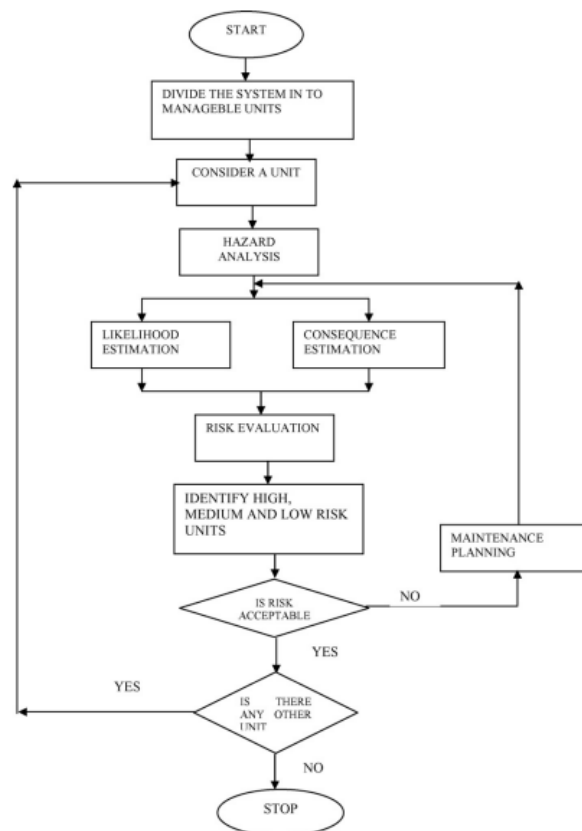
(N.S. Arunraj, 2006) también plantea aquellas actividades requeridas para realizar un análisis de mantenimiento basado en riesgo donde presenta 2 fases importantes para su desarrollo,

# MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

30

que son el análisis de riesgo y planificación del mantenimiento de acuerdo a los resultados obtenidos. Este artículo clasifica las diferentes técnicas o metodologías utilizadas de acuerdo a la información disponible en la compañía para el análisis de riesgo, ya sean mediante métodos cualitativos, cuantitativos o semicuantitativos.

**Figura 1** Representación del proceso lógico de análisis del mantenimiento basado en riesgo



Nota: El proceso paso a paso para desarrollar una estrategia de mantenimiento basado en riesgo contiene la fase de análisis de riesgo y la fase de planificación del mantenimiento. Tomado de *Journal of Hazardous Materials. Risk-based maintenance—Techniques and applications* (p. 03). Por N.S. Arunraj, J. Maiti, 2006, Elsevier B.V

El mantenimiento basado en riesgo según el proceso lógico anterior consta de 6 pasos básicos:

### 3.1 Análisis de riesgos

El riesgo es definido o considerado como probabilidad de ocurrencia de un posible evento no deseado, así como también el peligro es considerado a la fuente de la pérdida o daño que ocasiona el evento no deseado, por tanto, en la actualidad se han venido desarrollando técnicas que reducen el riesgo de accidentes en la operación. Los análisis de riesgos buscan aquellas amenazas potenciales que se puedan generar en la operación de los equipos estimando su probabilidad y número de eventos por unidad de tiempo estimando sus consecuencias.

Durante el análisis de los riesgos identificados los analistas deben dirigir a que el desarrollo de su estudio responda una serie de preguntas encaminadas en la búsqueda y solución de todos los escenarios posibles de riesgo de los peligros identificados. El desarrollo del análisis de riesgo acertado proyecta la operación de los equipos a tener resultados satisfactorios de confiabilidad, así mismo el análisis de consecuencias determina hasta qué punto aquellos eventos pueden perjudicar la operación. De esta manera (N.S. Arunraj, 2006) plantea una serie de preguntas que en análisis de riesgo debe responder:

- ¿Que podría ir mal con el evento?
- ¿Como puede el evento desarrollarse de mala manera?
- ¿Qué tan probable es su ocurrencia?
- ¿Cuáles podrían ser sus consecuencias?

Para (The RASE Project, 2000) considera además la respuesta a parámetros inesperados como:

- ¿Que sabemos? ¿Cuál es el riesgo?
- ¿Tenemos un incidente esperando que pase?

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

- ¿Qué acciones vamos a tomar?
- ¿Qué puede pasar mal? ¿Cuáles son sus potenciales consecuencias?
- ¿Qué tan probable es que pase?
- ¿Cuál es la cadena de eventos que pueden desarrollarlo?
- ¿Podemos tolerar las potenciales consecuencias en la probabilidad estimada?
- ¿Cuáles son los beneficios y costos de tecnologías alternativas?

(J. Tixier, 2002) hizo la clasificación de los distintos métodos de análisis de riesgos de acuerdo a la información disponible por las compañías. En esta clasificación define 62 tipos de análisis de riesgos clasificados según información disponible de entrada en métodos cualitativos, cuantitativos o semicuantitativos, así mismo, la categorizadas de acuerdo a sus resultados obtenidos por métodos de análisis determinísticos, probabilísticos o combinaciones de ambas determinísticos y probabilísticos.

**Tabla 3** *Clasificación de metodologías de análisis de riesgos de acuerdo a información disponible*

Method types	Deterministic	Probabilistic	Deterministic and probabilistic
Qualitative	Action error analysis [14], checklist [15], concept hazard analysis [15], goal oriented failure analysis [14], hazard and operability (HAZOP) [15–22], failure mode effect analysis (FMEA) [15,19], human hazard operability (HumanHAZOP) [23], hazard identification system (HAZID) [24], master logic diagram [25], optimal hazard and operability (OptHAZOP) [15,26], plant level safety analysis (PLSA) [27], preliminary risk analysis [14], process hazard analysis (PHA) [28–30], reliability block diagram (RBD) [14], task analysis [14], Whatif? analysis [14,15,18], sneak analysis [31], risk matrix [32–34]	Delphi technique [14], expert judgment [35], rapid ranking [36]	Maximum credible accident analysis, [15,37–40], safety culture hazard and operability (SCHAZOP) [23], structural reliability analysis (SRA) [14]
Quantitative	Accident hazard index [41], chemical runaway reaction hazard index [42], Dow’s chemical exposure index (CEI) [43,15], Dow’s fire and explosion index (FEL) [44,15], fire and explosion damage index (FEDI) [15], hazard identification and ranking (HIRA) [15], instantaneous fractional annual loss (IFAL) [15], reactivity risk index (RRI) [45], safety weighted hazard index (SWeHI) [46], toxic damage index (TDD) [15]	Event tree analysis (ETA) [14,15,47,48], fault tree analysis (FTA) [14,15,48], petri nets [48], probabilistic fault tree (PROFAT) [49], fuzzy fault tree analysis [50,51], risk integral [52]	Method organised systematic analysis of risk (MOSAR) [14], quantitative risk analysis (QRA) [9,15,45,53–55], rapid risk analysis [15,56–59], probabilistic risk analysis (PRA) [15,60], international study group on risk analysis (ISGRA) [15], optimal risk assessment (ORA) [15,61], IDEF methodology [62]
Semi-quantitative	Domino effect analysis [15,63], layers of protection analysis (LOPA) [64], predictive risk index [65], world health organization (WHO) [15], risk priority number [14]	IAEA-TECDOC-727 [66,67], maintenance analysis [14], semi-quantitative fault tree analysis [68], short cut risk assessment [14,69]	Safety analysis [15], failure mode effect criticality analysis (FMECA) [15], facility risk review (FRR) [19,70]

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

33

*Nota:* Esta clasificación identifica aquellos análisis que brindan como resultados información probabilística, determinística o ambas. También su clasificación de acuerdo a la información que se tenga disponible en las empresas. Tomada de *Journal of Hazardous Materials Risk-based maintenance—Techniques and applications* (p. 05). Por N.S. Arunraj, J. Maiti, 2006, Elsevier B.V

En análisis de peligro busca como resultado identificar las potenciales desviaciones y sus causas, sistemas de ingeniería disponibles, eventos iniciales y eventos potencialmente peligrosos (accidentes) que podrían ocurrir o desarrollarse en los procesos productivos. Estos estudios pueden lograrse usando las siguientes técnicas cualitativas según (IEC 61511-3, 2016)

- Revisiones de seguridad
- Listas de chequeo
- Análisis Qué pasa si
- Estudios Hazop
- Modos de falla y análisis de efectos
- Análisis de causa y consecuencias

Una de las técnicas más utilizadas en el análisis de riesgo que incluye la identificación de peligros es la técnica Hazop (Hazard and Operability analysis) el cual identifica y evalúa los peligros relacionados a los procesos o planta. Este estudio tiene como etapas la definición de sus desviaciones estándar, la definición de las causas por cada desviación, así mismo analiza e identifica las consecuencias seguida de los métodos de salvaguardas que puedan contener, eliminar o disminuir el peligro.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Ilustración 1** Resultados esperados en el desarrollo de un análisis Hazop

Item	Deviations	Causes	Consequences	Safeguards	Action
Vessel	High flow	Flow control loop fails	High flow leads to high pressure (see Note below)		
	High pressure	1) Flow control loop fails 2) External fire	Vessel damage and release to environment	1) High pressure alarm 2) Deluge system 3) Pressure relief valve	Evaluate design conditions for pressure relief valve release to environment
	Low/no flow	Flow control loop fails	No consequence of interest		
	Reverse flow		No consequence of interest		

Nota: El análisis Hazop a partir del modo de falla identificado proporciona un panorama más amplio analizando las desviaciones del evento comparado con el estándar, así mismo seguido por las causas y acciones a tomar mediante salvaguardas. Tomado de: *UNE-EN 61511-3 Seguridad funcional. Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de la industria de procesos.* parte 3, (p 22). Ratificada por la Asociación Española de Normalización en junio de 2017

Según (Diez, 2012) el análisis de Hazop es un procedimiento estructurado por un equipo multidisciplinar de ingeniería operación, mantenimiento, seguridad, inspección y otras disciplinas, el cual comprende todos los estados o modos de funcionamiento de la unidad, cual es su funcionamiento normal o estándar, así mismo también de parada. En el estudio se debe establecer aquellas desviaciones que pueda presentar el nodo evaluado e investigar o deducir aquellas causas y consecuencias que puedan provocar la desviación, identificar las salvaguardas que el sistema dispone para evitar la causa o mitigar las consecuencias. Se pueden presentar las siguientes posibilidades:

- Las consecuencias no generan riesgo: descartar la consideración de esta desviación
- Las consecuencias generan riesgos menores o medianos: considerar esta desviación en la etapa siguiente de análisis.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

- Las consecuencias generan riesgos mayores : considerar esta desviación en la etapa siguiente de análisis.

Aquellas desviaciones, causas, consecuencias, salvaguardas y recomendaciones deberán quedar registradas. Aquellas que aun teniendo un tratamiento sobre el riesgo mediante salvaguardas impliquen riesgo será necesario pasar a los siguientes análisis para determinar acciones correctivas o de rediseño, así mismo en consenso con el grupo de trabajo.

**Ilustración 2** Procedimiento general proceso Hazop



*Nota:* Procedimiento para la realización de análisis Hazop. El BPCS hace referencia al Sistema Básico de Control de Proceso definido por el equipo, pero que no realiza ninguna función instrumentada de seguridad. Tomada de: *Sistemas Instrumentados de Seguridad*. Xavier galindo Diez, 2012. (p 84)

Según (The RASE Project, 2000) la técnica Hazop fue inicialmente estudiada y desarrollada para los análisis de contención de derrames en procesos petroquímicos, profundizando en cómo puede perder y salirse de control un derrame de sustancias en un evento, en particular pérdida de contenido bajo condiciones indeseables. para este tipo de análisis es deseable tener un diagrama de procesos ya sea de la planta en estudio o para el caso de equipos sería homológamente viable un diagrama eléctrico o funcional. Estos diagramas son una ayuda practica y didáctica en los análisis de peligros pues permiten fácilmente la identificación de

aquellas fuentes de fallo en base a nodos sin que se incurra en el error de pasar por alto algún componente o proceso funcional importante. Para que el proceso Hazop sea práctico y ágil, en el estudio se evaluaron aquellos eventos donde se identifique un potencial riesgo para la creación de una atmosfera explosiva; de este modo se puede considerar que para los equipos de alto riesgo el estudio Hazop debe contemplar solamente aquellos modos de falla representativos o jerarquizados como prioritarios que puedan desarrollar eventos no deseados, o que se consideren modos de fallo críticos.

Al nombrar algunas de sus características en el análisis de peligros se considera una técnica cualitativa que por su complejidad en su desarrollo puede tomar mucho tiempo de acuerdo a la robustez del sistema en análisis, también requiere tener a la mano dibujo esquemático del sistema funcional o planta y una guía de palabras clave para definir las desviaciones de su estándar.

### **3.2 Evaluación de probabilidad**

El objetivo de la evaluación de la probabilidad es calcular por medio de los distintos métodos la ocurrencia de un evento indeseado. La frecuencia de falla o probabilidad de falla definida en un periodo de tiempo es calculada en este paso. Según (IEC 60812 E. C., 2018) define la probabilidad como la posibilidad de que un evento ocurra, así mismo puede ser estimada usando varios métodos y recursos, tales como:

- Datos de pruebas de laboratorio y testeos de componentes
- Datos de modos de falla, porcentajes de falla o probabilidad de falla
- Datos de falla en campo de trabajo
- Monitoreo del desempeño humano
- Información de fallas de componentes similares que puedan ser comparados

La estimación de probabilidad es posible obtenerla mediante métodos o técnicas alineadas de la gestión del riesgo y que también favorecen el análisis. Las practicas más usadas en el análisis de probabilidad según (N.S. Arunraj, 2006) son:

- Análisis árbol de fallas (FTA)
- Análisis de árbol de fallas probabilístico (PROFAT)
- Opinión de expertos

### ***3.2.1 Opinión de expertos***

Dentro de la gestión del mantenimiento de equipos es común encontrar específicamente en las empresas donde no se encuentra estructurado un departamento documentalmente hablando aquella información relevante de los equipos como datos de fallas, eventos, tiempos perdidos y tiempos de reparación. Estas empresas cuentan por fortuna con personal de técnicos con muchos años de experiencia en el campo y también en el proceso que al final de su ciclo de trabajo esta experiencia e información se va con ellos. La documentación relacionada a los equipos a veces esta parcialmente estructurada y los datos de los fabricantes son pocos o nulos, por esto la valiosa información que tiene la experiencia de los expertos son clave cuando las condiciones documentales del departamento son reducidas o nulas.

La información y datos técnicos de los fabricantes de los equipos son optimistas en los datos de máquinas o componentes, pues durante el diseño, estas piezas son probadas y la información construida proviene de laboratorios o modelos en prueba en condiciones ideales de carga; por lo tanto, esta información no se ajusta al momento de realizar análisis en las empresas bajo las condiciones de operación reales. Otra de las practicas empleadas en mantenimiento de

equipos es tener como referente equipos o piezas con especificaciones similares y que trabajen bajo las mismas condiciones. Este tipo de estrategias ciertamente puede acercarse a los resultados esperados o de alguna manera simular condiciones de trabajo que se ajustan a nuestros procesos; sin embargo, hay un nivel de incertidumbre en los resultados esperados.

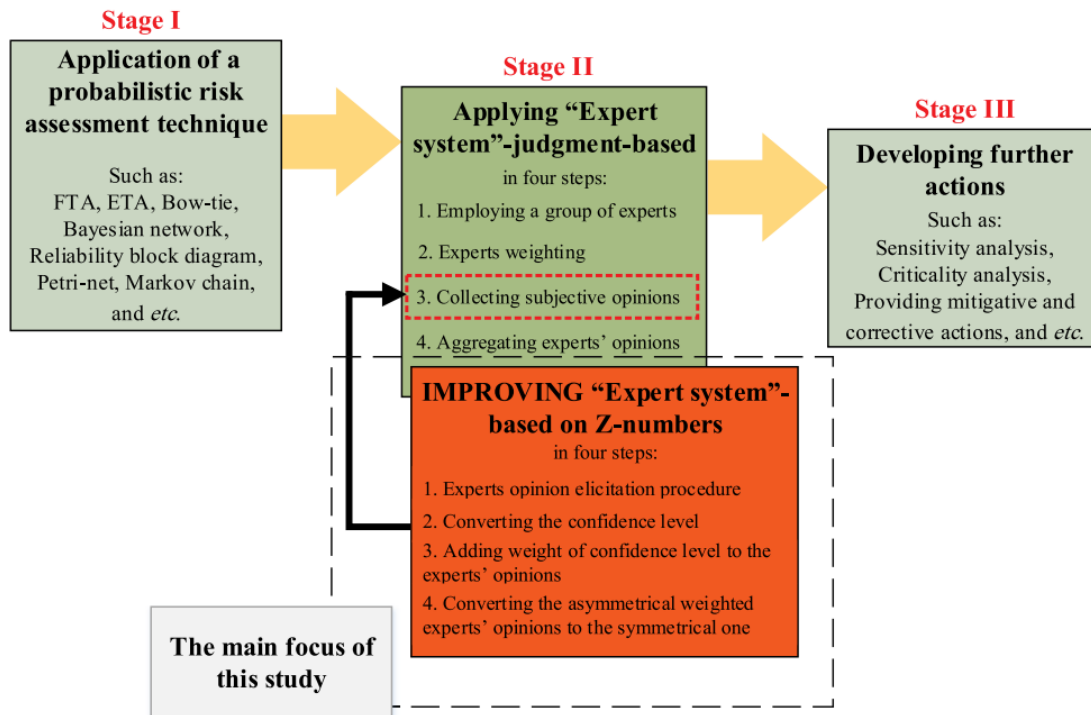
La opinión de expertos es un tratamiento que se ajusta a los resultados esperados, pues al momento de definir una escala lingüística en términos de niveles o grados como por ejemplo muy alto, alto, medio bajo, muy bajo se podrían determinar y ajustar los resultados de acuerdo a pesos dados a estos términos. El modelo de expertos usa pesos otorgados a los términos lingüísticos para cubrir un intervalo entre cero (0) y uno (1) para que al final este peso se pueda convertir en términos cuantitativos de probabilidad.

El juzgamiento por medio de expertos fue presentado en el artículo de (Zadeh, 2011) quien introduce números  $Z$  ( $Z$ -number) compuestos por  $A = (A, R)$ , donde  $A$  es la variable incierta del valor real  $X$ , el segundo componente  $R$  es la medida de confianza o “certeza” del componente primero. Para el análisis de riesgos por medio de opinión de expertos el desarrollo del estudio será aplicado en las siguientes etapas:

- Toma de datos mediante encuesta a expertos
- Colectar opiniones subjetivas de opiniones
- Cálculo de peso de expertos  $W$
- Par de comparación aditiva experto como método de jerarquización (AHP)
- Proceso de agregación de peso expertos a opinión expertos
- Conversión de nivel de confianza
- Adición de nivel de confianza a la opinión expertos

- Conversión de par de comparación experto de peso asimétrico en uno simétrico

**Ilustración 3** Metodología probabilística para integrar opinión de experto



*Nota:* Zadeth presenta en su artículo una metodología para el cálculo y tratamiento de datos subjetivos de la opinión expertos. Tomado de: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 58, *A methodology for enhancing the reliability of expert system applications in probabilistic risk assessment*. 2019, (p 52)

Los expertos son cuestionados sobre los distintos modelos planteados dentro del análisis en estudio, estas preguntas deben ser formuladas para que las respuestas sean cerradas y que su valoración implique la terminología antes mencionada. Estas preguntas van relacionadas a identificar los datos de consecuencia y probabilidad. Este tipo de tratamientos son utilizados en estándares del manejo del riesgo como en la ISO 31000; según (Mohammad Yazdi, 2019) estas respuestas van de la mano a la valoración de nivel de confianza con que el experto responde, esto

se hace para evaluar el nivel de “certeza” al momento de dar la respuesta a un evento o suceso en estudio.

Existe en la actualidad distintas técnicas para la valoración lingüística de expertos las cuales apuntan a la conversión de estas respuestas en valoraciones o datos cuantitativos con el propósito de brindar información con más certeza de un evento evaluado. Según (Hans J. Pasman, 2020) se conocen varias técnicas para el tratamiento de criterios lingüísticos en el cálculo de probabilidad y severidad en análisis de riesgos, el artículo menciona los siguientes:

- Método Delphi
- Método de jerarquización
- Dempster Shafer Theory (DST) of evidence
- Fuzzy sets and logic

En aplicaciones para cálculo de probabilidad (Hans J. Pasman, 2020) menciona en su artículo los siguientes:

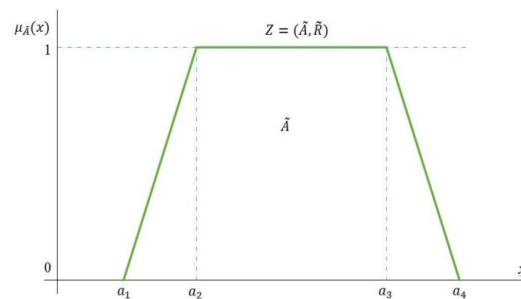
- Dempster-Shafer
- fuzzy set
- Dempster-Shafer derivative: D-number
- Credal sets/networks
- 2-Tuple fuzzy linguistic representation model
- Possibility theory and Z-number

### **3.2.1.1 Teoría de posibilidad o Z-número Fuzzy**

Con el fin de que las respuestas de los expertos tengan un nivel de convencimiento creíble, la teoría de posibilidad o Z-número desarrollada por (Zadeh, 2011) introduce el Z-numero. según

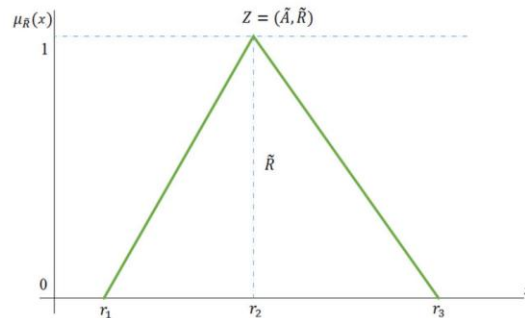
(Hans J. Pasman, 2020) este número consiste en 2 elementos, el cual el primero informa sobre la restricción de una variable real en términos de “aproximadamente”, “cercano a”. el segundo representa la confiabilidad del primero en términos de “seguridad” y términos similares.

**Ilustración 4** *Función de membresía trapezoidal de Z-numero*



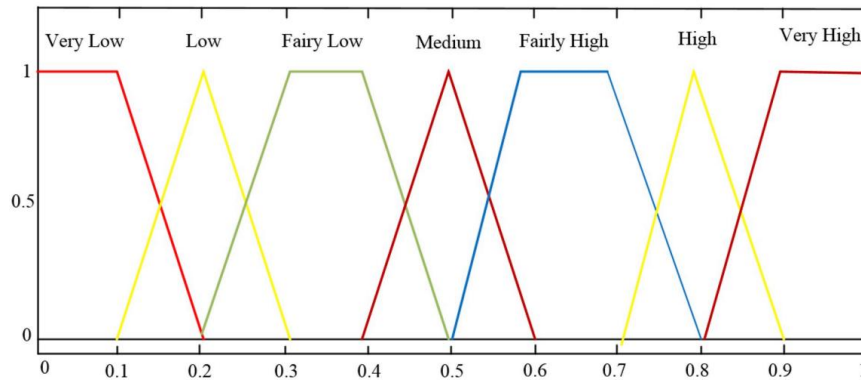
*Nota:* La función de membresía trapezoidal cubre cuatro números sobre la recta probabilística. Tomada de: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 58, A methodology for enhancing the reliability of expert system applications in probabilistic risk assessment.* 2019, (p 53)

**Ilustración 5** *Función de membresía triangular de Z- Número*



*Nota:* La función de membresía triangular cubre tres números sobre la recta probabilística. Tomada de: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 58, A methodology for enhancing the reliability of expert system applications in probabilistic risk assessment.* 2019, (p 53)

**Ilustración 6** *Funciones de membresía fuzzy*



*Nota:* Funciones de membresía Fuzzy incluyendo la combinación de numero trapezoidal y triangular de los numero Fuzzy. Tomada de: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 58, A methodology for enhancing the reliability of expert system applications in probabilistic risk assessment.* 2019, (p 54)

### 3.2.1.2 Calculo peso expertos W

El proceso de jerarquización fuzzy (AHP) es un proceso multicriterio para toma de decisiones utilizado para la toma de decisiones en problemas donde la selección de alternativas y criterios son evaluados (Huang, 2011). Esta técnica ha mostrado ventajas en la toma de decisión sobre criterios no cuantitativos y ha obtenido resultados confiables.

Esta técnica ha sido utilizada por Zadeh en un problema de decisión de selección alternativa, el cual deseaba establecer la estructura para decidir sobre la inversión en edificios públicos de parte de un candidato. El estudio usa el cálculo de pesos sobre opiniones subjetivas sobre un grupo de criterios de decisión. Un problema típico de evaluación de criterios examina un conjunto de alternativas factibles y considera más de un criterio para determinar una clasificación de prioridad para la implementación de la alternativa (Huang, 2011).

Para nuestro estudio y evaluación de expertos se definen 4 criterios de evaluación los cuales pueden definir la calidad de información suministrada por los expertos y la confiabilidad de la respuesta, ya que la incertidumbre se basa en sus habilidades. Los criterios de evaluación como experiencia en años, formación profesional o nivel de educación, años de edad y tipo de cargo que desempeña, son condiciones que impactan en la confiabilidad del experto. Estos criterios son tratados mediante matriz de comparaciones usando números reales positivos.

**Ilustración 7** *Matriz de comparación general*

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{b}_{12} & \cdots & \tilde{b}_{1n} \\ 1/\tilde{b}_{21} & 1 & \cdots & \tilde{b}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\tilde{b}_{n1} & 1/\tilde{b}_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

*Nota:* El criterio  $i$  es de relativa importancia al criterio  $j$ ,  $\tilde{b}_{ij} = \tilde{1}, \tilde{3}, \tilde{5}, \tilde{7}, \tilde{9}$  en contraste el criterio  $j$  es de relativa importancia al criterio  $i$ ,  $\tilde{b}_{ji} = \tilde{1}^{-1}, \tilde{3}^{-1}, \tilde{5}^{-1}, \tilde{7}^{-1}, \tilde{9}^{-1}$ . Para aquellos subíndices iguales  $i=j$ ,  $\tilde{b}_{ji} = 1$ . Tomada de: *Hybrid Probabilistic Risk Assessment Using Fuzzy FTA and Fuzzy AHP in a Process Industry*. Mohammad Yazdi. 2017. (p 758)

La representación de las matrices de comparación para la evaluación de expertos es presentada en (Yazdi, 2017) donde las características capacidades de los expertos fueron comparadas mediante esta estructura, tambien son establecidos los numeros fuzzy relacionando los numeros fuzzy triangulares

**Ilustración 8** *Números par de comparación asociados a números triangulares fuzzy*

	<i>LAB</i>	<i>LVs</i>	<i>LEs</i>	<i>LWk</i>	<i>Eq</i>	<i>Wk</i>	<i>Es</i>	<i>Vs</i>	<i>Ab</i>
Fuzzy numbers	$\tilde{9}^{-1}$	$\tilde{7}^{-1}$	$\tilde{5}^{-1}$	$\tilde{3}^{-1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}$	$\tilde{5}$	$\tilde{7}$	$\tilde{9}$
	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{7})$	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5})$	$(\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{7})$	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1)$	(1,1,3)	(1,3,5)	(3,5,7)	(5,7,9)	(7,9,9)

*Nota:* Números fuzzy que relacionan los numeros triangulares y asocian los criterios lingüísticos. Tomada de: *Multiple Attribute Decision Making – Methods and Applications*. Huang, Gwo-Hshiung Tzeng and Jih-Jeng. 2011. (p 148)

**Ilustración 9** *Matrices de comparación aditiva para análisis expertos*

$$\begin{aligned}
 P &= \begin{pmatrix} & E_1 & E_2 & E_3 \\ E_1 & 1 & \tilde{1} & \tilde{3} \\ E_2 & \tilde{1} & 1 & \tilde{3} \\ E_3 & \tilde{3}^{-1} & \tilde{3}^{-1} & 1 \end{pmatrix}, \\
 J &= \begin{pmatrix} & E_1 & E_2 & E_3 \\ E_1 & 1 & \tilde{5} & \tilde{3} \\ E_2 & \tilde{5}^{-1} & 1 & \tilde{3}^{-1} \\ E_3 & \tilde{3}^{-1} & \tilde{3} & 1 \end{pmatrix}, \\
 E &= \begin{pmatrix} & E_1 & E_2 & E_3 \\ E_1 & 1 & \tilde{3} & \tilde{3} \\ E_2 & \tilde{3}^{-1} & 1 & \tilde{1} \\ E_3 & \tilde{3}^{-1} & \tilde{1} & 1 \end{pmatrix}, \\
 A &= \begin{pmatrix} & E_1 & E_2 & E_3 \\ E_1 & 1 & \tilde{3}^{-1} & \tilde{1} \\ E_2 & \tilde{3} & 1 & \tilde{3} \\ E_3 & \tilde{1} & \tilde{3}^{-1} & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

*Nota:* La matriz se compone de una matriz identidad (unos) y en la triangular superior van ubicados los números fuzzy de acuerdo a la comparación de 2 expertos. A corresponde a (Age) edad, E corresponde a (Educación) educación, J corresponde a (Job) trabajo y P corresponde a (profesión) profesión. Tomada de: *Hybrid Probabilistic Risk Assessment Using Fuzzy FTA and Fuzzy AHP in a Process Industry*. Mohammad Yazdi. 2017. (p 760)

Una vez estructurada la matriz de comparación para los expertos los pesos son calculados para cada dimensión

$$\tilde{r}_i = (\tilde{b}_{i1} \otimes \tilde{b}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{b}_{in})^{1/n} \quad (1)$$

Multiplicación de términos  $\tilde{b}_{ji}$  de cada criterio llamada par de comparación sintética según (Yazdi, 2017).

Los pesos de comparacion  $\tilde{W}_i$  son calculados multiplicando los resultados de la comparacion sisntetica por la suma de cada una de sus terminos elevado a la inversa

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (2)$$

El criterio  $\tilde{W}_i$  es definido como *criterio de peso fuzzy i*, donde el resultado  $\tilde{W}_i = (lw_i, mw_i, uw_i)$  son términos bajo, medio y alto de los números triangulares de los pesos  $W$  fuzzy.

Para dar un valor de centro del área CoA de los números triangulares fuzzy es necesario realizar cálculo del término BNP (Best Non-fuzzy Performance), el cual es el valor resultante de los pesos fuzzy para cada experto.

$$w_i = [(uw_i - lw_i) + (mw_i - lw_i)]/3 + lw_i \quad (3)$$

### 3.3 Evaluación de consecuencia

Durante el proceso de estimación de consecuencias en los procesos de análisis de riesgos es indispensable determinar o cuantificar en los diferentes aspectos de impacto de la empresa y las consecuencias relacionadas al evento a tratar dentro de un escenario factible. Los distintos aspectos que pueden afectar determinan su vulnerabilidad en caso de un evento final ocurra posteriormente se traducen en pérdidas financieras. Dependiendo de las políticas de la empresa se determinan distintos aspectos y sobre los cuales se pueden valorarse los niveles de consecuencias relacionados a pérdidas financieras, operacionales, de cumplimiento normativo, reputacional, humano, social y ambiental. Estos aspectos representativos en las empresas que pesan dentro de los objetivos financieros son categorizados en niveles según su impacto. Estos niveles de impacto pueden ser determinados y valorados también según las políticas de la empresa desde el nivel más bajo al más alto, terminología jerárquica como leve, bajo, levemente bajo, moderado, levemente mayor, mayor

y catastrófico. Algunas empresas usan menos niveles para simplificar el análisis, sin embargo, cuando se desea realizar un análisis con poca incertidumbre en sus resultados, no es recomendable dejar valores o rangos tan altos entre los niveles, ya que los resultados se vuelven más dispersos.

### **3.3.1 *Matriz de criticidad***

La matriz de criticidad sobre un mapa de calor es la manera de evaluar el riesgo de acuerdo a dos parámetros importantes que son nivel de consecuencia, impacto o severidad y probabilidad de ocurrencia en que puede desarrollarse el evento, en algunos análisis también existe el factor de detectabilidad. Según (IEC 31010, 2019) el uso de la matriz es evaluar y comunicar la magnitud relativa del riesgo sobre las bases de probabilidad y consecuencia que es típicamente asociada con un evento local. El criterio de consecuencia es construido por medio de la información disponible en la empresa o escalas de afectación de acuerdo a su proceso productivo, los cuales son cuantificables en términos de nivel de impacto desde la afectación más baja hasta la más alta. El criterio de probabilidad de ocurrencia es tomado a partir de información del departamento de mantenimiento teniendo en cuenta preferiblemente el tiempo medio entre fallas (MTBF) o información histórica relevante en tiempo. En la mayoría de empresas esta información no está a la mano y habría que construirla, también en otras ocasiones no existe información para su construcción. Cabe aclarar que los tiempos medio entre falla MTBF deberán ser definidos por cada modo de falla identificado, no podrá ser un dato general, pues cada caso en particular contiene una frecuencia o recurrencia de trabajo.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 4** *Diseño factores de probabilidad de ocurrencia o frecuencia*

Rating	Descriptor	Descriptor meaning
5	Likely	Expected to occur within weeks
4	⋮	⋮
3	⋮	⋮
2	⋮	⋮
1	Remotely possible	Theoretically possible but extremely unlikely

*Nota:* Tabla de factores de probabilidad de ocurrencia o frecuencia con la definición de niveles. Tomada de: *Risk management - Risk assessment techniques IEC 31010, 2019.* (p 114)

La matriz de criticidad podrá tener el tamaño definido por el usuario o empresa, aunque lo más común son entre 4 y 5 niveles, sin embargo, dependerá de la agilidad y practicidad con que se quiera trabajar sin que incurra en ambigüedades por tener niveles o escalas muy grandes. Los resultados de las valoraciones en la matriz de criticidad pueden definirse a nivel cualitativa, cuantitativa o semicuantitativa desde una escala de calor, los cuales el usuario o diseñador podrá definir los rangos de criticidad, teniendo en cuenta la tolerabilidad de riesgo que tenga definida la empresa. Es recomendable que respecto a los criterios de calor no tener más de 3 colores en la escala con el fin de evitar incertidumbres de valoración, normalmente podrían ser estados críticos, semi-crítico y no crítico.

Para ranquear el riesgo se debe buscar inicialmente el factor de consecuencia que se ajuste al nivel de impacto del evento en análisis, luego procede a buscar la frecuencia de ocurrencia o probabilidad que ocurre el evento, donde se cruce el análisis vertical con el horizontal es el resultado de la evaluación que define el evento.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 5** *Diseño factores de consecuencia en matriz de criticidad*

Rating	Financial	Health and safety	Environment and community	Etc.
a	Max credible loss (\$)	Multiple fatalities	Irreversible significant harm; community outage	
b	⋮	⋮	⋮	⋮
c	⋮	⋮	⋮	⋮
d	⋮	⋮	⋮	⋮
e	Minimum of interest (\$)	First aid only required	Minor temporary damage	

*Nota:* Tabla de factores de consecuencia con la definición de niveles desde mayor a menor impacto. Tomada de: *Risk management - Risk assessment techniques IEC 31010, 2019.* (p 114)

### 3.4 Estimación del riesgo

La matriz de criticidad puede tener diferentes usos en la industria entre los cuales es muy útil para clasificar o jerarquizar criticidad en una flota de equipos de planta productiva de los cuales se desea tener un manejo de alto o bajo nivel, también para determinar si un nivel de riesgo dado es aceptado o no aceptado para la toma de decisiones corporativas, otro uso para empresas donde no se cuenta con suficiente datos y que se requiere dar una valoración cualitativa de los equipos; de esta forma esta matriz es utilizada para evaluar la criticidad de los modos de falla identificados en análisis FMECA y análisis Hazop.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 6** Diseño de matriz de criticidad

↑ Consequence rating	a	III	III	II	I	I
	b	IV	III	III	II	I
	c	V	IV	III	II	I
	d	V	V	IV	III	II
	e	V	V	IV	III	II
			1	2	3	4
		Likelihood rating →				

*Nota:* Matriz de criticidad con los niveles de factores de probabilidad y consecuencia, también incluye mapa de calor y sus niveles. Tomada de: *Risk management - Risk assessment techniques IEC 31010, 2019.* (p 115)

Otro concepto o método para la estimación del riesgo y que constituye un método mucho más amplio en la gestión del riesgo es el criterio de seguridad funcional y que contempla una o más capas de protección o salvaguardas, las cuales intentan lograr o mantener el estado de seguridad de un proceso o equipo con respecto a un evento peligroso específico. Un equipo o proceso a nivel de instrumentación en seguridad podría tener sistemas de seguridad instrumentada SIS según sea el caso que según (IEC 61511-1, 2016) estructuralmente es una combinación de sensores, controladores lógicos y otros elementos finales en trabajando en función a la seguridad del proceso o sistema. Estos arreglos incluyen dentro de su configuración la comunicación y el equipamiento auxiliar como cables, elementos de poder, líneas de impulso y otros. Los SIS pueden incluir software de seguridad y también acciones humanas como parte de una función instrumentada de seguridad SIF. El termino SIF según (IEC 61511-1, 2016) relaciona a la función instrumentada de seguridad el cual es diseñado para lograr un requerimiento SIL el cual está

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

determinado en una relación con otras capas de protección que participan en la reducción del mismo riesgo. El termino SIL se refiere a una capa instrumentada de seguridad la cual es medida de uno (1) a cuatro (4); por tanto, en cuanto mayor sea el SIL, menor será la probabilidad de falla en demanda del elemento o en términos de frecuencia de falla será menor

**Tabla 7** Probabilidad de falla en demanda  $PFD_{avg}$  requerimientos de seguridad integral

DEMAND MODE OF OPERATION		
Safety integrity level (SIL)	$PFD_{avg}$	Required risk reduction
4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$> 10\ 000$ to $\leq 100\ 000$
3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$> 1\ 000$ to $\leq 10\ 000$
2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	$> 100$ to $\leq 1\ 000$
1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	$> 10$ to $\leq 100$

*Nota:* Niveles del SIL con su número de probabilidad de falla en demanda y su reducción requerida de riesgo. Tomada de: Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 1: Framework, definitions, system, hardware and application programming Requirements IEC 61511-1, 2016, (p 48)

Las condiciones de operación y los requerimientos de integridad del SIF incluye una reducción de riesgo asociado al SIL de acuerdo a la tabla anterior en modo demanda.

### 3.4.1 Matriz grafica de riesgo

El concepto de reducción de riesgo es de gran importancia en los procesos de tratamiento de riesgo, el propósito de este concepto es llegar a identificar el riesgo tolerable para un evento peligroso específico con sus consecuencias. Las capas de protección son diseñadas para reducir los eventos peligrosos y sus consecuencias, por tanto, en el estudio del riesgo existen numerosos métodos para evaluar la necesidad de un SIL en un equipo o proceso donde los peligros son identificados. Uno de estos métodos considera la información semicuantitativa para la valoración del riesgo y asignación del SIL, aquellos eventos peligrosos deben ser debidamente identificados

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

por medio de métodos anteriormente anunciados. La matriz grafica de riesgo asigna un SIL para todo SIF, los SILs son establecidos de acuerdo a los factores de consecuencia o severidad identificados nombrado como parámetro C, la probabilidad definida con el parámetro F, P y W. los cuales son evaluados respecto a factores humanos, medio ambiente y aspectos financieros. La matriz grafica de riesgo consta de los siguientes componentes:

- Consecuencias (C)
- Probabilidad de ocurrencia discriminado en los siguientes sub-factores:
  - ✓ Nivel de exposición al peligro *F*: Probabilidad de que el área, recinto o equipo esté ocupada al momento del evento peligroso.
  - ✓ Probabilidad de evitar el evento *P*: Probabilidad que la(s) personas puedan evitar el evento peligroso, en caso que el SIF falle en demanda.
  - ✓ Tasa de demanda *W*: Tasa de demanda residual si se considera un SIF no implementado.

**Tabla 8** *Parámetro de consecuencia o nivel de severidad C*

Consequence parameter		
Severity Level		C
CF	Catastrophic	F
CE	Extensive	E
CD	Serious	D
CC	Considerable	C
CB	Marginal	B
CA	Negligible	A

*Nota:* Niveles de severidad o consecuencia en matriz grafica de riesgo. Tomada de:  
*Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels IEC 61511-3, 2016, (p 74)*

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 9** *Parámetro de nivel de exposición al evento peligroso F*

Occupancy parameter			
Frequency of human presence in the hazardous zone. Credit for limited occupancy shall not have been taken choosing the consequence categories.			
Exposure probability			F
FD	Permanent	=1	2
FC	Frequent	0,1-1	2
FB	Occasionally	0,01-0,1	1
FA	Rare	<0,01	0

*Nota:* Valoración de probabilidad del evento peligroso de acuerdo a la frecuencia de exposición en el área. Tomada de: *Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels IEC 61511-3, 2016, (p 75)*

**Tabla 10** *Parámetro de nivel de evasión del evento peligroso P*

Avoidance parameter		
Probability of avoiding the hazardous event if the SIF fails on demand. Implies independent facilities provided to "shut-down" so hazard can be avoided or enable all persons to escape to a safe area. Conditions to be fulfilled for P <sub>A</sub> :		
Facilities to alert operator that the SIS has failed		
Independent facilities to bring process to safe state		
Time between operator alert and hazardous event >1h		
Avoidance probability		P
P <sub>B</sub>	Avoidance conditions not fulfilled	1
P <sub>A</sub>	All avoidance conditions are fulfilled	0

*Nota:* parámetro describe la probabilidad de exposición de las personas y su capacidad para evitar la situación peligrosa la cual existe en caso que el SIF falle en demanda. Tomada de: *Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels IEC 61511-3, 2016, (p 76)*

**MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN**

**Tabla 11** *Parámetro de tasa de demanda en ausencia de SIF W*

Demand rate parameter			
Demand rate			W
W9	Often	> 1/ y	9
W8	Frequent	1/1-3 y	8
W7	Likely	/3-10 y	7
W6	Probable	1/10-30 y	6
W5	Occasional	1/30-100 y	5
W4	Remote	1/100-300 y	4
W3	Improbable	1/300-1 000 y	3
W2	Incredible	1/1 000-10 000 y	2
W1	Inconceivable	1/10 000-100 000 y	1

*Nota:* tasa de demanda en caso que el evento peligroso pudiera ocurrir en ausencia de un SIF, considerando otras capas de protección. Tomada de: *Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels* IEC 61511-3, 2016, (p 77)

**3.4.1.1 Asignación del SIL**

Una vez identificados los parámetros de la matriz grafica de riesgo de acuerdo a asignación semicuantitativa los parámetros F, P y W deben sumarse, el cual al cruzarse con el parámetro ( C ) será asignado un SIL al evento peligroso en estudio. Una vez asignado el SIL es necesario realizar el diseño de mismo teniendo en cuenta los parámetros mencionados en criterios anteriores y en base a la norma de seguridad funcional (IEC 61511-3, 2016)

**Tabla 12** *Matriz grafica de riesgo*

Consequence parameter	Risk graph matrix							Occupancy parameter Frequency of human presence in the hazardous zone. Credit for limited occupancy must not have been taken choosing consequence categories!	Avoidance parameter		Demande rate parameter		
	Likelihood sum (F+P+W)								Exposure rate	F	P	Estimated SIF demand rate	W
Severity level	C	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12						
C <sub>F</sub> Catastrophic	F	NR	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4	NO	F <sub>D</sub> Permanent = 1	2	Probability of avoiding the hazardous event if the SIF fails on demand. Implies independent facilities provided to "shut-down" so hazard can be avoided or enable all persons to escape to a safe area. Conditions to be fulfilled: • Facilities to alert operator that the SIS has failed • Independent facilities to bring process to a safe state • Time between operator alert and hazardous event		W <sub>9</sub> Often >1/ y	9
C <sub>E</sub> Extensive	E	NR	NR	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4			F <sub>C</sub> Frequent 0.1-1	2	Avoidance probability	P
C <sub>D</sub> Serious	D	OK	NR	NR	SIL1	SIL2	SIL3	F <sub>B</sub> Occasionally 0.01-0.1	1	Avoidance conditions not fulfilled	1	W <sub>7</sub> Likely 1/3-10 y	7
C <sub>C</sub> Considerable	C	OK	OK	NR	NR	SIL1	SIL2	F <sub>A</sub> Rare <0.01	0	All avoidance conditions are fulfilled	0	W <sub>6</sub> Probable 1/10-30 y	6
C <sub>B</sub> Marginal	B	OK	OK	OK	NR	NR	SIL1					W <sub>5</sub> Occasional 1/30-100 y	5
C <sub>A</sub> Negligible	A	OK	OK	OK	OK	NR	NR					W <sub>4</sub> Remote 1/100-300 y	4
												W <sub>3</sub> Improbable 1/300-1 000 y	3
												W <sub>2</sub> Incredible 1/1 000-10 000y	2
												W <sub>1</sub> Inconceivable 1/10 000-100 000 y	1

*Nota:* Matriz grafica de riesgo considera la severidad o consecuencia y la probabilidad en términos de 3 factores F+P+W. Tomada de: *Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 1: Framework, definitions, system, hardware and application programming Requirements* IEC 61511-3, 2016, (p 78)

### 3.5 Aceptación del riesgo

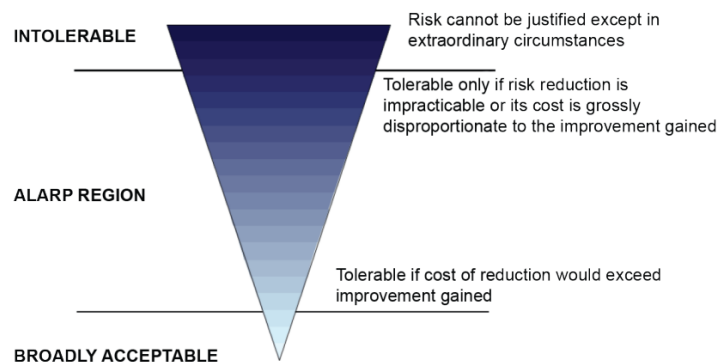
La aceptación del riesgo es el proceso en el cual el analista define si los riesgos evaluados en la matriz grafica de riesgo son suficientemente aceptables, tolerables o se requiere un tratamiento especial para controlar, eliminar o mitigar el evento peligroso. Existen métodos de aceptación del riesgo que permiten valorar el riesgo en base al costo razonable de la solución, pues las condiciones en los eventos podrían ser mejor proponer otra nueva solución económicamente hablando.

#### 3.5.1 Criterio ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*)

El criterio ALARP según (IEC 31010, 2019) requiere generalmente que el nivel de riesgo sea reducido tan bajo y razonablemente practicable (*As Low As Reasonably Practicable*), teniendo como base que los costos para la implementación de la solución no sean desproporcionados respecto a los beneficios obtenidos. Los estudios de costo – beneficio es el parámetro decisivo para comunicar a la compañía si la solución es razonablemente aceptada.

El modelo de aceptación ALARP es usado para definir si el riesgo o evento peligroso necesita ser tratado y puede ser usado para clasificar el riesgo dentro de 3 categorías:

#### Ilustración 10 Diagrama ALARP



# MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

55

Nota: La ilustración describe los niveles del riesgo o evento en estudio como la región permitida ALARP de acuerdo a que los costos sean razonables implementando la solución.

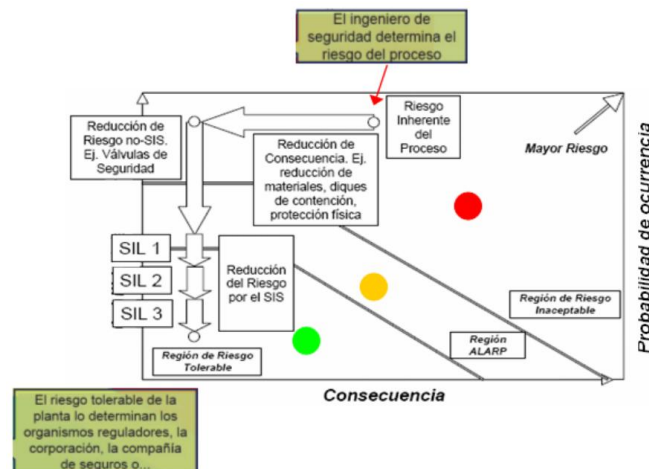
Tomada de: *Risk management - Risk assessment techniques IEC 31010, 2019.* (p 95)

Para realizar el análisis ALARP la norma (IEC 31010, 2019) define las siguientes entradas necesarias para el estudio del evento peligroso:

- La fuente de riesgo y el riesgo asociado
- Límites para el criterio de la región ALARP
- Controles en el lugar y cuales otros podrían ser posibles
- Consecuencias potenciales
- La probabilidad de que esas consecuencias puedan ocurrir
- El costo de los posibles tratamientos

Una vez se tenga el criterio costo beneficio aplicado es necesario volver a reevaluar de acuerdo a los planes de acción planteados ya ser para eliminar, reducir y controlar el evento peligroso. Para una mejor comprensión del tratamiento ALARP se explica de manera grafica el procedimiento:

**Ilustración 11** *Proceso reducción ALARP en base a consecuencias y probabilidad de ocurrencia*



*Nota:* Aplicación de acciones para reducir el riesgo tan bajo como razonablemente aplicable. Tomada de: *Sistemas instrumentados de Seguridad*, Informe de tesis, Universidad Universidad Rovira Virgili, 2012, (p 30)

### **3.6 Planeación de mantenimiento**

Una vez desarrollada la metodología de análisis de riesgo mediante la identificación de peligros y sus tratamientos se debe vincular aquellos planes de acción definidos dentro del plan actual de mantenimiento del equipo con el fin de priorizar actividades ya sea de inspección, monitoreo, reparativas o posiblemente de rediseño. Para la priorización de actividades se define que el proceso de jerarquización realizado en el cálculo del número de prioridad de riesgo (NPR) es el indicador sobre el cual puede basarse el enfoque de prioridad de las actividades de mantenimiento, también los planes de acción identificados en el análisis Hazop y la evaluación realizada en la matriz grafica de riesgo donde también son establecidas nuevas capas de protección que incluyen rediseños para los eventos peligrosos identificados.

Una vez se desarrollen las actividades en la práctica las acciones identificadas para el control del riesgo deberán dar respuesta a las preguntas establecidas desde el inicio del análisis, es recomendable dejar un documento que contenga el soporte documental y de plan de acción que responda las preguntas. Según (Faisal I. Khan M. M., 2003) tener el conocimiento de las respuestas a las 5 preguntas del mantenimiento basado en riesgo es seguro decir que la planeación del mantenimiento basado en el análisis del riesgo se espera que se obtenga un mantenimiento mucho más costo-efectivo, el cual minimiza las consecuencias relacionadas a la seguridad, aspectos económicos, medio ambientales entre otros. Esta práctica retornará resultados para una mejor utilización del capital. El mantenimiento basado en riesgo puede ser usado para mejorar las

estrategias de mantenimiento existentes a través de decisiones y procedimientos óptimos a través del ciclo de vida del equipo en estudio.

### **3.7 Diagrama de proceso mantenimiento basado en riesgo**

Los diagramas de procesos permiten dar claridad al proceso paso a paso de una metodología aplicada, permite que todos los actores y metodologías aplicadas sean entendidas por el lector, así mismo permite estandarizar el paso a paso. Para el lector le permite comprender y seguir de manera uniforme y lógica de forma que no permita que hayan ambigüedades en los procedimientos. También por medio de esta forma visual permite que en la metodología no hayan reprocesos y se conozca que actividad realizar una vez el proceso tenga que volverse a evaluar. Para las auditorias un proceso documentado y explicado gráficamente representa una manera ágil para que el evaluador comprenda las actividades, conozca la trazabilidad de los resultados de cada paso efectuado. También la toma de decisiones busca que por medio del diagrama se convierta en una herramienta que soporte el procedimiento con el objetivo de priorizar aquellos equipos críticos que las empresas deben de intervenir primero.

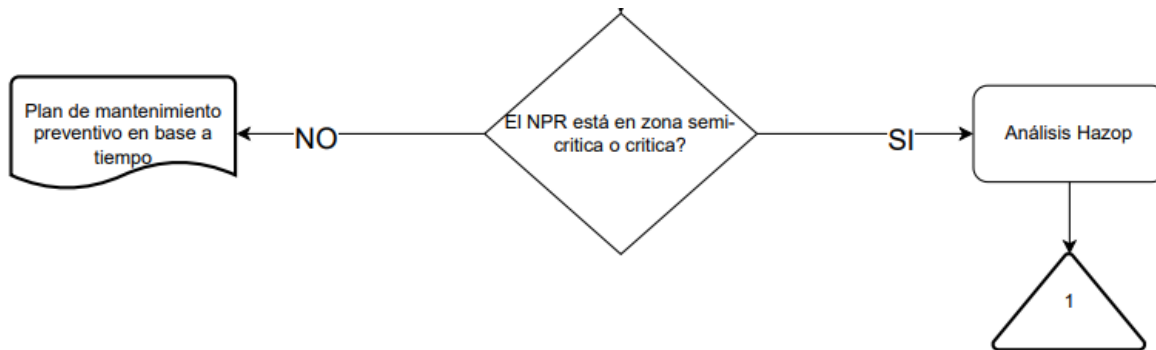
# MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Ilustración 12** Diagrama de proceso FMECA mediante métodos semicuantitativos



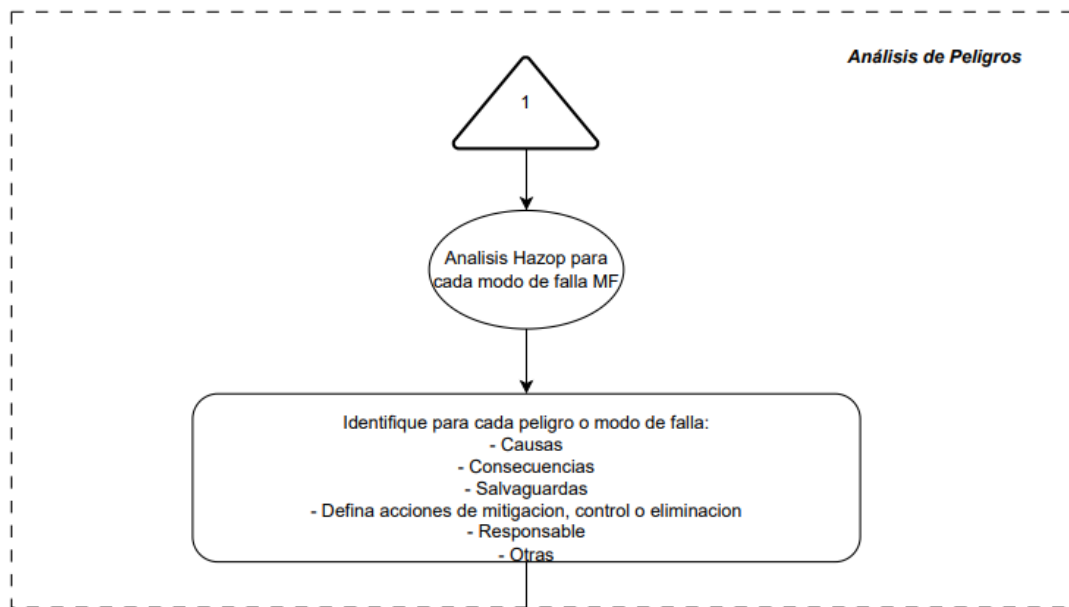
**NOTA:** Proceso de aplicación metodología FMECA mediante norma UNE-EN-IEC 60812 mediante encuestas cualitativas, con resultados cuantitativos aplicando metodología de números Fuzzy. Su resultado entrega el Numero de prioridad de Riesgo NPR. Tomada de: *Elaboración propia*

**Ilustración 13** Diagrama de proceso de definición mantenimiento basado en frecuencia o en base a riesgo



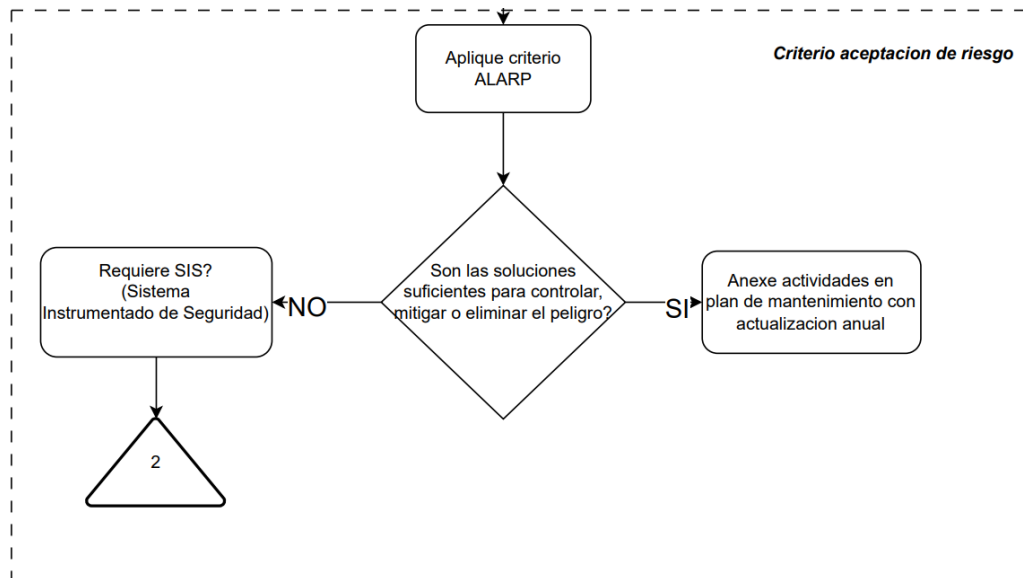
*Nota:* Proceso de decisión y clasificación de acuerdo a los resultados NPR, analizar peligros via Hazop en aquellos modos de falla que se encuentren en zona critica y semicritica de la matriz de criticidad. Tomada de: *Elaboración propia*

**Ilustración 14** Diagrama de proceso de análisis de peligros mediante técnica Hazop



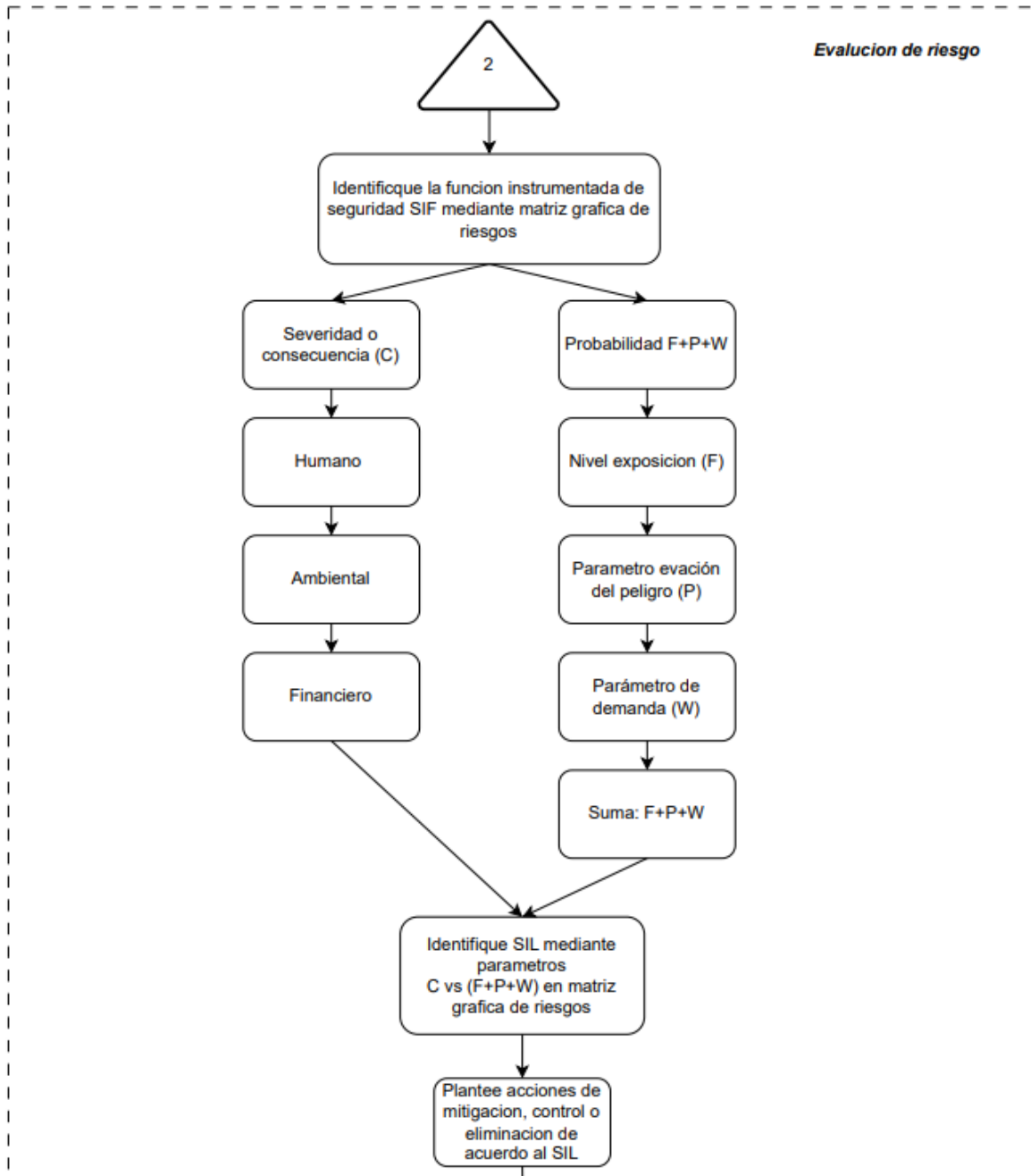
*Nota:* Diagrama de proceso para aplicación del análisis Hazop en los modos de falla en zona crítica y semicritica. Tomada de: *Elaboración propia*

**Ilustración 15** Diagrama de proceso para aplicación criterio ALARP



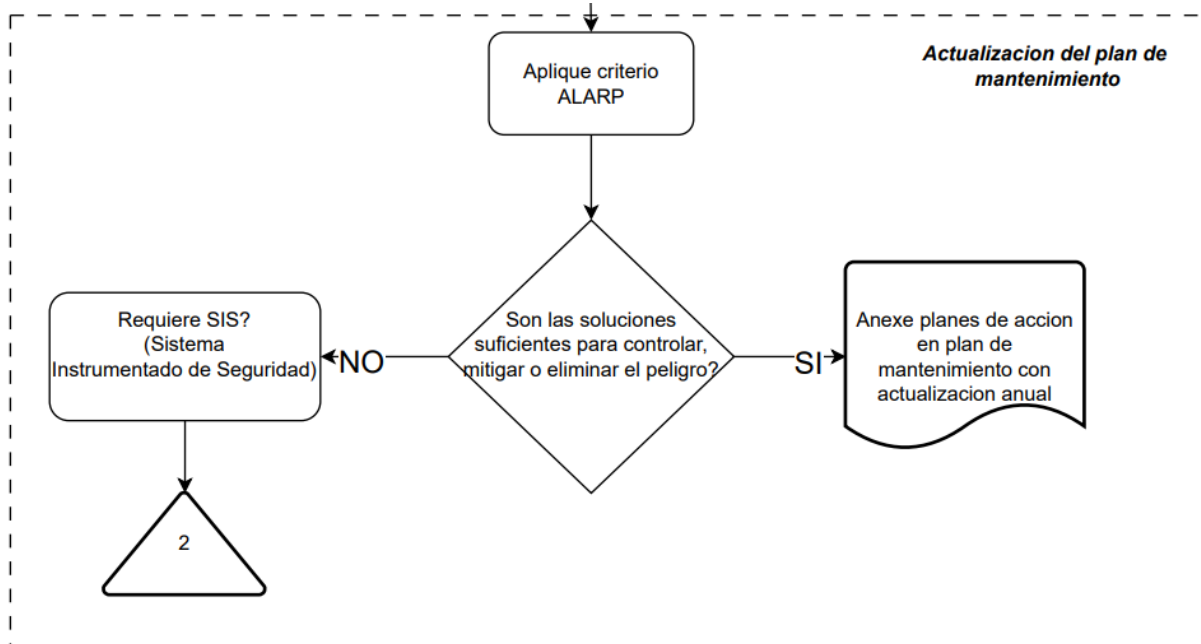
*Nota:* Al aplicar el criterio ALARP como resultado es necesario evaluar si las acciones identificadas son suficientes para controlar, mitigar o eliminar. Anexe acciones resultantes en análisis Hazop o aquellos modos de falla que aún son vulnerables será necesario analizarlos mediante los criterios de la seguridad funcional. Tomada de: *Elaboración propia*

**Ilustración 16** Diagrama de proceso de la evaluación del riesgo mediante análisis en Función Instrumentada de Seguridad SIF



*Nota:* Proceso de análisis para aquellos modos de falla con requerimiento de evaluación de una función instrumentada de seguridad SIF. Se aplica matriz grafica de riesgo para asignar capa de seguridad SIL. Tomada de: *Elaboración propia*

**Ilustración 17** Diagrama de proceso para actualización de plan de mantenimiento en base resultados del SIL



*Nota:* De acuerdo a los resultados y planes de acción de acuerdo al SIL, evaluamos nuevamente el criterio ALARP. Las soluciones deben satisfacer tanto el criterio de viabilidad económica como de seguridad funcional. Tomada de: *Elaboración propia*

### 3.7 Costo de ciclo de vida

El costo de vida de un activo representa la vida financiera a lo largo de su ciclo de trabajo, entendiendo que la vida estimada o inicial son los años que define el fabricante de la operación del activo. Según (UNE-EN ISO 15663, 2021) es una serie de etapas identificables en que un elemento, parte o componente, equipo, sistema, planta o instalación va desde la concepción hasta la disposición final. En este orden, el costo de ciclo de vida LCC es la suma descontada del Capex, Opex y los ingresos bajos esperados.

Realizar análisis de costo de ciclo de vida genera beneficio para las compañías ya que ayuda a realizar monitoreo financiero, además optimiza los costos a lo largo de su vida útil, también genera reducción de la incertidumbre sobre su comportamiento. Ayuda también a las áreas de operaciones a respaldar la función de mantenimiento, servicios, contratos, y consultoría de ciclo de vida.

Según (UNE-EN ISO 15663, 2021) el objetivo principal del costo de ciclo de vida es contribuir a la obtención del máximo valor, es decir rentabilidad en un proyecto; por tanto, esto se logra integrando el costo de ciclo de vida en el monitoreo financiero del activo. La técnica de costo de ciclo de vida se utiliza en la industria para determinar que opción de las alternativas presentes benefician más a la compañía, ayudando a mejorar aquellos aspectos técnicos, operativos, de salud, seguridad, ambientales y regulatorios. Estas técnicas ayudan a las empresas a tomar las mejores decisiones respecto a sus activos desde las fases de evaluación, ejecución, operación y fin de vida. Las fases mas importantes en el desarrollo de un proyecto y que impactan en la futura rentabilidad son aquellas acciones y tareas que se establecen en la etapa de la selección y la definición, pues en estas etapas es posible realizar cambios y optimizaciones, además son la base para el buen transcurso y desempeño de las fases posteriores, ya que estos cambios a medida que avanza la vida del proyecto o activo se van encareciendo.

Las fases del costo de ciclo de vida según (UNE-EN ISO 15663, 2021) son las siguientes:

- Exploración: Fase donde se identifica las oportunidades del negocio
- Evaluación: Fase donde se identifica si el proyecto es factible o viable
- Selección: Fase donde se establece el concepto de instalación del proyecto

## MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

64

- Definición: Fase donde define el concepto de instalación y la decisión final de inversión.
- Ejecución: fase cuando la instalación, activo o proyecto esta listo para operar o producir
- Operación: Final de la instalación y vida operativa del activo o proyecto.
- Abandono: Fase donde la instalación ha sido removida o eliminada

Durante el análisis de costo de ciclo de vida es necesario conocer al detalle aquellos aspectos que influyen de manera directa en la operación del activo, por tanto, la administración y la estrategia en la captura de datos serán un paso importante para conocer al detalle las variables que impactan el desempeño del activo.

Las empresas deberán tener un enfoque holístico del manejo administrativo de los activos, ya que mediante su control se podrán tener resultados sostenibles en el tiempo, dando también tratamiento a aquellos riesgos que se presentan a lo largo del ciclo de vida, las empresas que consideran todos los aspectos del ciclo de vida podrán tener control detallado y podrán conocer los beneficios financieros y operacionales que sus activos otorgan.

Las medidas de evaluación o de monitoreo del desempeño del costo de vida del activo están relacionadas bajo la medición cuantitativa en términos económicos, sin embargo, existen también los criterios de seguridad y de sostenibilidad o ambiental; sin embargo, ya que forman parte de los criterios de toma de decisiones sobre la continuidad o no de un proyecto o activo.

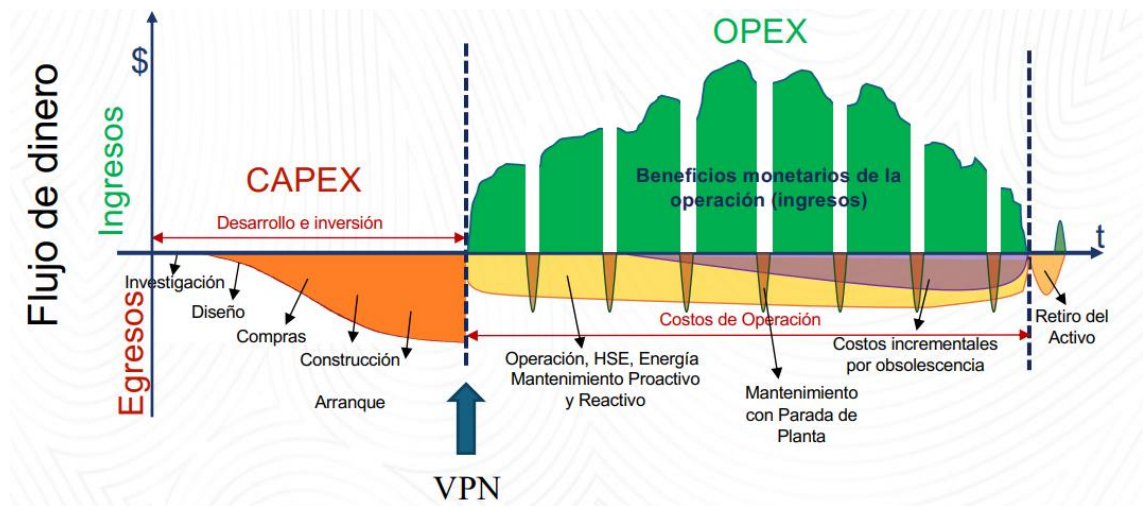
El coste de ciclo de vida busca en ocasiones comparar dos opciones o más para la situación de mejora, ya que en las empresas por lo general surgen dificultades con los procesos o activos que llevan a pesar en el cambio o sustitución con el propósito de mejora. (Plata, 2021) define algunos

# MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

65

motivos por los cuales el área de mantenimiento normalmente ve la necesidad de cambiar ciertos activos. Pérdida recurrente y significativa de la disponibilidad, la cual es impredecible o inevitable con acciones de mantenimiento. Pérdida significativa de la mantenibilidad debido a la indisponibilidad de los repuestos por la obsolescencia comercial o debido al incremento inevitable de los costos de mantenimiento. Aumentos de los requerimientos de capacidad productiva, lo que conlleva a sobrecargar los equipos y, por esta condición a un aumento inadmisibles del mantenimiento. Mayor exigencia en rendimientos energéticos o requisitos ambientales, lo que lleva al incumplimiento de la normatividad vigente y al aumento inadmisibles de los costos operativos. Nuevas tecnologías que pueden reemplazar los actuales equipos propiciado mejores resultados económicos, desempeño técnico y de seguridad

**Ilustración 18** Etapas y aspectos del costo de ciclo de vida del activo



*Nota:* Durante las etapas del ciclo de vida se presentan variables económicas tanto en beneficios como en costos. Tomada de: *Ingeniería de Mantenibilidad y Confiabilidad – Proceso para la Planeación táctica, Medición y Mejora continua del mantenimiento.* Daniel Ortiz Plata. 2021. (p 187)

**MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN**

Algunos aspectos importantes a considerar es que a nivel financiero los equipos sufren al cabo de los años una serie de descuentos en su valor inicial, esto debido que en el transcurso del tiempo el uso del equipo y las nuevas tecnologías afectan financieramente su valor en libros. Una vez el activo o proyecto es adquirido es necesario conocer por parte del fabricante los años de vida con el fin de conocer cuántos años de vida ofrecerá beneficios a la compañía (Macías Joven, 2020). Se establece en Colombia en la ley 1816 de 2016 que el porcentaje anual de la depreciación fiscal de los activos debe mantener límites máximos que oscilan entre 2,22% y 33% para maquinaria, equipos, muebles y enseres.

Las depreciaciones anuales pueden ser calculadas de acuerdo a los permitidos de la forma explícita por las NIIF, lo cuales pueden ser en línea recta o lineal el cual consiste en dividir el valor depreciable entre la vida útil del activo, otro método utilizado es el método de depreciación decreciente, método de las unidades de producción, entre otros. (Macías Joven, 2020).

**Tabla 13** *Vida útil de los activos según ley 1819 de 2016*

Conceptos de bienes a depreciar	Tasa de depreciación fiscal anual (%)	Equivalente en años
Construcciones y edificaciones	2,22	45 años
Acueducto, planta, redes y vías de comunicación	2,50	40 años
Flota y equipo aéreo	3,33	30 años
Flota y equipo férreo	5,00	20 años
Flota y equipo fluvial	6,67	15 años
Armamento, equipo de vigilancia, equipo eléctrico, flota y equipo de transporte terrestre, maquinaria, equipos, muebles y enseres	10,00	10 años
Equipo médico científico	12,50	8 años
Envases, empaques, herramientas, equipo de computación, redes de procesamiento de datos y equipo de comunicación	20,00	5 años

*Nota:* Tabla depreciación anual fiscal para equipos y maquinaria, en nuestro estudio aplica para un 10% anual y una vida útil de 10 años. Tomada de: *Guía del Gerente Financiero*. Macías Joven, María Teresa. 2020. (p 142)

### ***3.7.1 Costo del activo según legislación colombiana***

El costo del activo en su etapa de adquisición debe incluir los honorarios legales e intermediación, aranceles de importación e impuestos no recuperables, deducidos los descuentos comerciales y las rebajas. Todos los costos directamente atribuibles a la ubicación del activo en el lugar de operación y las condiciones necesarias para que pueda operar. Los costos de preparación para la instalación, los costos de entrega y manipulación inicial, costos de montaje y costos de arranque financieramente hacen parte del costo de activo (Macías Joven, 2020).

### ***3.7.2 Valor residual o salvamento***

El valor de salvamento es el valor que se espera tenga el activo al finalizar su vida útil. Por tratarse de una estimación debe evaluarse periódicamente, en especial, cuando se considere que ha habido algún cambio significativo como lo son repotenciaciones o mejoras técnicas en su instrumentación, control, capacidad o seguridad. Dados estos casos es necesario actualizar este valor comparándolo con un equipo de igual capacidad y condiciones de tecnología similares. Para estas modificaciones se recomienda usar NIIF para las pymes sección 10 o NIC 8 (NIIF Plenas) de cambios de estimaciones (Macías Joven, 2020).

### ***3.7.3 Toma de decisiones de inversión***

Para la toma de decisiones de inversión lo primero que se debe tener en cuenta son los ingresos que generará el negocio, proyecto, activo y cuáles son las inversiones que se requieren.

El flujo de caja libre se define para evaluar tanto los proyectos de inversión como determinar la capacidad de endeudamiento por medio de la evaluación de la capacidad de pagos.

### **3.7.3.1 Índices para evaluar proyectos de inversión**

Una vez se conozcan los flujos de caja libre es necesario realizar la valoración financiera para saber si el proyecto, activo o renovación tecnológica es viable económicamente. Los indicadores más utilizados para esta evaluación es la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN), cuyo cálculo e interpretación está ligado indefectiblemente al costo del capital WACC (Macías Joven, 2020)

#### ***3.7.3.1.1 Valor presente neto (VPN)***

Mediante este método ponemos en pesos de hoy todos los ingresos menos todos los egresos esperados del proyecto. Para el costo de ciclo de vida del activo es traer todos los beneficios durante el periodo de vida transcurrido como valor positivo, también traemos a valor de hoy aquellos costos de operación Opex constituido por actividades de mantenimiento, seguridad, consumo de energía, costos de parada de planta, costos incrementales por obsolescencia como valor negativo, el valor de salvamento se lleva al valor de hoy como valor positivo. Así mismo los valores del Capex deberán ser traídos al valor de hoy, pues el objetivo es considerar los valores de su ciclo de vida completo.

**Tabla 14** *Criterio de decisión de inversión vía VPN*

Criterios para evaluar por VPN		
<b>si <math>vpn &gt; 0</math></b>	viable	Un resultado positivo define que la rentabilidad es mayor a la que exige el inversionista y por lo tanto es viable llevarla a cabo.
<b>si <math>vpn = 0</math></b>	viable (valor limite)	Un resultado igual a cero significa que la rentabilidad del negocio es igual a la exigida por el inversionista; por lo tanto, es viable realizarlo
<b>si <math>vpn &lt; 0</math></b>	no es viable	Un valor presente negativo indica que la rentabilidad que ofrece el negocio es inferior exigida por el inversionista; por lo tanto, no es viable realizarlo

Nota: Tabla para la decisión de inversión vía Valor Presente Neto. Tomado de: *Guía del Gerente Financiero*. Macías Joven, María Teresa. 2020. (p 206)

### 3.7.3.1.2 Tasa interna de retorno (TIR)

Matemáticamente la tasa interna de retorno es la tasa en la que el VPN es igual a cero. Esta tasa puede ser calculada mediante interpolación lineal. La TIR es interpretada como la tasa de rentabilidad del proyecto, por lo tanto, deberá ser igual o mayor a la tasa esperada por el inversionista TIO (Tasa de Interés de Oportunidad)

### 3.7.3.1.3 Relación costo beneficio

La relación Beneficio – Costo (B/C) es un indicador que calcula la utilidad adicional a la Tasa de Interés de Oportunidad (TIO) que genera un negocio. Matemáticamente se define como la relación que hay entre el valor presente de los ingresos y el valor presente de los egresos, ambos descontados a la TIO (Carmona J. G., 2012). El resultado de esta operación deberá ser mayor a uno para que el proyecto de inversión sea viable u obtenga rentabilidad.

## 4 Metodología

Como paso inicial de análisis e identificar los modos de fallo o eventos peligrosos que se puedan presentar en el equipo fue necesario inicialmente realizar una subdivisión del equipo de acuerdo a la norma (ISO 14224, 2016), la cual define los grados taxonómicos o de subdivisión del equipo desde la ubicación espacial del equipo hasta la definición de sistema mantenible o parte. La especificación técnica del equipo en estudio son las siguientes:

**Tabla 15** Especificaciones técnicas de equipo malacate de carga cmax SC200

Código del Activo	CS - MCT06
Denominación Técnica	Malacate de carga vertical
Identificación fabricante	cmax - cnbm international corporation
Modelo	2016
Tipo	Malacate para construcción sc200/200
Capacidad	2000 kilogramos
Peso de la máquina	cabina 1750 kg / cuerpo mástil 125/145 kg
Velocidad de subida (m/min.)	36 m/min

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

71

Velocidad disp seguridad (m/seg)	1.2
Altura máxima elevación	250 metros
Tamaño cabina (m)	3 x 1.3 x 2.5
Voltaje Alimentación (v)	380 / 440
Frecuencia de trabajo (HZ)	50/60
Corriente de trabajo motores (amp)	3 x 23.5
Corriente principal (amp)	63

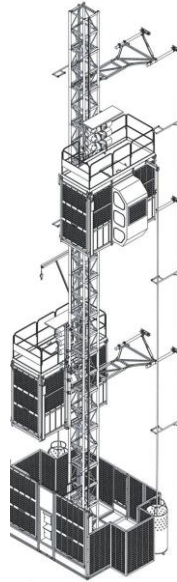
#### 4.1 Descripción general equipo malacate

Estos equipos se utilizan en obras de construcción para el transporte de personal y materiales, estos se instalan y desmonta fácilmente, por tanto, su altura se ajusta a la de los edificios. Existen de cabina simple y doble según las condiciones de necesidad o rapidez del proyecto constructivo. Un malacate de cabina simple se puede transformar rápidamente en uno doble añadiendo una cabina al lado contrario, con respecto a la seguridad, estos cuentan con un dispositivo de seguridad eléctrico y mecánico específicamente diseñado por el instituto para el desarrollo tecnológico en China.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

72

**Ilustración 19** *Ensamble general equipo malacate d construcción cmax CS200*

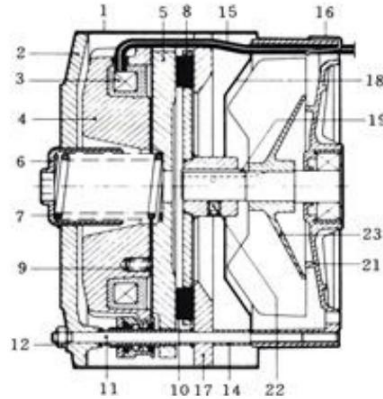


Nota: Esquema equipo ensamblado en losa con 2 cabinas de transporte, mástil con sistema de arriostamiento a loza. Tomado de: *Building Hoist Operation Manual. CNBM International Corporation.2005.* (p 01)

La motorización de estos equipos consta de 3 motores de 11 kw de potencia en la parte superior de la cabina. el tipo de caja de transmisión es tipo sin fin corona la cual entrega un par de 895 Nm a una velocidad del motor de 1500 RPM con una eficiencia de transmisión de 89,4%.

Los motores cuentan con un sistema de freno con discos de asbesto que una vez se quede sin energía el equipo, mecánicamente posee un sistema de resortes que bloquea el movimiento. Para liberar el disco es necesario que sea energizada la bobina magnética que tiene el sistema de freno.

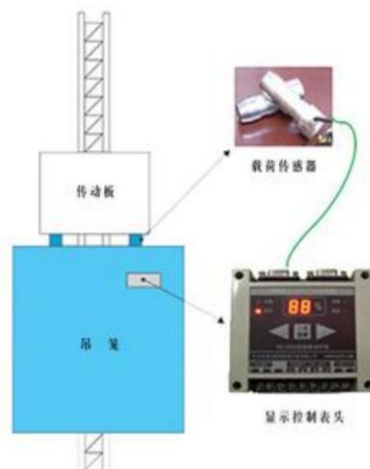
**Ilustración 20** *Mecanismo de freno de motor*



Nota: Sistema de motor consta de bobina magnética, disco asbesto y sistema de guías lineales con una tolerancia 0,1 mm que permite liberar o bloquear el movimiento del eje del motor. Tomado de: *Building Hoist Operation Manual. CNBM International Corporation.2005.* (p 82)

El equipo cuenta con un sistema de seguridad de carga ubicado en los pasadores que unen la cabina con el sistema de potencia superior. Estos dos conjuntos comparten los pasadores que a su vez miden la carga que transporta el equipo.

**Ilustración 21** *Sistema de seguridad pasadores y celdas de carga*



Nota: Sistema de pasadores con celda de carga, la cual mide los kilogramos de carga aplicados al sistema de transporte. Tomado de: *Building Hoist Operation Manual. CNBM International Corporation.2005.* (p 66)

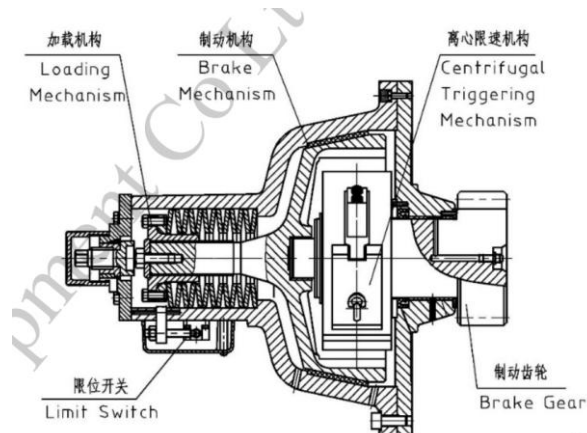
El quipo malacate cuenta con un dispositivo de seguridad “paracaídas”, el cual trabaja como equipo independiente al ser activado mediante el aumento de velocidad lineal de un engranaje que viaja a lo largo del mástil por el sistema cremallera. Este equipo según fabricante tiene una vida útil de 5 años a partir que sale de fábrica y debe realizarse una inspección vía fabricante una vez se cumpla este periodo.

**Ilustración 22** *Dispositivo de seguridad*



Nota: Dispositivo de seguridad es el elemento más importante del equipo malacate, ya que puede prevenir la caída libre de la cabina al momento de exceder la velocidad lineal.  
Tomado de: SAJ Safety Device operation Instrucción. Science & Technology Development Co Ltd, of SRIBS, 2018. (p 02)

**Ilustración 23** *Mecanismo interno dispositivo de seguridad*



MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

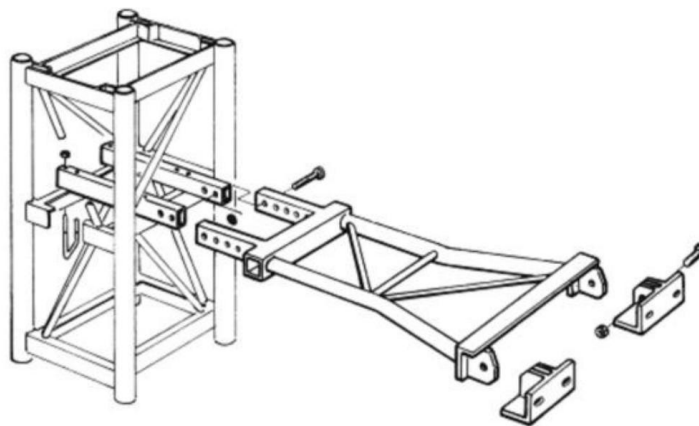
75

Nota: Estructura interna del dispositivo de seguridad. Tomado de: *SAJ Safety Device operation Instruction. Science & Technology Development Co Ltd, of SRIBS, 2018. (p 02)*

El dispositivo de seguridad está compuesto principalmente de un eje principal tipo piñón, un mecanismo de velocidad limite centrifugo, un mecanismo de freno mecanismo de carga y un swich limitador. El mecanismo de velocidad detecta aumento de velocidad lineal en el malacate, cuando el malacate supera la velocidad limite 0,95 m/s, el bloque centrifugo golpea el mecanismo de freno para producir una fuerza de frenado de manera gradual. Durante el frenado el swich limitador corta el suministro de energía como objetivo de protección.

El cuerpo de la estructura es un sistema modular que incrementa su tamaño de acuerdo a la necesidad. Cada cuerpo mide aproximadamente 1,7 metros de altura y viene sujetado con 4 pernos de 25 mm atornillado.

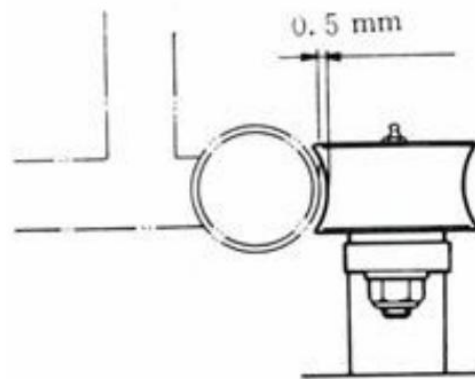
**Ilustración 24** Sección mástil modular con sistema anclaje a loza



Nota: Sección del mástil modular conectado al sistema de arrojamiento. Sistema atornillado y anclado a loza. Tomado de: *Building Hoist Operation Manual. CNBM International Corporation.2005. (p 65)*

El mecanismo de rodadura a lo largo del mástil consta de una serie de rodillos guía sobre los 4 ángulos alrededor del tubo principal del mástil. Estos elementos hacen que el sistema se mantenga independiente de la carga sobre una trayectoria lineal desplazándose libremente. Alguno de ellos tiene unos sistemas tipo pivote que brinda un grado de libertad sobre la estructura.

**Ilustración 25** Sistema rodadura de trayectoria lineal



Nota: Rodillo guía ubicado alrededor del tubo principal de desplazamiento. Tomado de: *Building Hoist Operation Manual. CNBM International Corporation.2005. (p 65)*

#### 4.2 Taxonomía del equipo malacate

Una vez conocido el equipo en estudio en sus principales sistemas, utilizamos la norma (ISO 14224, 2016) en su sección 8 respecto a la definición de límites del sistema. Esta subdivisión toma en cuenta la información relevante de la ubicación espacial del equipo, pues esta norma puede ser aplicable a todo tipo de industria, proceso o equipo pues orienta hacia la clasificación detallada de los sistemas y componentes que hacen el equipo funcional. De acuerdo a este lineamiento se realizó la siguiente clasificación del equipo malacate:

**Tabla 16** *Subdivisión taxonómica equipo malacate*

Sistema	Equipo	Ítem mantenible	Parte
Sistema de control	Panel de operación	Pulsadores	Botón verde
Sistema de control			Botón Rojo
Sistema de control	Panel de operación	Bases pulsadores	Bloque contacto
Sistema de control			
Sistema de control	Panel de operación	Paro emergencia	Botón
Sistema de control			Bloque contacto
Sistema de control	Panel de operación	Palanca arriba - abajo	Palanca
Sistema de control			Bloque contacto
Sistema de control			
Sistema de control	Gabinete de señales	Borneras	

*Nota:* Tabla de división taxonómica del equipo malacate según norma ISO 14224, hasta nivel taxonómico parte. Ver tabla completa en apéndice A

### 4.3 Aplicación método FMECA

El método FMECA (Failure Modes and Effects Critically Analysis) utilizado en este estudio contiene los lineamientos según (IEC 60812 E. C., 2018) la cual identifica las funciones principales y secundarias de los componentes o partes identificadas en la taxonomía del equipo en estudio. Las funciones identificadas para cada componente fueron estructuradas de acuerdo al estándar de funcionamiento del componente, fueron definidas las funciones principales y secundarias.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

78

**Tabla 17** *Funciones primarias y secundarias de elemento parte*

Parte	Funciones: P= Principal / S= Secundaria
Botón verde	P: Encender movimiento del equipo
Botón Rojo	P: Detener movimiento del equipo
Bloque contacto	P: Activar el contacto señal de encendido
	P: Interrumpir contacto señal de encendido
Botón	P: Interrumpir funcionamiento eléctrico del equipo
Bloque contacto	S: Activar contacto señal de encendido
Palanca	P: Activar movimiento arriba / abajo según operador
Bloque contacto	P: Activar señal de subida / bajada

*Nota:* Tabla identifica las funciones primarias (P) y secundarias (S) de las partes del equipo en el proceso taxonómico. Ver tabla completa en apéndice A

Una vez estructuradas las funciones, se procede a identificar qué tipo de falla funcional presenta la parte; este aspecto muestra si es una falla total, parcial o intermitente:

**Tabla 18** *Falla funcional y su tipología*

Funciones	Tipo de falla funcional	Falla funcional
P: Permitir corriente 5V que activa la funcionalidad del equipo	Total	Cabina en movimiento sin control
	Parcial intermitente	Cabina en movimiento sin control
P: Detener movimiento del equipo	Total	Cabina en movimiento sin control
	Parcial intermitente	Cabina en movimiento sin control
P: Activar el contacto señal de encendido	Total	Cabina no se mueve

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

79

	Parcial intermitente	Cabina no se mueve
	Parcial intermitente	Cabina no se mueve
P: Interrumpir contacto señal de encendido	Total	Cabina en movimiento sin control
	Parcial intermitente	Cabina en movimiento sin control
	Parcial intermitente	Cabina en movimiento sin control
P: Bloquear funcionamiento eléctrico del equipo	Total	Cabina no se mueve
	Parcial intermitente	Cabina no se mueve
	Parcial intermitente	Cabina no se mueve
S: Activar contacto señal de encendido	Total	Cabina no se mueve
	Parcial intermitente	Cabina no se mueve
	Parcial intermitente	Cabina no se mueve
P: Activar movimiento arriba / abajo según operador	Total	Cabina no se mueve
P: Activar señal de subida /bajada	Total	Cabina no se mueve

*Nota:* Las funciones primarias y secundarias con su respectivo tipo de falla funcional total, parcial o intermitente. Ver tabla completa en apéndice A

Los modos de falla son estructurados de cuando a las formas en que cada elemento de un sistema o proceso puede fallar y deben ser analizados de manera separada, una vez fueron

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

80

establecidos se les asignó un código, como resultado de este ejercicio fueron definidos 281 modos de falla para el equipo en estudio.

**Tabla 19** *Modo de falla equipo malacate*

<b>Falla funcional</b>	<b>Modo de falla</b>	<b>Código modo de falla</b>
Cabina en movimiento sin control	Botón pegado en retroceso por sulfatación	MF01
Cabina en movimiento sin control	Botón pegado en retroceso por desgaste	MF02
Cabina en movimiento sin control	Botón no interrumpe movimiento por sulfatación	MF03
Cabina en movimiento sin control	Botón no interrumpe movimiento por desgaste	MF04
Cabina no se mueve	Bloque contacto sin señal de activación por sulfatación	MF05
Cabina no se mueve	Bloque contacto sin señal de activación por desgaste	MF06
Cabina no se mueve	Bloque contacto sin señal de activación por terminal floja	MF07
Cabina en movimiento sin control	Bloque contacto no interrumpe señal por desgaste	MF08
Cabina en movimiento sin control	Bloque contacto no interrumpe señal por sulfatación	MF09
Cabina en movimiento sin control	Bloque contacto no interrumpe señal por terminal floja	MF10
Cabina no se mueve	Botón paro emergencia se pega por retroceso malo	MF11
Cabina no se mueve	Botón paro emergencia se pega por sulfatación	MF12
Cabina no se mueve	Botón paro emergencia se pega por terminal floja	MF13

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

81

Cabina no se mueve	Bloque contacto sin señal de activación por sulfatación	MF14
Cabina no se mueve	Bloque contacto sin señal de activación por desgaste	MF15
Cabina no se mueve	Bloque contacto sin señal de activación por terminal floja	MF16
Cabina no se mueve	Palanca no activa subida / bajada por pega	MF17
Cabina no se mueve	Bloque contacto sin señal de activación por sulfatación	MF18

*Nota:* Modos de falla identificados de acuerdo a la falla funcional. Ver tabla completa en apéndice A

#### 4.4 Proceso de encuesta a expertos

Para el proceso de encuesta fue necesario seleccionar 4 opiniones de expertos los cuales tienen experiencia en el mantenimiento y montaje de equipos malacate. Estas personas fueron seleccionadas teniendo en cuenta especialidades en mecánica, eléctrica industrial o ambas. Para este paso fue necesario elaborar preguntas con opciones lingüísticas en sus respuestas y fue resuelto en plataforma FORMS de Microsoft. El cuestionario fue elaborado de acuerdo al número de modos de falla identificados, por tanto, dieron como resultado 281 preguntas de selección múltiple.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Ilustración 26** *Modelo de pregunta y opciones de respuestas lingüísticas*

7. RESPONDA SEGUN SU EXPERIENCIA LA PROBABILIDAD DE QUE OCURRA EL MODO DE FALLA:  
\*

MF01PulsadoresBoton  
pegado en retroceso por sulfatacion

MUY ALTO

ALTO

LEVEMENTE ALTO

MEDIO

LEVEMENTE BAJO

BAJO

MUY BAJO

Nota: modelo de pregunta formulada por cada modo de falla identificado. Estas preguntas fueron subidas a plataforma FORMS dando respuesta vía celular. Ver link de encuestas en apéndices. Tomada de: *Plataforma FORMS Microsoft*. Apéndice C

Una vez realizadas las encuestas consolidamos los resultados lingüísticos en un solo archivo. Este archivo fue guardado en extensión Excel .CSV para que lo pueda leer el programa Matlab2024b. Los expertos dan una respuesta según su criterio

**Tabla 20** *Respuestas frecuencia modos de falla dada por expertos*

<b>Código</b>	<b>Modo de falla</b>	<b>Exp4</b>	<b>Exp2</b>	<b>Exp1</b>	<b>Exp5</b>
<b>MF01</b>	MF01PulsadoresBoton pegado en retroceso por sulfatación	bajo	muy bajo	alto	muy bajo
<b>MF02</b>	MF02PulsadoresBoton pegado en retroceso por desgaste	muy bajo	levemente bajo	levemente alto	muy bajo
<b>MF03</b>	MF03PulsadoresBoton no interrumpe movimiento por sulfatación	muy bajo	muy bajo	alto	muy bajo
<b>MF04</b>	MF04PulsadoresBoton no interrumpe movimiento por desgaste	bajo	medio	levemente alto	muy bajo
<b>MF05</b>	MF05Base pulsadores Bloque contacto sin señal de activación por sulfatación	muy bajo	muy bajo	alto	muy bajo

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

83

<b>MF06</b>	MF06Base pulsadores Bloque contacto sin señal de activación por desgaste	muy bajo	levemente bajo	levemente alto	muy bajo
<b>MF07</b>	MF07Base pulsadores Bloque contacto sin señal de activación por terminal floja	levemente bajo	levemente alto	bajo	muy bajo
<b>MF08</b>	MF08Base pulsadores Bloque contacto no interrumpe señal por desgaste	muy bajo	medio	levemente alto	muy bajo
<b>MF09</b>	MF09Base pulsadores Bloque contacto no interrumpe señal por sulfatación	muy bajo	muy bajo	alto	muy bajo
<b>MF10</b>	MF10Base pulsadores Bloque contacto no interrumpe señal por terminal floja	levemente bajo	medio	bajo	muy bajo

*Nota:* respuestas relacionadas a la frecuencia de falla sobre los modos de falla consultados, proceso de encuesta expertos de acuerdo a las posibilidades lingüísticas. Ver tabla completa en apéndice B / Operaciones resultados.csv

Una vez resueltas las encuestas de frecuencia pasamos a encuestar la severidad de los modos de falla identificados según su experiencia:

**Tabla 21** *Respuestas severidad modos de falla dados por expertos*

<b>Código</b>	<b>Modo de falla</b>	<b>Exp4</b>	<b>Exp2</b>	<b>Exp1</b>	<b>Exp5</b>
<b>MF01</b>	MF01PulsadoresBoton pegado en retroceso por sulfatación	bajo	muy bajo	medio	muy bajo
<b>MF02</b>	MF02PulsadoresBoton pegado en retroceso por desgaste	bajo	muy bajo	levemente bajo	muy bajo
<b>MF03</b>	MF03PulsadoresBoton no interrumpe movimiento por sulfatación	bajo	muy bajo	medio	muy bajo
<b>MF04</b>	MF04PulsadoresBoton no interrumpe movimiento por desgaste	bajo	muy bajo	medio	muy bajo
<b>MF05</b>	MF05Base pulsadores Bloque contacto sin señal de activación por sulfatación	muy bajo	muy bajo	levemente bajo	muy bajo

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

84

<b>MF06</b>	MF06Base pulsadores Bloque contacto sin señal de activación por desgaste	muy bajo	muy bajo	levemente alto	muy bajo
<b>MF07</b>	MF07Base pulsadores Bloque contacto sin señal de activación por terminal floja	bajo	muy bajo	levemente alto	bajo
<b>MF08</b>	MF08Base pulsadores Bloque contacto no interrumpe señal por desgaste	bajo	muy bajo	medio	bajo
<b>MF09</b>	MF09Base pulsadores Bloque contacto no interrumpe señal por sulfatación	bajo	muy bajo	medio	muy bajo
<b>MF10</b>	MF10Base pulsadores Bloque contacto no interrumpe señal por terminal floja	bajo	muy bajo	levemente alto	muy bajo

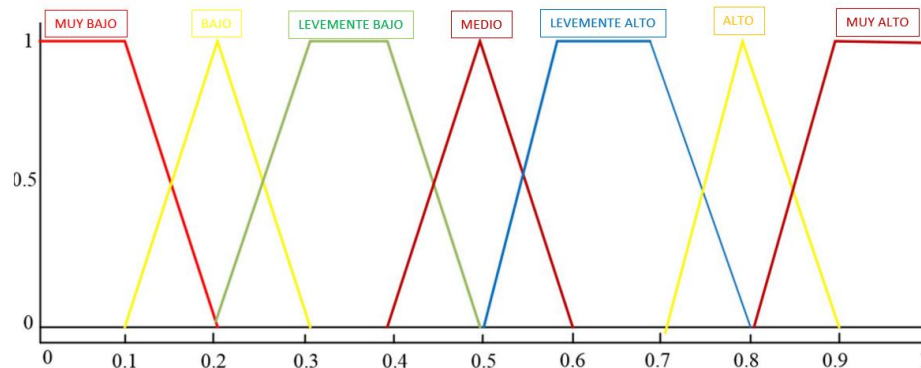
*Nota:* respuestas relacionadas a la severidad de falla sobre los modos de falla consultados, proceso de encuesta expertos de acuerdo a las posibilidades lingüísticas. . Ver tabla completa en apéndice B / severidad.csv

#### 4.5 Cálculo de número prioridad de riesgo (NPR)

Para el cálculo del número de prioridad del riesgo para los 281 modos de falla encontrados o identificados en el análisis FMECA, fue necesario desarrollar un código algorítmico en la herramienta Matlab 2024b con el fin de calcular la probabilidad y severidad para darle una asignación de número de prioridad de riesgo (NPR). La técnica aplicada en los algoritmos se basa en Z – números desarrollada en el artículo (Mohammad Yazdi, 2019) el cual presenta el proceso de asignación de pesos de acuerdo a la respuesta dada por el experto llamada función de membresía, esta función puede ser de forma trapezoidal o triangular. Estas valoraciones tienen en

cuenta el criterio de nivel de confianza el cual representa la “certeza” de la respuesta dada en cada pregunta. En total se desarrollaron 5 códigos algorítmicos.

**Ilustración 27** Funciones de membresía trapezoidal o triangular de acuerdo a expresiones lingüísticas



Nota: Funciones de membresía trapezoidal o triangular fuzzy traducida al español como guía de respuesta de los expertos. Tomada de: Journal of Loss Prevention in the Process Industries 58, A methodology for enhancing the reliability of expert system applications in probabilistic risk assessment. 2019, (p 54)

#### 4.5.1 Asignación funciones de membresía en herramienta

Por medio de este código fueron leídos los archivos Excel con extensión .CSV ‘Operaciones resultados’, ‘nivelconfianza’ para aspectos de frecuencia y severidad (apéndice B). En este paso son asignados de acuerdo a la expresión lingüística el rango numérico, ya sea trapezoidal o triangular que la representa, es de mencionar que esta actividad es realizada para las respuestas de los 4 expertos. Este mismo proceso es realizado para la tabla de resultados lingüísticos dadas por expertos respecto al nivel de confianza o “certeza” de las preguntas dadas, así mismo los expertos les fue compartida la siguiente tabla para tener un mejor panorama de los niveles lingüísticos a cada respuesta dada en base a niveles de calor.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

86

**Tabla 22** Número fuzzy según expresión lingüística para asignación de frecuencia

<b>Factor de Frecuencia</b>				
<b>Rango</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Criterio de ayuda</b>	<b>Expresión lingüística</b>	<b>Número fuzzy</b>
10	muy alto	fallas continuas 1,5 al mes	muy alto	(0.8,0.9,1)
9		fallas promedio 1,2 por mes	alto	(0.7,0.8,0.9)
7	levemente alto	fallas promedio 1 por mes	levemente alto	(0.5,0.6,0.7,0.8)
5	moderado	fallas ocasionales cada mes y medio	moderado	(0.4,0.5,0.6)
4	bajo	falla rara vez cada 2-3 meses	levemente bajo	(0.2,0.3,0.4,0.5)
3		cada 6 meses	bajo	(0.1, 0.2,0.3)
2	remota	falla poco 1 por año o nada	muy bajo	(0,0.1,0.2)

*Nota:* Numero fuzzy para la asignación de valor de funciones de membresía según expresión lingüística dada por experto

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 23** *Proceso asignación funciones de membresía a cada expresión lingüística*

COD IGO	MODO DE FALLA	OPINION CUALITATIVA				MEMBRESIA EXP4				MEMBRESIA EXP2				MEMBRESIA EXP1				MEMBRESIA EXP5			
		EXP4	EXP2	EXP1	EXP5	Var 7_1	Var 7_2	Var 7_3	Var 7_4	Var 8_1	Var 8_2	Var 8_3	Var 8_4	Var 9_1	Var 9_2	Var 9_3	Var 9_4	Var 10_1	Var 10_2	Var 10_3	Var 10_4
MF01	Pulsadores Botón pegado en retroceso por sulfatación	BAJO	MUY BAJO	ALTO	MUY BAJO	0,1	0,2	0,2	0,3	0	0,1	0,1	0,2	0,7	0,8	0,8	0,9	0	0,1	0,1	0,2
MF02	Pulsadores Botón pegado en retroceso por desgaste	MUY BAJO	LEVEMENTE BAJO	LEVEMENTE ALTO	MUY BAJO	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0	0,1	0,1	0,2
MF03	Pulsadores Botón no interrumpe movimiento por sulfatación	MUY BAJO	MUY BAJO	ALTO	MUY BAJO	0	0,1	0,1	0,2	0	0,1	0,1	0,2	0,7	0,8	0,8	0,9	0	0,1	0,1	0,2
MF04	Pulsadores Botón no interrumpe movimiento por desgaste	BAJO	MEDIO	LEVEMENTE ALTO	MUY BAJO	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0	0,1	0,1	0,2
MF05	Base pulsadores Bloque contacto sin seÑal de activación por sulfatación	MUY BAJO	MUY BAJO	ALTO	MUY BAJO	0	0,1	0,1	0,2	0	0,1	0,1	0,2	0,7	0,8	0,8	0,9	0	0,1	0,1	0,2

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

MF06	Base pulsadores Bloque contacto sin seÑal de activación por desgaste	MUY BAJO	LEVEMEN TE BAJO	LEVEMEN TE ALTO	MUY BAJO	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0	0,1	0,1	0,2
MF07	Base pulsadores Bloque contacto sin seÑal de activación por terminal floja	LEVEMENTE BAJO	LEVEMEN TE ALTO	BAJO	MUY BAJO	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,1	0,2	0,2	0,3	0	0,1	0,1	0,2
MF08	Base pulsadores Bloque contacto no interrumpe seÑal por desgaste	MUY BAJO	MEDIO	LEVEMEN TE ALTO	MUY BAJO	0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0	0,1	0,1	0,2
MF09	Base pulsadores Bloque contacto no interrumpe seÑal por sulfatación	MUY BAJO	MUY BAJO	ALTO	MUY BAJO	0	0,1	0,1	0,2	0	0,1	0,1	0,2	0,7	0,8	0,8	0,9	0	0,1	0,1	0,2
MF10	Base pulsadores Bloque contacto no interrumpe seÑal por terminal floja	LEVEMENTE BAJO	MEDIO	BAJO	MUY BAJO	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,1	0,2	0,2	0,3	0	0,1	0,1	0,2

*Nota:* La asignación de los valores de membresía de acuerdo a la expresión lingüística. El código Matlab hace una búsqueda de la impresión y asigna los valores correspondientes ya sea función triangular o trapezoidal. Tomada de algoritmo de herramienta Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / mfalla+membresia.csv

#### 4.5.2 Proceso de cálculo probabilidad de ocurrencia Fuzzy

##### 5.5.2.1 Proceso defuzzificación para nivel de confianza

El proceso de cálculo para la probabilidad de ocurrencia depende del paso anterior de la asignación de número fuzzy de acuerdo a la expresión lingüística dada (apéndice B / mfalla+membresia+confianza.csv), se procede a convertir los valores lingüísticos expresados para el nivel de confianza o “certeza” en pesos de opinión mediante un tratamiento matemático llamado defuzzificación de número fuzzy triangular o trapezoidal.

Cálculo de defuzzificación triangular de numero fuzzy para nivel de confianza:

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_2}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_2}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} dx} = \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \quad (4)$$

Siendo

$$\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$$

*Nota:* Ecuación para funciones de membresía triangulares aplicado a expresión de nivel de confianza. Tomada de: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 58, A methodology for enhancing the reliability of expert system applications in probabilistic risk assessment.* 2019, (p 54)

Cálculo de defuzzificación trapezoidal de numero fuzzy para nivel de confianza

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} = \frac{1}{3} \frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4 + a_3 - a_1 - a_2)} \quad (5)$$

Siendo

$$\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$$

*Nota:* Ecuación para funciones de membresía trapezoidales aplicado a expresiones de nivel de confianza. Tomada de: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 58, A methodology for enhancing the reliability of expert system applications in probabilistic risk assessment.* 2019, (p 54)

**Tabla 24** Resultados proceso desfuzzificacion de funciones de membresía del nivel de confianza

<b>exp4</b>	<b>exp2</b>	<b>exp1</b>	<b>exp5</b>
0.447213595499958	0.316227766016838	0.894427190999916	0.316227766016838
0.316227766016838	0.591607978309962	0.806225774829855	0.316227766016838
0.316227766016838	0.316227766016838	0.894427190999916	0.316227766016838
0.447213595499958	0.707106781186548	0.806225774829855	0.316227766016838
0.316227766016838	0.316227766016838	0.894427190999916	0.316227766016838
0.316227766016838	0.591607978309962	0.806225774829855	0.316227766016838
0.591607978309962	0.806225774829855	0.447213595499958	0.316227766016838
0.316227766016838	0.707106781186548	0.806225774829855	0.316227766016838
0.316227766016838	0.316227766016838	0.894427190999916	0.316227766016838

*Nota:* Resultados de la iteración matemática en código Matlab 2024b de las ecuaciones para desfuzzificacion de números fuzzy respecto a nivel de confianza cada experto. Ver tabla completa en apéndice B / defuzzificacion.scv

#### 4.5.2.2 Adición de peso nivel de confianza a opinión expertos

Una vez calculado el peso del nivel de confianza de la expresión lingüística se procede a adicionar este peso a la función de membresía de opinión experto mediante multiplicación de nivel de confianza de tabla 22 con tabla 21. Este es un proceso matemático de multiplicación elemento por elemento.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 25** Adición peso nivel de confianza a opinión experto 4

<b>Exp4</b>			
0.0447213595499958	0.0894427190999916	0.0894427190999916	0.134164078649987
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0.0447213595499958	0.0894427190999916	0.0894427190999916	0.134164078649987
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0.118321595661992	0.177482393492988	0.236643191323985	0.295803989154981
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676

*Nota:* Resultados obtenidos a partir de la multiplicación de pesos de la tabla 21 relacionados al nivel de confianza del experto 4 con los números de las funciones de membresía asignadas del experto 4. Iteración matemática Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / confianzaXopinion4.csv

**Tabla 26** Adición peso nivel de confianza a opinión experto 2

<b>Exp2</b>			
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0.118321595661992	0.177482393492988	0.236643191323985	0.295803989154981
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0.282842712474619	0.353553390593274	0.353553390593274	0.424264068711929
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0.118321595661992	0.177482393492988	0.236643191323985	0.295803989154981
0.403112887414927	0.483735464897913	0.564358042380898	0.644980619863884
0.282842712474619	0.353553390593274	0.353553390593274	0.424264068711929
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

*Nota:* Resultados obtenidos a partir de la multiplicación de pesos de la tabla 21 relacionados al nivel de confianza del experto 2 con los números de las funciones de membresía asignadas del experto 2. Iteración matemática Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / confianzaXopinion2.csv.

**Tabla 27** Adición peso nivel de confianza a opinión experto 1

<b>Exp 1</b>			
0.626099033699941	0.715541752799933	0.715541752799933	0.804984471899924
0.403112887414927	0.483735464897913	0.564358042380898	0.644980619863884
0.626099033699941	0.715541752799933	0.715541752799933	0.804984471899924
0.403112887414927	0.483735464897913	0.564358042380898	0.644980619863884
0.626099033699941	0.715541752799933	0.715541752799933	0.804984471899924
0.403112887414927	0.483735464897913	0.564358042380898	0.644980619863884
0.0447213595499958	0.0894427190999916	0.0894427190999916	0.134164078649987
0.403112887414927	0.483735464897913	0.564358042380898	0.644980619863884
0.626099033699941	0.715541752799933	0.715541752799933	0.804984471899924

*Nota:* Resultados obtenidos a partir de la multiplicación de pesos de la tabla 21 relacionados al nivel de confianza del experto 1 con los números de las funciones de membresía asignadas del experto 1. Iteración matemática Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / confianzaXopinion1.csv.

**Tabla 28** Adición peso nivel de confianza a opinión experto 5

<b>Exp5</b>			
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676
0	0.0316227766016838	0.0316227766016838	0.0632455532033676

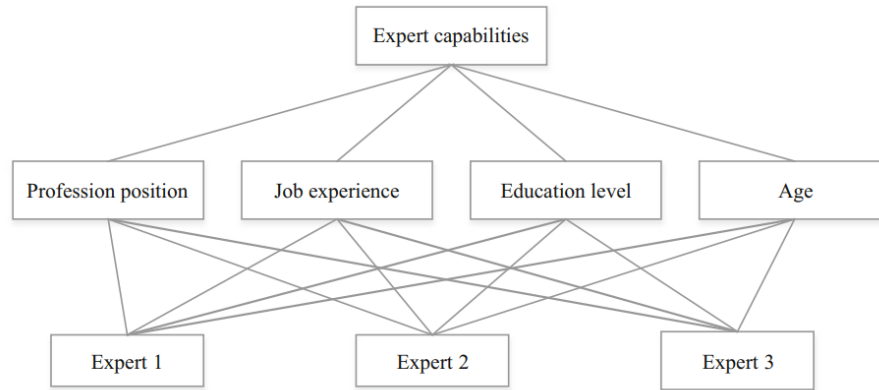
*Nota:* Resultados obtenidos a partir de la multiplicación de pesos de la tabla 21 relacionados al nivel de confianza del experto 5 con los números de las funciones de membresía asignadas del experto 5. Iteración matemática Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / confianzaXopinion5.csv.

#### 4.5.2.3 Cálculo peso experto W

El proceso de cálculo de peso de los expertos es una operación matemática relacionada a 4 aspectos importantes con el propósito de cuantificar las capacidades respecto a 4 aspectos importantes:

- Posición profesional
- Experiencia laboral
- Nivel de educación
- Edad

**Figura 2** Esquema de jerarquización de expertos fuzzy AHP



*Nota:* Esquema de comparación de expertos, en la parte superior se ubica el criterio objetivo, en la parte media se ubican las categorías a evaluar y que la parte baja el número de expertos evaluados. Tomado de: *Hybrid Probabilistic Risk Assessment Using Fuzzy FTA and Fuzzy AHP in a Process Industry*. Mohammad Yazdi. 2017. (p 762)

Estos criterios serán contrastados mediante matriz donde cada uno se compara respecto al otro otorgando un peso  $W$ . este proceso es llamado par comparación aditiva (Huang, 2011).

**Tabla 29** Criterios comparativos expertos encuestados

Expertos							
Referencia	Nombres	Apellidos	Campo de trabajo	Experiencia en malacate	Educación	Edad	Empresa
experto 1	Andrés Felipe	londoño	supervisor	7 años o mas	técnico	39	CB ingelectricos
experto 2	jahir	trujillo	técnico / tecnólogo	0 - 1 años	tecnólogo	39	centro sur
experto 4	juan camilo	arenas cardona	ingeniero	1 - 4 años	master	40	centro sur
experto 5	keiner	Patíño	ayudante	0 - 1 años	tecnólogo	27	centro sur

*Nota:* Información para el proceso de comparación de expertos.

La matriz comparativa por pares es un proceso jerárquico que realiza una asignación de valores de números fuzzy ubicándolos en la diagonal superior y en la inferior es posicionado su inverso.

**Ilustración 28** *Matriz pares de comparación de criterios de números fuzzy*

$$\begin{aligned}
 P &= \begin{pmatrix} & E_1 & E_2 & E_3 \\ E_1 & 1 & \tilde{1} & \tilde{3} \\ E_2 & \tilde{1} & 1 & \tilde{3} \\ E_3 & \tilde{3}^{-1} & \tilde{3}^{-1} & 1 \end{pmatrix}, \\
 J &= \begin{pmatrix} & E_1 & E_2 & E_3 \\ E_1 & 1 & \tilde{5} & \tilde{3} \\ E_2 & \tilde{5}^{-1} & 1 & \tilde{3}^{-1} \\ E_3 & \tilde{3}^{-1} & \tilde{3} & 1 \end{pmatrix}, \\
 E &= \begin{pmatrix} & E_1 & E_2 & E_3 \\ E_1 & 1 & \tilde{3} & \tilde{3} \\ E_2 & \tilde{3}^{-1} & 1 & \tilde{1} \\ E_3 & \tilde{3}^{-1} & \tilde{1} & 1 \end{pmatrix}, \\
 A &= \begin{pmatrix} & E_1 & E_2 & E_3 \\ E_1 & 1 & \tilde{3}^{-1} & \tilde{1} \\ E_2 & \tilde{3} & 1 & \tilde{3} \\ E_3 & \tilde{1} & \tilde{3}^{-1} & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

*Nota:* La matriz se compone de una matriz identidad (unos) y en la triangular superior van ubicados los números fuzzy de acuerdo a la comparación de 2 expertos. A corresponde a (Age) edad, E corresponde a (Educación) educación, J corresponde a (Job) trabajo y P corresponde a (profesión) profesión. Tomada de: *Hybrid Probabilistic Risk Assessment Using Fuzzy FTA and Fuzzy AHP in a Process Industry*. Mohammad Yazdi. 2017. (p 760)

**Tabla 30** *Tabla número fuzzy para evaluar criterio comparación*

Fuzzy number	Qualitative terms	Triangular fuzzy number
$\tilde{9}$	Absolutely important (AI)	(7, 9, 9)
$\tilde{7}$	Very strongly important (VSI)	(5, 7, 9)
$\tilde{5}$	Strongly important (SI)	(3, 5, 7)
$\tilde{3}$	Weakly important (WI)	(1, 3, 5)
$\tilde{1}$	Equally important (EI)	(1, 1, 3)
$\tilde{3}^{-1}$	Weakly unimportant (WU)	(1/5, 1/3, 1)
$\tilde{5}^{-1}$	Strongly unimportant (SU)	(1/7, 1/5, 1/3)
$\tilde{7}^{-1}$	Very strongly unimportant (VSU)	(1/9, 1/7, 1/5)
$\tilde{9}^{-1}$	Absolutely unimportant (AU)	(1/9, 1/9, 1/7)

*Nota:* Número fuzzy correspondiente a un término cualitativo. Una vez realizada la comparación de experto respecto al criterio se realiza la asignación de la función de membresía triangular en matriz de comparación. Tomada de: *Improving failure mode and effect analysis (FMEA) with consideration of uncertainty handling as an interactive approach*. Mohammad Yazdi. 2019 (p 446)

Para nuestro análisis las matrices comparativas respecto a los criterios evaluados fueron calculados comparando cada criterio entre los mismos expertos. La diagonal, llamada identidad sus valores de unos significa la comparación del experto entre sí mismo.

**Tabla 31** *Criterio de comparación trabajo expertos*

```
ctrabajocell =
4x4 cell array

    {[          1 1 1]}    {[1 3 5]}    {[          1 1 3]}    {[3 5 7]}
    {[ 0.2000 0.3333 1]}    {[1 1 1]}    {[          1 1 3]}    {[1 1 3]}
    {[          1 1 3]}    {[1 1 3]}    {[          1 1 1]}    {[1 3 5]}
    {[0.1429 0.2000 0.3333]}    {[1 1 3]}    {[0.2000 0.3333 1]}    {[1 1 1]}
```

*Nota:* Matriz con números fuzzy ubicados de acuerdo al criterio trabajo. Cada columna esta asignada a experto 4,2,1,5 respectivamente, así mismo las filas en orden descendente. Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b / Apéndice B / comparaexpertos.m

**Tabla 32** *Criterio de comparación experiencia expertos*

```
cexpcell =
4x4 cell array

    {[          1 1 1]}    {[          1 1 3]}    {[          3 5 7]}    {[1 1 3]}
    {[          1 1 3]}    {[          1 1 1]}    {[          5 7 9]}    {[1 1 3]}
    {[0.1429 0.2000 0.3333]}    {[0.1111 0.1429 0.2000]}    {[          1 1 1]}    {[5 7 9]}
    {[          1 1 3]}    {[          0.3333 1 1]}    {[0.1111 0.1429 0.2000]}    {[1 1 1]}
```

*Nota:* Matriz con números fuzzy ubicados de acuerdo al criterio experiencia. Cada columna esta asignada a experto 4,2,1,5 respectivamente, así mismo las filas en orden descendente. Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b / Apéndice B / comparaexpertos.m

**Tabla 33** *Criterio de comparación educación expertos*

```
ceducell =
4x4 cell array

{[          1 1 1]}  {[          1 1 3]}  {[          3 5 7]}  {[[1 1 3]}
{[          1 1 3]}  {[          1 1 1]}  {[          1 3 5]}  {[[1 1 3]}
{[0.1429 0.2000 0.3333]}  {[0.2000 0.3333 1]}  {[          1 1 1]}  {[[1 3 5]}
{[          1 1 3]}  {[          0.3333 1 1]}  {[0.2000 0.3333 1]}  {[[1 1 1]}
```

*Nota:* Matriz con números fuzzy ubicados de acuerdo al criterio educación. Cada columna esta asignada a experto 4,2,1,5 respectivamente, así mismo las filas en orden descendente. Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b / Apéndice B / comparaexpertos.m

**Tabla 34** *Criterio de comparación edad expertos*

```
cagecell =
4x4 cell array

{[          1 1 1]}  {[          1 1 3]}  {[          1 1 3]}  {[[5 7 9]}
{[          1 1 3]}  {[          1 1 1]}  {[          1 1 3]}  {[[3 5 7]}
{[          1 1 3]}  {[          0.3333 1 1]}  {[          1 1 1]}  {[[3 5 7]}
{[0.1111 0.1429 0.2000]}  {[0.1429 0.2000 0.3333]}  {[0.1429 0.2000 0.3333]}  {[[1 1 1]}
```

*Nota:* Matriz con números fuzzy ubicados de acuerdo al criterio edad. Cada columna esta asignada a experto 4,2,1,5 respectivamente, así mismo las filas en orden descendente. Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b / Apéndice B / comparaexpertos.m

Una vez se obtengan las matrices de comparación por cada criterio se realiza la multiplicación de elemento por elemento de las 4 matrices de categorías en búsqueda de la matriz de síntesis de comparación principal

**Ecuación 1** *Matriz síntesis de comparación de pesos fuzzy*

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{1/n} \quad (1)$$

*Nota:* multiplicación elemento por elemento. N corresponde al número de criterios seleccionados para la evaluación. Tomada de: *Improving failure mode and effect analysis*

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

(FMEA) with consideration of uncertainty handling as an interactive approach. Mohammad Yazdi. 2019 (p 446)

**Tabla 35** Matriz síntesis de comparación principal

```
sintppal =
4x4 cell array
{[ 1 1 1]} {[ 1 1.3161 3.4087]} {[1.7321 2.2361 4.5826]} {[1.9680 2.4323 4.8797]}
{[0.6687 0.7598 2.2795]} {[ 1 1 1]} {[1.4953 2.1407 4.4860]} {[1.3161 1.4953 3.7078]}
{[ 0.3780 0.4472 1]} {[0.2934 0.4671 0.8801]} {[ 1 1 1]} {[1.9680 4.2129 6.2997]}
{[0.3549 0.4111 0.8801]} {[ 0.3549 0.6687 1]} {[0.1587 0.2374 0.5081]} {[ 1 1 1]}
```

*Nota:* la matriz de síntesis es el resultado de la multiplicación matricial de los elementos uno a uno de las matrices de comparación. Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b / Apéndice B / comparaexpertos.m

Luego multiplicamos elemento por elemento las categorías para los 4 expertos y conseguir los pesos fuzzy para cada dimensión:

Ecuación peso del criterio fuzzy W

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (2)$$

*Nota:* Multiplicación criterios de síntesis por expertos. Tomada de: *Improving failure mode and effect analysis (FMEA) with consideration of uncertainty handling as an interactive approach.* Mohammad Yazdi. 2019 (p 446)

**Tabla 36** Peso  $W_i$  por cada dimensión experto

```
wpesodim =
0.3894    0.3753    0.3794
0.3070    0.2865    0.3186
0.1959    0.2222    0.1970
0.1078    0.1160    0.1050
```

*Nota:* Peso por cada dimensión por experto, se leen las 3 dimensiones por experto por filas descendente  $W_4$ ,  $W_2$ ,  $W_1$ ,  $W_5$  respectivamente para mejor entendimiento. Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b / Apéndice B / comparaexpertos.m

Por último, según (Yazdi, 2017) se realiza procedimiento de calculo CoA (Center of Area) el cual es usado para computarizar el mejor Non-fuzzy performance (BNP) de los pesos fuzzy en cada dimensión.

*Ecuación centre of Área (CoA) – Best Non fuzzy performance (BNP)*

$$w_i = [(uw_i - lw_i) + (mw_i - lw_i)]/3 + lw_i \quad (5)$$

*Nota:* El cálculo es realizado por cada dimensión por cada experto. Tomado de: *Hybrid Probabilistic Risk Assessment Using Fuzzy FTA and Fuzzy AHP in a Process Industry.*

Mohammad Yazdi. 2017. (p 758)

**Tabla 37** *Peso W por experto*

wpeso =
0.3814
0.3040
0.2050
0.1096

*Nota:* Peso W por cada experto, se leen en filas descendente  $W_4, W_2, W_1, W_5$  respectivamente para mejor entendimiento, la suma de estos valores debe dar 1 que representa el 100% de los expertos. Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b / Apéndice B / comparaexpertos.m

#### 4.5.2.4 Agregación peso W a opinión de expertos

Una vez identificado el peso de los expertos de acuerdo a categorías de evaluación procedemos a realizar la agregación de estos pesos a la opinión de expertos.

*Ecuación de agregación de peso expertos W a número fuzzy*

$$\tilde{B}_{\text{aggregated}} = \sum_{m=1}^M W_m \otimes \tilde{B}_m \quad (6)$$

*Nota:* el proceso de agregaciones la multiplicación de vector de pesos W en matriz fuzzy de opinión expertos resultante de los números fuzzy. Tomada de: *Journal of Loss Prevention in*

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

100

*the Process Industries 58, A methodology for enhancing the reliability of expert system applications in probabilistic risk assessment. 2019, (p 57)*

**Tabla 38** Resultados agregación peso W expertos a números fuzzy opinión

MF	W experto + Agregación			
MF01	0.14543012455080 2	0.19390350253164 9	0.19390350253164 9	0.24237688051249 6
MF02	0.11862750882491 6	0.16866956212875 1	0.20318700901163 5	0.25322906231547
MF03	0.12837548875494 5	0.17185367956185 2	0.17185367956185 2	0.21533187036875 9
MF04	0.18570127126298 5	0.24425000580306 1	0.26078087748944 3	0.31932961202951 9
MF05	0.12837548875494 5	0.17185367956185 2	0.17185367956185 2	0.21533187036875 9
MF06	0.11862750882491 6	0.16866956212875 1	0.20318700901163 5	0.25322906231547
MF07	0.17684985406466 7	0.23655742239618 6	0.28363015516046 3	0.34333772349198 2
MF08	0.16864663546712 8	0.22220018283326 4	0.23873105451964 6	0.29228460188578 2
MF09	0.12837548875494 5	0.17185367956185 2	0.17185367956185 2	0.21533187036875 9

*Nota:* Resultado de agregación de peso W a números fuzzy de opinión, estos resultados son los números triangulares o trapezoidales resultantes por cada modo de falla. Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / agregación+experto.csv

#### 4.5.2.5 Cálculo valor promedio fuzzy (Crisp value)

Aplicando el procedimiento anterior de desfuzzificación trapezoidal (ecuación 2) para los resultados de agregación.

**Tabla 39** Valor promedio de números fuzzy (Crisp Value) por cada modo de falla para probabilidad

MF	crisp.value.prob
MF01	0.193903502531649
MF02	0.185928285570193
MF03	0.171853679561852
MF04	0.252515441646252
MF05	0.171853679561852
MF06	0.185928285570193
MF07	0.260093788778324
MF08	0.230465618676455
MF09	0.171853679561852

*Nota:* Resultados del valor promedio de los números fuzzy para probabilidad de falla valorados por los 4 expertos (Crisp Value). Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / crispvalueXiprob.csv

#### 4.5.2.6 Probabilidad de falla del modo de falla por año

Para el cálculo de probabilidad de ocurrencia para cada modo de falla por año se aplica estudio realizado por (Onisawa, 1988) mediante la siguiente expresión:

Expresión para calcular la probabilidad de falla del del valor promedio fuzzy (Crisp Value)

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

102

$$\text{Failure probability} = \begin{cases} 1/10^K, & \text{Crisp failure possibility} \neq 0 \\ 0, & \text{Crisp failure possibility} = 0 \end{cases}$$

$$K = \left[ \left( \frac{1}{CFP} - 1 \right) \right]^{1/3} \times 2.301 \quad (6)$$

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 40** Resultados probabilidad de falla por año equipos malacate en orden de importancia

<b>código</b>	<b>Modo de falla</b>	<b>probabilidad modo de falla por año</b>
MF97	MF97Eje de salida Dispositivo no se frena a una velocidad de caída de 0,95 m/s	0.0527591428089082
MF100	MF100Eje de salida Dispositivo no frena con una carga de 40 KN	0.0527591428089082
MF107	MF107Señal de carga bulón Bulón celda de carga desplazado por platina de seguridad faltante	0.0527591428089082
MF109	MF109Señal de carga bulón Bulón celda de carga reventado por fatiga	0.0527591428089082
MF105	MF105Señal de carga bulón Celda de carga no bloquea con cargas superiores a 2000 Kgs	0.0206379714047779
MF106	MF106Señal de carga bulón Bulon celda de carga reventado por sobrecarga	0.0203276829837301
MF136	MF136bujes freno Esferas no ruedan por desgaste	0.0203276829837301
MF111	MF111ControladorDispositivo de carga no bloquea porque esta quemado	0.0197464506435271
MF114	MF114ControladorDispositivo de carga no censa por desconfiguración	0.0197464506435271
MF194	MF194Abrazaderas motores Abrazadera floja por falta de apriete	0.0164993107799926
MF103	MF103Señal de carga bulón Celda de carga no muestra lectura o lectura errada por cable roto	0.0155489602443435
MF197	MF197Abrazaderas motores Abrazadera deteriora motor por mala selección del caucho	0.0137774305964807
MF104	MF104Señal de carga bulón Celda de carga no muestra lectura por deterioro interno	0.0130014094883529

*Nota:* resultados de probabilidad de falla de los modos de falla en estudios mediante proceso de jerarquización fuzzy (AHP). Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / probabilidadMF.m

#### 4.5.3 Proceso de cálculo severidad fuzzy

En este procedimiento se realiza de la misma manera del procedimiento 4.5.2 del cálculo de probabilidad con los datos o encuestas realizadas a los expertos para severidad o impacto y también el nivel de confianza o “certeza” en las respuestas lingüísticas de los modos de falla en estudio. El tratamiento de las expresiones lingüísticas mediante las funciones de membresía es igual. Como tal los resultados de Crisp value de severidad son los siguientes:

**Tabla 41** Valor promedio de números fuzzy (Crisp Value) por cada modo de falla para severidad

MF	crisp.value.sev
MF01	0.138885435922387
MF02	0.103428681141708
MF03	0.128895061574507
MF04	0.141726857081462
MF05	0.0893265796479591
MF06	0.140961847578937
MF07	0.136167116364018
MF08	0.135201640532615
MF09	0.128895061574507

Nota: Resultados del valor promedio de los números fuzzy para severidad o impacto valorados por los 4 expertos (Crisp Value). Tomado del proceso de cálculo código Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / severidad.m / crispvaluesev.csv

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

105

**Tabla 42** Factores de severidad o consecuencia

Factores de severidad o consecuencia												
Rang o recta	Efec to	Financiero	Operacional	Cumplimient o normativo	Reputacional	Humano	Social	Ambiental	sigl a	Expresión lingüística	Numer o fuzzy	sev eri dad
	1	0,2	0,15	0,2	0,15	0,15	0,05	0,1				
8,9,1	Catastrófico	Perdidas mayores a 11.250 millones	Paro operación 5 días o mas	Cierre definitivo de compañía	Comunicación a nivel internacional	Consecuencias mortales	Pérdidas humanas a nivel social	Daño ambiental irreparable involucra seres vivos	MA	MUY ALTO	(0,8,0,9,1)	10
7,8,9	Mayor	Perdidas entre 3.750 a 11.250 millones	Paro operación 3 entre 4 días	Cierre temporal de compañía	Comunicación a nivel nacional	consecuencias de invalidez perdida extremidades	Consecuencias invalidez a nivel social	Daño ambiental severo reparable	A	ALTO	(0,7,0,8,0,9)	9
5,6,7,8	Levemente mayor	Perdidas entre 1.000 a 3.750 millones	Paro operación 2 entre 3 días	Cierre de proyectos	Comunicación a nivel regional	Incapacidad permanente	Afectación de salud física de la comunidad	Daño ambiental con multas económicas	LA	LEVEMENTE ALTO	(0,5,0,6,0,7,0,8)	7
4,5,6	Modrado	Perdidas entre 500 a 1.000 millones	Paro operación 1 entre 2 días	Sanciones económicas a compañía	Comunicación a nivel redes sociales locales	Incapacidades mayores a 4 meses	Afectación salud mental de la comunidad	Daño ambiental términos de cumplimiento	MA	MEDIO	(0,4,0,5,0,6)	5
2,3,4,5	Levemente bajo	Perdidas entre 100 a 500 millones	Paro operación 8 entre 12 horas	Sanciones económicas a proyectos	Comunicación a nivel gremio	Incapacidades entre 1 <= 4 meses	Afectación temporal de la comunidad	Daño ambiental a nivel comunidad	LB	LEVEMENTE BAJO	(0,2,0,3,0,4,0,5)	4
1,2,3	Bajo	Perdidas entre 30 a 100 millones	Paro operación 4 entre 6 horas	Multas correctivas	Comunicación a nivel proveedores	Incapacidades entre 15 d <= 1 mes	Afectación eventual de la comunidad	Daño ambiental interno compañía	B	BAJO	(0,1,0,2,0,3)	3
0,1,2	Leve	Perdidas entre 5 a 30 millones	Paro operación menor a 2 horas	Aclaraciones antes de control	Comunicación a nivel interno	incapacidades < 15 días	Molestia social leve	Contaminación de sitio	MB	MUY BAJO	(0,0,1,0,2)	2

*Nota:* Factores de severidad o consecuencia alineados a aspectos financieros, operacionales, normativos, reputacional, humano, social y ambiental con sus respectivos pesos en el global de severidad. Tomada de información del departamento de control interno de la empresa en estudio.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 43** *Matriz de criticidad*

Matriz de criticidad								
F/C		Severidad o consecuencia						
		2	3	4	5	7	9	10
Frecuencia	10	20	30	40	50	70	90	100
	9	18	27	36	45	63	81	90
	7	14	21	28	35	49	63	70
	5	10	15	20	25	35	45	50
	4	8	12	16	20	28	36	40
	3	6	9	12	15	21	27	30
	2	4	6	8	10	14	18	20

*Nota:* La matriz de criticidad conforme a su diagrama de calor dará una guía para identificar cuales modos de falla priorizar en los análisis de riesgo.

Los resultados de severidad de los modos de falla con más alta probabilidad de acuerdo al proceso fuzzy son los siguientes:

**Tabla 44** *Resultados severidad de falla en equipos malacate*

MF	Severidad.fuzzy
MF97	9
MF100	9
MF103	4
MF104	5
MF105	4
MF106	7
MF107	4
MF109	4

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

107

MF111	5
MF114	4
MF136	4
MF194	4
MF197	4

Nota: Los resultados de severidad son calculados y asignados después del proceso de defuzzificación y cálculo del crisp value. El código Matlab realiza una asignación numérica de acuerdo al crisp value que corresponda con el fin de ubicar la valoración de severidad en tabla de factores de severidad. Tomada de proceso de cálculo código Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / severidad.m / sevMF.csv

#### ***4.5.4 Resultado número prioridad de riesgo (NPR)***

Para el cálculo final del número de prioridad de riesgo (NPR) se realiza cálculo de severidad ponderada de acuerdo a los pesos dentro del 100% de la severidad y la severidad calculada en el peso anterior. Este número es multiplicado por la probabilidad calculada y se obtienen los siguientes resultados:

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

108

**Tabla 45** Resultado número prioridad de riesgo (NPR)

Código	Modo de falla	Financiero	Normativo	Reputacional	Humano	Social	Ambiental	Operación	Sev-ponderada	Frecuencia	rpn
mf97	mf97eje de salida dispositivo no se frena a una velocidad de caída de 0,95 m/s	9	9	9	9	2	2	9	7.95	9	71.55
mf100	mf100eje de salida dispositivo no frena con una carga de 40 kn	9	9	9	9	2	2	9	7.95	9	71.55
mf107	mf107señal de carga bulonbulon celda de carga desplazado por platina de seguridad faltante	9	9	9	9	2	2	4	7.2	9	64.8
mf109	mf109señal de carga bulonbulon celda de carga reventado por fatiga	9	9	9	9	2	2	4	7.2	9	64.8
mf106	mf106señal de carga bulonbulon celda de carga reventado por sobrecarga	9	9	9	9	2	2	7	7.65	7	53.55
mf149	mf149corona broncecorona no reduce por dientes fracturados	9	9	9	9	2	2	7	7.65	7	53.55
mf194	mf194abrazaderas motores abrazadera floja por falta de apriete	9	9	9	9	2	2	4	7.2	7	50.4
mf104	mf104señal de carga buloncelda de carga no muestra lectura por deterioro interno	9	9	9	7	2	2	5	7.05	7	49.35
mf103	mf103señal de carga buloncelda de carga no muestra lectura o lectura errada por cable roto	9	9	9	7	2	2	4	6.9	7	48.3
mf105	mf105señal de carga buloncelda de carga no bloquea con cargas superiores a 2000 kgs	7	9	9	9	2	2	4	6.8	7	47.6
mf136	mf136bujes freno esferas no ruedan por desgaste	9	3	9	9	2	2	4	6	7	42
mf111	mf111controlador dispositivo de carga no bloquea porque está quemado	7	7	7	7	2	2	5	5.95	7	41.65
mf114	mf114controlador dispositivo de carga no censa por desconfiguración	7	7	7	7	2	2	4	5.8	7	40.6

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

109

---

mf110	mf110controladordispositivo de carga no bloquea, lectura errada por desconfiguración	7	7	7	7	2	2	3	5.65	7	39.55
-------	--	---	---	---	---	---	---	---	------	---	-------

---

Nota: Resultados del número prioridad de riesgo mediante criterios de impacto en la empresa en estudio. Tomada de proceso de cálculo código Matlab 2024b. Ver tabla completa en apéndice B / RPN.m / outputRPMdesc.csv

#### **4.6 Análisis Hazop**

Para motivos de simplificación de este estudio, una vez identificados los resultados de número de prioridad de riesgo (NPR) se procede a analizar aquellos modos de falla que se encuentran en zona semicritica (zona amarilla) y critica (zona roja) del diagrama de calor de la matriz de criticidad, aquellos valores (RPN) superiores a 30. En total se identifican 15 modos de falla a los cuales se considera pertinente realizar análisis Hazop, pues el propósito de este estudio es bajar el nivel de riesgo al mínimo posible de acuerdo al criterio.

En el análisis Hazop se hizo una investigación de cada uno de los riesgos considerando inicialmente el parámetro que afecta el modo de falla, luego procedemos a seleccionar la palabra clave o principal con el fin de identificar que aspecto importante afecta el fallo, la desviación refiere a la función que no cumple dentro del estándar de funcionamiento, en la metodología Hazop recomienda usar la expresión negativa y luego el adjetivo. Procedemos luego a identificar las distintas o posibles causas que pueden activar el modo de fallo o evento no esperado, en este punto es recomendable estar acompañado del personal interdisciplinario para dejar registrada esa lluvia de ideas, así mismo soportar esta argumentación por medio del historial de fallas del equipo, documentación técnica del fabricante o información externa de otros usuarios.

En este análisis también se debe valorar si el modo de falla genera peligro alguno, ya que algunas veces el modo de falla analizado es fácilmente solucionable realizando el cambio de componente de inmediato o representa más pérdidas financieras o de impacto menor que se pueden solucionar con prácticas de mantenimiento preventivas, en cambio otros peligros si representan afectaciones para la integridad de las personas. Otro aspecto a definir son las consecuencias inmediatas den evento inesperado, si al momento de presentarse genera afectación a la persona o

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

111

paro en la operación generando consecuencias adversas en aspectos financieros. Otro tipo de aspecto a identificar es el error, ya que pueden ser de varios tipos tanto del instrumento, como de la persona u operador mismo, también por el diseño del sistema o componente, en ocasiones se podría presentar combinaciones de los errores llamadas también cadenas de errores.

Durante el análisis Hazop también se identifican las salvaguardas o capas de protección si el sistema o equipo ya las tiene, por tanto, en este punto el conocimiento del equipo, así como su principio de funcionamiento es importante poseerlo entre los analistas para determinar estas capas. El siguiente paso es reconocer y definir si el evento en análisis requiere un sistema instrumentado de seguridad o forma parte de uno (SIS), esto implicará desarrollar una valoración en matriz grafica de riesgo para asignar el nivel de capa de protección requerida de acuerdo a estimaciones de probabilidad y severidad. El tipo de SIL entonces es el resultado de la valoración del evento no esperado en matriz grafica de riesgo.

Una vez identificados estos aspectos en el análisis deben escribirse las acciones a realizar, rutas de inspección, controles visuales u otras actividades que ayuden a reducir, eliminar o controlar el evento no esperado, así mismo el responsable de la actividad y fecha estimada del cambio.

# MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 46** Análisis Hazop top 15 modos de falla

ANALISIS HAZOP (HAZard and OPERability study) TOP 15 MODOS DE FALLA																	
Mod o de falla	Nodo asociado (sistema relació+onad o)	RPN (Número de prioridad de riesgo)	Valoración	Parámetro	Palabra Guía	Desviación	Causas	Peligro	Consecuencias	Tipo de error	Tipo salvaguarda	¿Requiere SIF?	Tipo de SIL	Salvaguardas existentes	Recomendaciones	Responsable	Fecha límite
MF97	MF97Eje de salida Dispositivo no se frena a una velocidad de caída de 0,95 m/s	71.55	Crítico	Velocidad	Seguridad	No activa	1. Componente mecánicos internos sin lubricación 2. Falta de inspección interna por fabrica	si	Caída libre de la cabina	Humano / instrumento	redundancia x 3	No	n/a	Redundancia x 3	1. Incluir dentro del plan de mto preventivo la lubricación e integridad física de dispositivo de seguridad 2. Realizar prueba de caída libre según instructivo fabricante (establecer protocolo) 3. Realizar cambio de dispositivo cada 5 años según recomendación del fabricante 4. Realizar búsqueda de proveedor que recertifique este tipo de dispositivos de seguridad	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato
MF100	MF100Eje de salida Dispositivo no frena con una carga de 40 KN	71.55	Crítico	Fuerza	Seguridad	No activa	Dispositivo sin salidas de señal	si	Caída libre de la cabina	Humano / instrumento	redundancia x 3	No	n/a	Redundancia x 3	1. Incluir dentro del plan de mto preventivo la lubricación e integridad física de dispositivo de seguridad 2. Realizar prueba de caída libre según instructivo fabricante (establecer protocolo) 3. Realizar cambio de dispositivo cada 5 años según recomendación del fabricante 4. Realizar búsqueda de proveedor que recertifique este tipo de dispositivos de seguridad	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato
MF107	MF107Señal de carga Bulon celda de carga desplazado por platina de seguridad faltante	64.8	Crítico	integridad	Seguridad	No activa	1. Personal técnico olvidó instalarla 2. Se cae por exceso de vibración 3. Se cae por sobreesfuerzo en pasador	si	Caída libre de la cabina	Instrumento	paracaídas	SI	Evaluar en matriz de riesgo	Paracaídas (safety device)	1. Instalar SIS de alarma sonora en caso de movimiento de bulón y que bloquee movimiento de cabina 2. Realizar procedimiento de control visual en la rutina de inspección técnica sobre la integridad de este elemento	Ing. Juan Camilo Arenas	inmediato
MF109	MF109Señal de carga Bulon celda de carga reventado por fatiga	64.8	Crítico	Esfuerzo	Seguridad	No activa	1. Corrosión 2. Elemento superó los ciclos de vida	si	Caída libre de la cabina	Humano / instrumento	paracaídas	SI	Evaluar en matriz de riesgo	Paracaídas (safety device)	1. Instalar SIS de alarma sonora en caso de movimiento de bulón y que bloquee movimiento de cabina 2. Realizar procedimiento de control visual en la rutina de inspección técnica sobre la integridad de este elemento 3. realizar prueba de ensayo no destructivo en	Ing. Juan Camilo Arenas	inmediato
MF106	MF106Señal de carga Bulon celda de carga reventado por sobrecarga	53.55	Crítico	Esfuerzo	Seguridad	No activa	1.Sobreesfuerzo	si	Caída libre de la cabina	Humano	paracaídas	No	n/a	Paracaídas (safety device)	1. Capacitar al personal de operadores, ingeniero a cargo sobre los límites de carga del equipo 2. Diseñar alertas visuales y ubicarlas en cabina con límite de carga del equipo	Andrés Moreno SISO	inmediato
MF149	MF149Corona bronce Corona no reduce por	53.55	Crítico	Esfuerzo	Transmisión	No se mueve	1. Falta de conocimiento e información técnica del	No	Se frena la cabina	Humano	Control visual /	No	n/a	ninguna	1. Solicitar información técnica de ensamble de reductores a fabricante 2. Establecer procedimiento de ensamble	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato

# MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

	dientes fracturados						ensamble de las coronas 2. perdida de información originalidad de medidas de las coronas 3. Falta de clasificación de ejes sin fin, coronas de los 3 tipos de caja reductoras				análisis aceite				3. Compra de repuestos ya sean originales o fabricados sobre muestra de originales		
MF194	Abrazaderas motores Abrazadera floja por falta de apriete	50.4	Critico	integridad	Transmisión	No sujeta	1. Falta de apriete del elemento 2. mala especificación de tuercas de sujeción 3. mala selección de caucho amortiguador	No	Se frena la cabina	Humano / instrumento	Control visual / Estándar de apriete	No	n/a	ninguna	1. rediseño de abrazadera 2. Selección de caucho 3. Establecer estándar de apriete y revisión 4. Control visual de apriete en plan de mto preventivo	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato
MF104	Señal de carga bulonCelda de carga no muestra lectura por deterioro interno	49.35	Semi-Critico	integridad	Seguridad	No activa	1. Mal almacenamiento de dispositivo durante desmonte de equipo 2. Dispositivo no tiene protección electrónica (fusible) 3. Humedad	No	Equipo sin control de carga digital	Humano / instrumento	Lista de chequeo	No	n/a	Afiche informativo	1. Realizar reposición del dispositivo 2. Realizar instructivo de instalación y operación con personal técnicos 3. Realizar pruebas de calibración de carga en laboratorio certificado periódicamente	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato
MF103	Señal de carga bulonCelda de carga no muestra lectura o lectura errada por cable roto	48.3	Semi-Critico	integridad	Seguridad	No activa	1. mal almacenamiento durante su desinstalación 2. Desconocimiento sobre su importancia (no se repone)	No	Equipo sin control de carga digital	Humano / instrumento	Lista de chequeo	No	n/a	Afiche informativo	1. Realizar reposición del dispositivo 2. Realizar instructivo de instalación y operación con personal técnicos 3. Realizar pruebas de calibración de carga en laboratorio certificado periódicamente	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato
MF105	Señal de carga bulonCelda de carga no bloquea con cargas superiores a 2000 Kgs	47.6	Semi-Critico	Fuerza	Seguridad	No activa	1. Humedad 2. Integridad cableada 3. Fin de vida útil de celda	No	Equipo sin control de carga digital	Humano / instrumento	Lista de chequeo	No	n/a	Afiche informativo	1. Realizar reposición del dispositivo 2. Realizar instructivo de instalación y operación con personal técnicos 3. Realizar pruebas de calibración de carga en laboratorio certificado periódicamente	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato
MF136	bujes freno Esferas no ruedan por desgaste	42	Semi-Critico	Esfuerzo	Freno	No se mueve	1. Falta de lubricación 2. Desgaste de balín (esferas)	Si	Equipo sin freno motor	Humano / instrumento	2 motores con frenos	No	n/a	Redundancia x 2	1. Realizar reposición del dispositivo 2. Realizar instructivo de instalación y operación con personal técnicos 3. Realizar pruebas de calibración de carga en laboratorio certificado periódicamente	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato

**MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN**

MF111	ControladorDispositivo de carga no bloquea porque está quemado	41.65	Semi-Crítico	integridad	Seguridad	No activa	1. Mal almacenamiento de dispositivo durante desmonte de equipo 2. Dispositivo no tiene protección electrónica (fusible) 3. Humedad	No	Equipo sin control de carga digital	Humano / instrumento	Lista de chequeo	No	n/a	Afiche informativo	1. Realizar reposición del dispositivo 2. Realizar instructivo de instalación y operación con personal técnicos 3. Realizar pruebas de calibración de carga en laboratorio certificado periódicamente	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato
MF114	ControladorDispositivo de carga no censa por desconfiguración	40.6	Semi-Crítico	Programación	Seguridad	No activa	1. Desconocimiento técnico 2. Dispositivo no tiene protección (fusible) 3. Fin de vida útil	No	Equipo sin control de carga digital	Humano / instrumento	Lista de chequeo	No	n/a	Afiche informativo	1. Realizar reposición del dispositivo 2. Realizar instructivo de instalación y operación con personal técnicos 3. Realizar pruebas de calibración de carga en laboratorio certificado periódicamente	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato
MF110	ControladorDispositivo de carga no bloquea, lectura errada por desconfiguración	39.55	Semi-Crítico	Programación	Seguridad	No activa	1. Desconocimiento técnico 2. Dispositivo no tiene protección (fusible) 3. Fin de vida útil	No	Equipo sin control de carga digital	Humano / instrumento	Lista de chequeo	No	n/a	Afiche informativo	1. Realizar reposición del dispositivo 2. Realizar instructivo de instalación y operación con personal técnicos 3. Realizar pruebas de calibración de carga en laboratorio certificado periódicamente	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato
MF227	PlataformaPlataforma deformada por sobrecarga	36	Semi-Crítico	Esfuerzo	Estructura	No se mueve	1. Sobrecarga 2. Punto débil de diseño	SI	Caída del personal	Humano / Diseño	ninguna	No	n/a	ninguna	1. realizar rediseño de plataforma 2. Establecer método de cargue con personal de operaciones	Ing. Juan Camilo Arenas	Inmediato

Nota: Desarrollo del análisis Hazop aplicado a los 15 top modos de falla identificados en el análisis de número de prioridad del riesgo (NPR).  
Ver apéndice D / Análisis de peligro Hazop

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

115

Una vez realizado el estudio Hazop fueron identificados 2 eventos no esperados que por su condición de peligro y sus consecuencias requieren una capa de protección adicional con el fin de reducir el riesgo de acuerdo al criterio ALARP (As low as Reasonable Practicable). Estos eventos fueron evaluados según criterios definidos en matriz grafica de riesgo

Una vez realizada la evaluación de los eventos en la matriz grafica de riesgos se asignan los SIL correspondientes y se proponen acciones de mejora con capas de protección que reduzcan significativamente el riesgo (tabla 27).

El resultado del análisis dio como resultado que el modo de falla MF107 y MF109 debe aplicarse una capa de protección SIL3 y SIL4 respectivamente. El MF107 es un evento que en los últimos 2 años se ha presentado en 2 ocasiones en el equipo, por lo tanto, es recomendable realizar rediseño aplicando sistema de sensor inductivo con alarma sonora de tal forma que el operador o el equipo se bloquee al detectar que el pasador y platina que asegura el pasador se mantengan en su sitio y en caso que alarma el equipo sea bloqueado.

Para el MF109 acciones de monitoreo por fatiga son requeridas periódicamente como plan de acción, también programación de cambio periódico de acuerdo a resultado o recomendación de fabricante de los pasadores.

Las actividades de rediseño y monitoreo definidas en el análisis Hazop y asignación de SIL deberán ir incluidas y actualizadas en el plan de mantenimiento actual del equipo, también estos planes deberán ser evaluados nuevamente en la matriz grafica de riesgo con los costos valorativos de la instrumentación calculando el costo-beneficio, si este número es mayor que 1 significa que es razonablemente viable desde el punto de vista financiero como lo indica el criterio ALARP.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

Tabla 47 Matriz grafica de riesgo

MATRIZ DE RIESGO (ASIGNACION SIL PARA FUNCIONES INSTRUMENTADAS DE SEGURIDAD SIF)																						
PARAMETRO SONSECUENCIA		MATRIZ DE RIESGO						PARAMETRO OCUPACIÓN			PARAMETRO PARA EVITARLO				PARAMETRO DEMANDA (SIN SIF)							
		PROBABILIDAD SUM(F+P+W)						Exposición de humanos en zona de peligro.			Probabilidad para evitar el peligro, a pesar que el SIF falle en demanda. Implica facilidades independientes para el apagado, entonces el peligro puede ser evitado o inhabilitado para todas las personas que puedan escapar del área. Condiciones deben ser completas. - Facilidades para alertar al operador que el SIS ha fallado - Tiempo entre alerta de operador y evento peligroso				SIF ESTIMADO EN DEMANDA		W					
															W9	Común	>1/y	9				
NIVEL SEVERIDAD		C	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	NIVEL EXPOSICION			F	W8	Frecuente	1/1-3y	8						
CF	Catastrófico	F	NR	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4	NO	FD	Permanente	1	2	W7	Posible	1/3 - 10y	7						
CE	Mayor	E	NR	NR	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4	FD	Permanente	1	2	W6	Probable	1/10 - 30y	6						
CD	Levemente mayor	D	OK	NR	NR	SIL1	SIL2	SIL3	FC	Frecuente	0,1 - 1	2	W5	Ocasional	1/30 - 100y	5						
CC	Moderado	C	OK	OK	NR	NR	SIL1	SIL2	FC	Frecuente	0,1 - 1	2	W4	Remoto	1/100 - 300y	4						
CB	Levemente bajo	B	OK	OK	OK	NR	NR	SIL1	FB	Ocasional	0,01 - 0,1	1	PB	Las condiciones no son plenamente evitadas		1	W3	Improbable	1/300 - 1000y	3		
CA	Bajo	A	OK	OK	OK	OK	NR	NR	FA	Rara vez	< 0,01	0	PA	Las condiciones son plenamente evitadas		0	W2	Inconcebible	1/10000 - 100000y	2		

Nota: Matriz de asignación de SIL de acuerdo a factores de consecuencia y probabilidad: Tomada de: *Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 1: Framework, definitions, system, hardware and application programming Requirements IEC 61511-1, 2016, (p 75)*

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 48** *Eventos no esperados (modos de falla) para estudio SIL*

ANÁLISIS HAZOP (HAZard and OPerability study) CON REQUERIMIENTO SIL																		
Mo do de falla	Nodo asociado (sistema+relación)	RPN (Número de prioridad de riesgo)	Valoración	Parámetro	Palabra Guía	Deviación	Causas	Peligro	Consecuencias	Tipo de error	Tipo salvaguarda	¿Requiere SIF?	Tipo de SIL	Salvaguardas existentes	Recomendaciones	Responsable	Fecha límite	
MF 107	MF107Señal de carga bulonBulon celda de carga desplazado por platina de seguridad faltante	64.8	Critico	integridad	Seguridad	No activa	1. Personal técnico olvidó instalarla 2. Se cae por exceso de vibración 3. Se cae por sobreesfuerzo en pasador	si	Cáida libre de la cabina	Instrumento	paracaídas	SI	Evaluar en matriz de riesgo	Paracaídas (safety device)	1. Instalar SIS de alarma sonora en caso de movimiento de bulón y que bloquee movimiento de cabina 2. Realizar procedimiento de control visual en la rutina de inspección técnica sobre la integridad de este elemento	Ing. Juan Camilo Arenas	inmediato	
MF 109	MF109Señal de carga bulonBulon celda de carga reventado por fatiga	64.8	Critico	Esfuerzo	Seguridad	No activa	1. Corrosión 2. Elemento superó los ciclos de vida	si	Cáida libre de la cabina	Humano / instrumento	paracaídas	SI	Evaluar en matriz de riesgo	Paracaídas (safety device)	1. Instalar SIS de alarma sonora en caso de movimiento de bulón y que bloquee movimiento de cabina 2. Realizar procedimiento de control visual en la rutina de inspección técnica sobre la integridad de este elemento 3. realizar prueba de ensayo no destructivo en	Ing. Juan Camilo Arenas	inmediato	

*Nota:* Eventos no esperados (modos de falla) identificados para estudio SIL. Actualmente en caso que se presente este evento el peligro latente es caída libre de la cabina.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

**Tabla 49** Evaluación eventos peligrosos en matriz grafica de riesgo

MODO DE FALLA	SI F	EVENTO PELIGROSO	FUNCION INSTRUMENTADA DE SEGURIDAD (SIF)	CONSECUENCIA	INFLUENCIA		DEMANDA	PROBABILIDAD	INTEGRIDAD		PDF (prob falla en demanda)	ACCIONES DE MEJORA (REDISEÑO)
					C	F			P	W		
MF107	1	MF107Señal de carga bulonBulon celda de carga desplazado por platina de seguridad faltante	SIF001 - Nodo de conexión de placa de transmisión y cabina de transporte. Garantizar el buen posicionamiento y monitoreo de elementos de sujeción mecánica que garantizan la unión de los dos sistemas	HUMANAS	F	2	1	4	7	3	0,01 - 0,001	1. Instalación de sistema de monitorización del elemento mediante sensor inductivo con alarma sonora independiente a las capas de protección del equipo. 2. Control visual en plan de inspección del plan de mtto preventivo
				AMBIENTAL	A	2	1	4	7	OK		
				FINANCIERAS	F	2	1	4	7	3		
MF109	3	MF109Señal de carga bulonBulon celda de carga reventado por fatiga	SIF002 - Nodo de conexión de placa de transmisión y cabina de transporte. Garantizar el buen posicionamiento y monitoreo de elementos de sujeción mecánica que garantizan la unión de los dos sistemas	HUMANAS	F	2	1	6	9	4	0,001 - 0,0001	1. Instalación de sistema de monitorización del elemento mediante sensor inductivo con alarma sonora independiente a las capas de protección del equipo. 2. Prueba de ensayo no destructivo en bulones de carga 3. Frecuencia de cambio periódica de bulón de carga con certificación de calidad
				AMBIENTAL	A	2	1	6	9	OK		
				FINANCIERAS	F	2	1	6	9	4		

*Nota:* La evaluación en tabla grafica de riesgo asigna como resultado final un SIL al evento peligroso en estudio, por tanto, los planes de acción deberán ser cuantificados y evaluados según criterio ALARP de modo que sus valores de inversión sean razonables y que efectivamente pueda evaluarse nuevamente en la matriz y se sitúe en los SIL más bajos.

#### **4.7 Actualización de plan de mantenimiento**

Los planes de acción definidos en los análisis Hazop y de asignación de SIL fueron actualizadas en el plan de mantenimiento del equipo malacate. El archivo actualizado se podrá ver en el apéndice E / Plan de Mantenimiento Actualizado.

#### **4.8 Costo del Ciclo de vida (LCC)**

La estimación de los costos del ciclo de vida del equipo malacate va encaminado al análisis que quiere dar respuesta a la empresa sobre la continuidad de operación del equipo. Para abordar este análisis fue necesario realizar una búsqueda de información de costos y beneficios causados en años anteriores, ya que el departamento de mantenimiento no contaba con administración alguna; por tanto, la información una parte se pudo encontrar otra desafortunadamente no. Este tipo de experiencias en la búsqueda de información comúnmente pasa en la industria cuando queremos conocer este tipo de respuestas.

Como objetivo entonces, se desea proyectar los costos y beneficios generados en el ciclo de vida del activo y compararlo con el costo de una nueva inversión. El equipo actual posee una vida reconocida de 10 años en la operación de la constructora, los costos de compra y nacionalización fueron entregados por el departamento de contabilidad, así mismo la información de ingresos por renta del equipo también. El costo por compra de un equipo nuevo fue consultado con la empresa fabricante en china CNBM quienes ofrecen el equipo con las mismas condiciones operativas y de servicio.

Los costos de operación fueron estimados de acuerdo al presupuesto actual, estos valores fueron suministrados por el departamento de compras y almacén de repuestos sobre los valores en los insumos. Como datos de entrada se considera los siguientes valores

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

120

**Tabla 50** *Datos iniciales para análisis del costo de ciclo de vida*

<b>Datos del problema</b>		
	<b>Equipo A</b>	<b>Equipo B</b>
Fabricante	CNBM - China	CNBM - China
Ubicación	NIDO	Nuevo
Código activo	CS-MCT6	n/a
Inversión equipo nuevo (incluye nacionalización y transporte)	153.308.783	243.490.800
Valor TRM (hoy)	4.100	4.100
Fecha adquisición	30/11/2015	
Años vida útil reconocida	10	10
Frecuencia costo de operación	mensual	mensual
Incremento IPC (anual optimista)	4,5%	4,5%
Incremento IPC (anual pesimista)	6,0%	6,0%
Incremento costo de mantenimiento (Anual optimista)	4,5%	4,5%
Incremento costo de mantenimiento (Anual pesimista)	6%	6%
Incremento costo energía (Anual optimista)	2,5%	2,5%
Incremento costo energía (Anual pesimista)	3,5%	3,5%
Incremento costo pólizas de seguro (Anual optimista)	1%	1%
Incremento costo pólizas de seguro (Anual pesimista)	1%	1%
Incremento salario personal (Anual optimista)	8%	8%
Incremento salario personal (Anual pesimista)	12%	12%
Frecuencia de mtto	mensual	mensual
Valor de salvamento libros (del mercado + 4% del valor salvamento)	48.036.757	50.000.000
Años de uso reconocidos	9	0
Operación anual del activo (en meses)	12,0	12,0

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

121

beneficios / Ingresos (mensual)	300.000	300.000
beneficios / Ingresos (anual)	126.000.000	126.000.000
Incremento ingresos (anual %)	0,05	0,05

*Nota:* Datos de entrada para el cálculo de ciclo de vida del activo. Información reunida con información histórica, tasas de incrementos de acuerdo a información histórica. Ver archivo en apéndice F / Análisis costo de vida del activo LCC

Los costos relacionados a las distintas actividades dentro del ciclo de vida del activo contemplan aquellas actividades de mantenimiento, los recursos o insumos que se requieren para que las actividades se realicen, mano de obra del personal de operadores y técnicos de mantenimiento donde se incluyeron todas las prestaciones legales durante 1 año, costos de actividades de parada del equipo e inversiones representativas, los equipos malacates requieren servicios durante su operación de montaje, realce y desmontaje, así mismo actividades de traslado de secciones del mástil, pólizas de aseguramiento, costos de energía eléctrica para su operación, valor de salvamento y análisis de depreciación por 10 años de operación y lo que representa actualmente en libros contables. Para el equipo nuevo fueron contemplados los costos de traslado y nacionalización del equipo y puesto en el taller de mantenimiento.

**Tabla 51** *Costos de importación y nacionalización equipo nuevo*

<b>Costos de importación equipo nuevo</b>	<b>Equipo B</b>
Costo de mercancía (USD)	35.900
Arancel (10%) USD	3.590
IVA (19% sobre costo mercancía + arancel) (USD)	7.503
Derechos de tramite (1% sobre costo de mercancía + arancel) USD	395

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

122

Transporte (según agilidad del envío) China - Colombia	12000
Total, ejercicio	59.388
Costo de mercancía (COP)	147.190.000
Arancel (10%) COP	14.719.000
IVA (19% sobre costo mercancía + arancel) (COP)	30.762.710
Derechos de tramite (1% sobre costo de mercancía + arancel) COP	1.619.090
Transporte (según agilidad del envío) China - Colombia	49.200.000
<b>Total, importación COP (equipo en taller)</b>	<b>243.490.800</b>

*Nota:* Costos de importación estimados con valor de dólar 4.100. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

Los costos de depreciación son aplicados a 10 años de vida útil del equipo malacate

**Tabla 52** *Valores de depreciación del activo*

Análisis de la depreciación	Equipo A	Equipo B
Depreciación anual (lineal)	10.527.203	19.349.080

*Nota:* Valor de depreciación aplicado a 10 años de vida del activo. Los mismos valores son aplicados anualmente que van aplicados a los costos. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 53** *Valores de salvamento fin de vida útil*

Análisis de salvamento	Equipo A	Equipo B
Costo COP	153.308.783	243.490.800
Vida útil (años)	10	10
Depreciación anual COP	10.527.203	19.349.080

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

123

Años depreciados actualmente	10	0
Depreciación acumulada COP	105.272.026	-
<b>Valor de salvamento COP</b>	<b>48.036.757</b>	<b>243.490.800</b>

*Nota:* Los valores de salvamento son aquellos valores que aparecen actualmente contablemente en libros; sin embargo, los valores reales de los activos pueden ser más altos de acuerdo al estado del equipo y obsolescencia. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 54** Costo energía para la operación

<b>Costos (energía)</b>	<b>Equipo A</b>	<b>Equipo B</b>
Tarifa KWH energía	860,33	860,33
Horas promedio día (trabajo equipo)	5,833	
Días laborados x mes	26,0	26,0
Horas promedio mes	151,67	0,00
Consumo energía equipo KW	33	
Costo KWH energía x mes	4.305.952	
<b>Total, costo energía KW x año</b>	<b>51.671.420</b>	

*Nota:* Los costos de energía fueron recopilados de acuerdo a costo de factura de empresas públicas. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 55** Costos mano de obra operador

<b>Costos operador (incluye prestaciones legales)</b>	<b>Equipo A</b>	<b>Equipo B</b>
Numero operadores	1	1
Tarifa hora operador (Incluye prestaciones legales)	11.196,90	11.196,90
Horas promedio día	9,00	9,00
Días laborados x mes	30	30
Horas promedio mes	270,00	270,00
<b>Total, costo operador x mes</b>	<b>3.023.162,39</b>	<b>3.023.162,39</b>

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

124

<b>Total, costo operador x año</b>	<b>36.277.948,64</b>	<b>36.277.948,64</b>
------------------------------------	----------------------	----------------------

*Nota:* Costos mano de obra operador del equipo. Incluye todas las prestaciones legales en el valor hora. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 56** *Costos insumos mantenimiento preventivo por año*

<b>Costos de repuestos mantenimiento preventivo</b>	<b>Equipo A</b>	<b>Equipo B</b>
Costo mantenimiento preventivo (200 horas)	2.725.136	2.725.136

*Nota:* Costos de mantenimiento preventivo cubre el costo de los insumos (no repuestos) de acuerdo a las actividades de inspección del plan. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 57** *Costos repuestos importantes overall*

<b>Costos de repuestos overall</b>	<b>Equipo A</b>	<b>Equipo B</b>
Costo mantenimiento overall pintura y restauración	711.074	711.074
Costo mantenimiento overall (cambio de repuestos críticos cada 5 años)	22.556.096	22.556.096
<b>Total, costo mantenimiento repuestos por año</b>	<b>25.992.306</b>	<b>25.992.306</b>

*Nota:* Costos de mantenimiento overall representan repuestos importantes de cambio cada 5 años como por ejemplo el dispositivo de seguridad. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 58** *Costos mano de obra técnicos de mantenimiento*

<b>Costos mano de obra mantenimiento</b>	<b>Equipo A</b>	<b>Equipo B</b>
Costos MO preventivo (200 horas) x 3 técnicos día	378.000	378.000
Cantidad mttos x año	11	11
Costo MO preventivos x año	4.158.000	4.158.000
Costos MO overall x 3 técnicos x 15 días	5.670.000	5.670.000
<b>Total, costo MO mantenimiento por año</b>	<b>9.828.000</b>	<b>9.828.000</b>

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

125

*Nota:* Costos de técnicos de mantenimiento incluye hora laboral con todas las prestaciones legales. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 59** *Costo de servicios para la operación*

<b>Costos servicios para la operación</b>	<b>Equipo A</b>	<b>Equipo B</b>
Costos MO realce (8 metros - 7 cuerpos)	1.638.144	1.638.144
Cantidad realces por año	7	7
Total costo MO realce por año	11.467.008	11.467.008
Costos MO Montaje (15 metros) x 1 ocasión	3.169.000	3.169.000
Costos MO desmontaje (95 - 100 metros) x 1 ocasión	1.330.000	1.330.000
<b>Total costo MO servicios para la operación por año</b>	<b>15.966.008</b>	<b>15.966.008</b>

*Nota:* servicios para la operación hace referencia a actividades de realce al momento que crece la torre, montaje y desmontaje del equipo. Se requiere personal técnico calificado para hacer estas actividades. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 60** *Costo trasportes logísticos*

<b>Costos transportes logísticos</b>	<b>Equipo A</b>	<b>Equipo B</b>
Costos traslado a obra equipo (llevada)	1.812.500	1.812.500
Costos traslado a obra equipo (traída)	1.812.500	1.812.500
Costos traslado de cuerpos x 7 para realce	450.000	450.000
<b>Total costo transportes logísticos x año</b>	<b>4.075.000</b>	<b>4.075.000</b>

*Nota:* Transportes logísticos relacionados a los movimientos de los cuerpos del mástil, movimientos de cabina al momento de la solicitud y devolución del equipo cuando la obra de construcción termina. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 61** *Costo póliza de aseguramiento anual*

<b>Costos póliza aseguramiento</b>	<b>Equipo A</b>	<b>Equipo B</b>
Costo póliza de aseguramiento (2% del costo de la póliza general)	1.136.620	

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

126

Nota: A la póliza general de los equipos se calcula el peso del valor del equipo respecto al costo general asegurado, este mismo porcentaje se le aplica al valor general de la póliza. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 62** *Costos operacionales y margen anual equipo malacate*

<b>Total costo operación anual</b>	144.947.302,49
<b>Margen anual</b>	- 18.947.302,49

Nota: Sumatoria de los costos operacionales con el margen de rentabilidad anual. El margen anual negativo representa que el equipo no presenta ganancias, sin embargo, como el equipo está en modo de renta, los costos energéticos, mano de obra por servicios de operación representan ganancias para la empresa sumadas al final del ejercicio. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 63** *Tasa oportunidad e impuesto de renta*

<b>Tasa de oportunidad</b>	9%
<b>Impuesto de renta</b>	35%

Nota: tasas tomadas de información financiera de la empresa sobre las cuales esperan retornos. El impuesto de renta aplica para empresas del sector constructor sin beneficios tributarios. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

#### **4.8.1 Cálculos financieros**

Los resultados obtenidos fueron resultados a través de la proyección financiera del presente año como la extensión en la operación del equipo actual en uso por otros 10 años de uso aplicando mejoras restaurativas en su integridad. Fueron calculados los criterios de valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), Valor anual equivalente (VAE) y costo beneficio (C/B) dejando los siguientes resultados.

**Tabla 64** *Resultados financieros equipo A*

<b>Calculo criterio de evaluación equipo A</b>	
Valor Presente Neto (VNA)	216.739.646 \$
Tasa Interna de Retorno (TIR)	68,30%
Valor Anual Equivalente (VAE)	-33.772.391 \$
Análisis costo / beneficio (C/B)	1,21

*Nota:* Resultados financieros en criterios para la inversión de proyecto A. El criterio de costo de ciclo de vida define que el valor presente neto del activo deberá ser positivo y de mayor valor, así mismo la tasa interna de retorno deberá ser mayor que la tasa de oportunidad esperada por los inversionistas, el valor anual equivalente fue descartado del análisis ya que el resultado fue negativo, el resultado del costo beneficio es mayor que uno, por lo tanto, representa ganancias para la empresa. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

**Tabla 65** *Resultados financieros equipo B*

<b>Calculo criterios de evaluación equipo B</b>	
Valor Presente Neto (VNA)	45.833.453 \$
Tasa Interna de Retorno (TIR)	32,85%
Valor Anual Equivalente (VAE)	-7.141.773 \$
Análisis costo / beneficio (C/B)	1,08

*Nota:* Resultados financieros en criterios para la inversión de proyecto B. El criterio de costo de ciclo de vida define que el valor presente neto del activo deberá ser positivo y de mayor valor, así mismo la tasa interna de retorno deberá ser mayor que la tasa de oportunidad esperada por los inversionistas, el valor anual equivalente fue descartado del análisis ya que el resultado fue negativo, el resultado del costo beneficio es mayor que uno, por lo tanto, representa ganancias para la empresa. Ver apéndice F / Análisis costos de vida del activo LCC

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

128

**Tabla 66** *Resultados consolidados y criterios de evaluación de proyectos*

<b>Análisis de resultados y toma de decisiones</b>				
	<b>VPN</b>	<b>TIR</b>	<b>VAE</b>	<b>C/F</b>
<b>Equipo A</b>	216.739.646 \$	68,30%	<del>33.772.391 \$</del>	1,21
<b>Equipo B</b>	45.833.453 \$	32,85%	<del>7.141.773 \$</del>	1,08

Nota: Tabla resumen de los resultados financieros. Ver tablas completas en apéndice R

De acuerdo al criterio de evaluación Valor Presente Neto (VPN) el equipo A representa un equipo que añade valor, ya que el resultado es superior a 0 y comparado con el equipo nuevo representa mayor rentabilidad. Respecto al criterio TIR el equipo A representa una tasa de rentabilidad mayor de la esperada o de oportunidad. Con respecto al equipo nuevo tiene mejor resultado

Respecto al valor anual equivalente ambas propuestas de inversión tienen valores negativos por debajo de cero. Este indicador se ajusta y representa mejor criterio cuando los proyectos tienen distintos periodos de tiempo. Este indicador por efectos de decisión se descarta. Con respecto al criterio costo beneficio el equipo A representa mejor beneficio pues su resultado es mayor que 1 y representa mejor valor que equipo nuevo.

## 5. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos durante el análisis de equipo malacate, se consideran las siguientes conclusiones:

- Es posible obtener datos probabilísticos de falla por año, resultados de factores de consecuencia y probabilidad de ocurrencia y número de prioridad de riesgo (NPR) con la opinión de expertos mediante técnicas lingüísticas fuzzy o lógica difusa, las cuales le son asignadas funciones de membresía asociadas a números fuzzy los cuales transforman esas valoraciones en datos numéricos mediante matriz de comparaciones y asignación de pesos del personal de expertos.
- Durante el análisis FMECA fueron identificados 281 modos de falla del equipo malacate, 8 de ellos se encuentran en la zona semi-crítica y 7 en zona crítica de acuerdo a la valoración y número de prioridad de riesgo (NPR).
- Los resultados de la matriz de criticidad reflejan que los principales elementos con alta valoración en el número de prioridad de riesgo es el dispositivo de seguridad y pasadores o celdas de carga los cuales se encuentran defectuosos electrónicamente en el equipo y no se encuentran operando actualmente, existe una incertidumbre sobre su funcionalidad, por tanto, su número de prioridad de riesgo (NPR) fueron 71,55 para ambos elementos. Es necesario de manera urgente reacondicionar estos componentes en sus condiciones normales de operación.
- Los modos de falla MF97, MF100, MF107, MF109 presentan probabilidad de falla por año del 5.2759% por lo tanto se establecen planes de acción de restitución inmediata de

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

130

componente de seguridad, asignación de tareas de inspección en el plan actual de mantenimiento, darle cumplimiento al cambio de dispositivo de seguridad cada 5 años según indica el fabricante y realizar pruebas de caída libre según fabricante. Para los modos de falla MF105, MF106 y MF136 presentan probabilidades de falla por año de 2.203% los cuales también serán tratados dentro de los planes de acción propuestos en el análisis hazop capacitaciones a operador sobre el límite de carga y alertas visuales y sonoras, así mismo asignadas tareas de monitoreo en el plan actual de mantenimiento. Los modos de falla MF111, MF114 y MF194 tienen como resultado probabilidades de falla anual del 1.97% los cuales también tienen como plan de acción la reposición del dispositivo de carga del equipo, realizar pruebas de calibración cada mes con laboratorio certificado para tal instrumento.

- En el proceso de valoración de riesgo fueron procesados en el proceso Hazop fueron identificados 2 modos de falla (MF107 y MF109) con numero RPN 64,8 para ambos, los cuales a pesar que se realice el cambio del dispositivo de seguridad completo, fueron valoradas posibles situaciones de riesgo de aflojamiento o perdida de elemento de fijación del pasador a raíz de la vibración del equipo, así mismo para MF109 puede presentarse síntomas de fatiga de acuerdo a las cargas aplicadas a estos elementos que en caso de ocurrencia sin ningún nivel de salvaguarda es indetectable para el operador poder identificarlas a tiempo o antes que sucedan.
- En el análisis en matriz grafica de riesgo fueron evaluados 2 modos de falla identificados en Hazop (MF107 y MF109) que durante el análisis de asignación del SIL (capas de protección instrumentada) fueron valorados con SIL 3 y SIL 4, ambos requieren rediseño del sistema. Dentro de los planes de acción para el MF107 con SIL3 se requiere instalación de sistema de

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

131

monitorización del elemento mediante sensor inductivo con alarma sonora independiente a las capas de protección del equipo y un control visual en plan de inspección del plan de mantenimiento preventivo. Para el MF109 valorado con un SIL 4, se define la instalación de sistema de monitorización de los elementos mediante sensor inductivo con alarma sonora independiente a las capas de protección del equipo, prueba de ensayo no destructivo en bulones de carga y frecuencia de cambio periódica de bulón de carga con certificación de calidad.

- Los planes de mantenimiento existentes de la compañía deben ser actualizados teniendo en cuenta resultados de análisis de riesgos; los planes de acción identificados en el análisis Hazop como los planes de acción identificados en matriz grafica de riesgos asignadas al SIL, con el fin de bajar el riesgo de acuerdo al criterio ALARP.
- Respecto al cálculo del costo de ciclo de vida (LCC) fue evaluada la opción de continuar con el equipo, realizar inversiones puntuales y como segunda opción realizar compra de equipo nuevo traído desde China. Al realizar el balance general de costos y beneficios anuales se identifica que el margen anual a nivel compañía en valor de -18'947.302,49 pues el valor de ingreso o beneficio mensual se encuentra aplicado con un valor muy bajo (300.000 valor día incluye operador), respecto lo que ofrece el mercado (450.000 valor día incluye operador).
- Es necesario realizar ajuste de precio para año 2026 de acuerdo a tarifas del mercado para que el margen de ganancias del área o compañía sea positivo.
- El valor presente neto (VPN) del ciclo de vida del malacate muestra que es mayor para el equipo malacate A (equipo actual) con un valor de 216'739.646 respecto al equipo B de

45'833.453, lo cual representa que los flujos de caja tanto de costos y beneficios representan un mayor valor para el equipo A representando mejores ingresos.

- Respecto a la valoración de tasa interna de retorno con respecto a la esperada que está definida en el 9%, los resultados de ciclo de vida muestran una tasa TIR de 68,30% para el equipo A (equipo actual) y de 32,85% para el equipo B (equipo nuevo). Esto nos muestra mejor oportunidad mantener el equipo A en operación realizando las inversiones presupuestadas puntuales.
- El criterio del valor anual equivalente (VAE) fue descartado ya que los resultados para ambos equipos fueron negativos.
- Respecto al criterio de costo-beneficio el equipo A (equipo actual) tuvo un resultado de 1,21 que es superior a 1, lo que quiere decir que cumple el criterio con un valor mayor que el equipo B (equipo nuevo) con resultado de 1,08. Por lo tanto, respecto al criterio costo-beneficio se determina continuar operando el equipo malacate A (equipo actual).
- De acuerdo a los 3 criterios financieros, valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y criterio costo-beneficio (C/F) se determina continuar con la operación del equipo malacate actual (equipo A) desde el punto de vista financiero.
- De acuerdo al criterio ALARP que contempla el criterio financiero desde el punto de vista de riesgo da como resultado costo-beneficio, lo cual determina la continuidad de la operación del equipo aplicando los planes de acción definidos para las capas de protección SIL y también aquellas acciones identificadas en el análisis Hazop.

## 6. Recomendaciones

Se recomienda con el fin de mejorar este estudio de riesgo realizar las siguientes actividades:

- Realizar una charla previa de adecuación con el personal de expertos antes de comenzar a desarrollar las encuestas, ya que al personal hay que ambientarlo sobre la importancia de contestar a conciencia sobre los diferentes cuestionamientos. Esto ayuda que el nivel de confianza en las respuestas sea mejor y que los resultados lingüísticos aplicados sean semejantes mucho más a la realidad.
- Se recomienda culminar el ciclo de vida de seguridad con el diseño conceptual del SIS y establecer las operaciones, mantenimiento y test del SIS diseñado de acuerdo a norma IEC 61511.
- Realizar calculo financiero del criterio ALARP mediante los costos de implementación de la solución del sistema de sensor inductivo alarmado con respecto a los beneficios económicos que la acción trae.
- Se recomienda corregir las advertencias generadas en el código MATLAB para el cálculo del número de prioridad de riesgo (NPR) y probabilidad del evento por año, con el fin de optimizar el recurso matemático del software, así mismo revisar el código en la optimización de ciclos IF.

### Referencias Bibliográficas

- Carmona, J. G. (2012). *Matemáticas Financieras* (Vol. Volumen 1). Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Ecoe Ediciones.
- Cho, C. K. (2009). Basic Study of Smart Robotic Construction Lift for Increasing Resource Lifting Efficiency in High-Rise Building Construction. *2009 Proceedings of the 26th ISARC*, (págs. 266-277). Austin, USA.
- Diez, X. G. (2012). *Sistemas instrumentados de Seguridad*. Barcelona: Universidad Rovira Virgili.
- Faisal I. Khan, M. M. (2003). Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 561–573.
- Faisal I. Khan, M. R. (2004). Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities. *Journal of Hazardous Materials*, 147–159.
- Hans J. Pasman, W. J. (2020). How to treat expert judgment? With certainty it contains uncertainty! *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 6, 8.
- Huang, G.-H. T.-J. (2011). *Multiple attribute decision making : Methods and applications*. New York: CRC Press LLC.
- IEC 31010, E. C. (2019). *Risk management - Risk assessment techniques*. Brussels: CEN-CENELEC.
- IEC 60812, E. C. (2018). *Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)*. Brussels: CEN-CENELEC.
- IEC 60812, E. C. (2018). *Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA) (IEC 60812)*. Brussels: CEN-CENELEC Management Centre.
- IEC 61511-1, E. C. (2016). *Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 1: Framework, definitions, system, hardware and application programming Requirements*. Brussels: CEN-CENELEC.
- IEC 61511-3, E. C. (2016). *Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 3: Guidance for the determination of the*. Brussels: CEN-CENELEC.
- ISO 14224, A. E. (2016). *Industrias del petróleo, petroquímicas y del gas natural Recogida e intercambio de datos de mantenimiento y fiabilidad de los equipos*. Madrid: CEN/CENELEC.
- J. Tixier, G. D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 291–303.

MANTENIMIENTO BASADO EN RIESGO MEDIANTE MÉTODOS  
SEMICUANTITATIVOS APLICADOS A EQUIPOS DE TRANSPORTE VERTICAL EN  
EMPRESAS DE CONSTRUCCIÓN

135

- Lee, J., & Han, C.-H. (2008). A Feasibility Study on Optimal Lifting Planning in the High-rise Apartment Building Construction. *Korean journal of Construction Engineering and Management*, pp.185-193.
- Macías Joven, M. T. (2020). *Guia del gerente Financiero*. Bogotá: ECOE Ediciones.
- Mohammad Yazdi, P. H. (2019). A methodology for enhancing the reliability of expert system applications in probabilistic risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 51-59.
- N.S. Arunraj, J. M. (2006). Risk-based maintenance—Techniques and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 653-661.
- Onisawa, T. (1988). An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. *Fuzzy Sets Syst*, 87–103.
- Plata, D. O. (2021). *Ingenieria de Mantenibilidad y Confiabilidad*. Bogotá: Ortiz Ruiz Consultores.
- The RASE Project, S.-C.-2. E. (2000). *Methodology for the Risk Assessment of Unit Operations and Equipment for Use in Potentially Explosive Atmospheres*. Hamm: EU Project No: SMT4-CT97-2169.
- UNE-EN ISO 15663, A. E. (2021). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Life cycle costing*. Brussels: CEN-CENELEC.
- Yazdi, M. (2017). Hybrid Probabilistic Risk Assessment Using Fuzzy FTA and Fuzzy AHP in a Process Industry. *Springer*, 756–764.
- Yazdi, M. (2018). Improving failure mode and effect analysis (FMEA) with consideration of uncertainty handling as an interactive approach. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 441–458.
- Zadeh, L. (2011). A note on Z-numbers. New York, USA.

## **Apéndices**

**Apéndice B.** Subdivisión taxonómica de equipo malacate – funciones – modos de falla

**Apéndice B.** Matlab 2024b códigos

**Apéndice C.** Link encuestas expertos

**Apéndice D.** Análisis Hazop

**Apéndice E.** Plan de Mantenimiento actualizado

**Apéndice F.** Análisis de costo de vida del activo LCC