



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA THERP PARA EL ESTUDIO DE LA  
CONFIABILIDAD HUMANA EN PROCESOS DE MANTENIMIENTO EN  
EMPRESAS AUTOMOTRICES DE LA CIUDAD DE CUENCA

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: JOSE ANDRES LLANOS JIMENEZ

SANTIAGO NICOLAS VELEZ CAMACHO

TUTOR: ING. CRISTIAN LEONARDO GARCÍA GARCÍA, PhD.

Cuenca - Ecuador

2023

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Jose Andres Llanos Jimenez con documento de identificación N° 0104809751 y Santiago Nicolas Velez Camacho con documento de identificación N° 0105602817; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 3 de julio de 2023

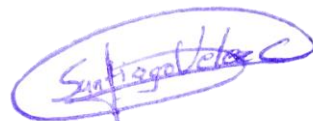
Atentamente,



---

Jose Andres Llanos Jimenez

0104809751



---

Santiago Nicolas Velez Camacho

0105602817

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Jose Andres Llanos Jimenez con documento de identificación N° 0104809751 y Santiago Nicolas Velez Camacho con documento de identificación N° 0105602817, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Aplicación de la metodología Therp para el estudio de la confiabilidad humana en procesos de mantenimiento en empresas automotrices de la ciudad de Cuenca”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 3 de julio de 2023

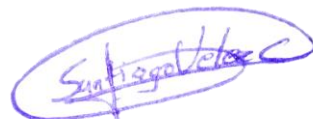
Atentamente,



---

Jose Andres Llanos Jimenez

0104809751



---

Santiago Nicolas Velez Camacho

0105602817

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Cristian Leonardo García García con documento de identificación N° 0103898318, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA THERP PARA EL ESTUDIO DE LA CONFIABILIDAD HUMANA EN PROCESOS DE MANTENIMIENTO EN EMPRESAS AUTOMOTRICES DE LA CIUDAD DE CUENCA, realizado por Jose Andres Llanos Jimenez con documento de identificación N° 0104809751 y por Santiago Nicolas Velez Camacho con documento de identificación N° 0105602817, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 3 de julio de 2023

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a horizontal line across the middle, positioned above a horizontal line.

---

Ing. Cristian Leonardo García García, PhD.

0103898318

## DEDICATORIA

*El presente proyecto de titulación quiero dedicárselo a mis padres; papi Pepe y mami Cecy por apoyarme siempre y sobre todo por estar para mí en cada ocasión desde el día uno en que decidí seguir esta hermosa carrera, siempre han sacrificado mucho y por eso les estaré eternamente agradecido, ellos siempre serán un pilar fundamental en mi vida, ya que ellos me han hecho la persona que soy ahora.*

*Para mi ñaña Andrea, la bebé de la casa, también esto es para ella, me ha soportado y siempre me ha ayudado en lo que he necesitado, siempre ha sido mi compañera fiel.*

*También se la quiero dedicar a mis abuelos, ya que de igual manera fueron un pilar fundamental, apoyándome siempre y animándome cuando lo necesitaba, sobre todo a mi papi Víctor y mami Rosa que siempre me ha estado para mí, y son como unos segundos padres para mí.*

***José Andrés Llanos Jiménez.***

## **DEDICATORIA**

*En el presente escrito quiero dedicar mi trabajo de titulación a mis abuelos, padres y tíos así también a mis amigos más cercanos por siempre apoyarme y animarme a seguir adelante durante esta etapa de mi formación tanto académica como personal, todo el esfuerzo requerido para la realización de este trabajo y durante la formación académica fue duro y quiero agradecerles a ustedes por siempre estar a mi lado apoyándome.*

*Santiago Nicolás Vélez Camacho.*

## AGRADECIMIENTO

*Primero que nada, quiero agradecer a Dios por entregarme las fuerzas necesarias y la constancia para poder culminar un escalón más en mi proceso académico y por poner personas increíbles en mi vida.*

*Nuevamente agradecer a mis padres y hermana por estar siempre en los momentos difíciles e inculcarme el hecho de nunca darme por vencido.*

*A todos mis familiares que estuvieron acompañándome a lo largo de este camino, especialmente mi ñaña Lourdes que siempre ha sido importante en mi vida y me ha apoyado siempre, igual que mi ñaño César, a mi abuelita Rosa que desde el cielo sé que me cuida y me guía, y también a mis hermanos Álvaro y Ñañuco que nunca me han dejado solo.*

*Como no, a mis amigos, los que han estado siempre; Mateo J, Sebas S, Juanjo P, Josu A, Stalin B, Pablo S, también a los que conocí en este proceso y se terminaron volviendo indispensables; Kelly R, Mateo R, Paúl G, Pablo A, Edi J, Sebas W, Pepe M, Daya P, y al resto de mis “reales” que hicieron este camino mucho más llevadero y alegre.*

*Además, agradecer a mi tutor de tesis el ingeniero Cristian por la disponibilidad y entrega al guiarnos y colaborarnos en este importante proceso. Al igual que a mi*

*compañero de tesis que trabajó conjunto conmigo.*

*Y, por último, pero no menos importante al padre Marco, que llegó a mi vida y la cambió en muchos aspectos para bien y por lo cual siempre estaré eternamente agradecido y gracias a ello hoy en día puedo decir que es un gran amigo y mentor.*

***José Andrés Llanos Jiménez.***



## **AGRADECIMIENTO**

*A lo largo de la elaboración de este trabajo siempre existieron dificultades mismas que en conjunto con mi compañero hemos logrado superar juntos por lo cual primero quiero agradecerle a él por su perseverancia en este proceso de aprendizaje.*

*También agradecer a Dios por guiarme en todo momento para cumplir mis objetivos de igual manera a mis compañeros de trabajo y familiares mismos que desde su sabiduría supieron darme consejo para persistir en la elaboración de este trabajo.*

***Santiago Nicolás Vélez Camacho.***

## RESUMEN

Las empresas muchas de las veces no son conscientes de la importancia que tiene el factor de confiabilidad humana dentro de sus procesos, por lo tanto, no consideran ciertos factores claves que pasan desapercibidos y que pueden generar errores graves en la producción o desarrollo de las distintas actividades dentro de sus talleres.

Inicialmente se realiza una investigación del estado del arte sobre como la confiabilidad humana puede medirse o predecirse gracias al uso de varias metodologías creadas con fines nucleares, pero que gracias a la evolución y conciencia de error humano se han podido ampliar a más campos de trabajo y estudio. Concluyendo así que la mejor metodología para predecir la probabilidad de error humano es la THERP.

Luego, se lleva a cabo la aplicación de la metodología escogida, iniciando con realizar un reconocimiento de la empresa, en dónde se definen las unidades sobre las cuales se realizan los procesos de mantenimiento, esto con la finalidad de saber y medir la confiabilidad de las máquinas, con esto se tiene una visión clara de en que condiciones se encuentran las unidades que llegan a recibir los servicios de mantenimiento por parte de los técnicos, definiendo que unidades se consideran criticas para trabajar.

Posterior a esto se procede a evaluar la criticidad de las actividades que pueden tener estas unidades, evaluándolas según las veces que son sometidas a las actividades de mantenimiento, el tiempo de parada que corresponde a esas actividades, el coste que representan y la seguridad que cada actividad pueda tener. Luego se evalúan las subactividades que involucran a las actividades más críticas y se las categoriza según el tipo de error que puedan tener.

Una vez categorizadas las subactividades se las somete al árbol de eventos que es la herramienta fundamental para cuantificar el error humano, a continuación, se procede a calcular la probabilidad de error humano según el árbol de eventos y con esto tener un valor nominal de error, a esto se lo multiplica por un valor que es dado gracias a conocer la experiencia y condiciones de trabajo que tienen los mecánicos.

Finalmente se evalúan los procesos críticos y se dan recomendaciones que podrían ayudar a aminorar los factores que provocan el error humano dentro de la empresa.

**Palabras clave:** *Confiabilidad humana, Confiabilidad operacional, Criticidad, Riesgo.*

## ABSTRACT

Companies are often not aware of the importance of the human reliability factor within their processes; therefore, they do not consider certain key factors that go unnoticed and that can generate serious errors in the production or development of the different activities within their workshops.

Initially an investigation of the state of the art on how human reliability can be measured or predicted through the use of various methodologies created for nuclear purposes, but thanks to the evolution and awareness of human error have been able to expand to more fields of work and study. Thus, concluding that the best methodology to predict the probability of human error is the THERP.

Then, the application of the chosen methodology is carried out, starting with a recognition of the company, where the units on which the maintenance processes are performed are defined, this in order to know and measure the reliability of the machines, with this we have a clear view of the condition of the units that come to receive maintenance services by technicians, defining which units are considered critical to work.

After this, the criticality of the activities that these units may have is evaluated, assessing them according to the number of times they are subjected to maintenance activities, the downtime corresponding to these activities, the cost they represent and the safety that each activity may have. Sub-activities involving the most critical activities are then evaluated and categorized according to the type of error they may have.

Once the sub-activities are categorized, they are subjected to the event tree, which is the fundamental tool to quantify human error, then, the probability of human error is calculated according to the event tree and with this to have a nominal value of error, this is multiplied by a value that is given thanks to the experience and working conditions that the mechanics have.

Finally, the critical processes are evaluated and recommendations are given that could help to reduce the factors that cause human error within the company.

**Key words:** *Human reliability, Operational reliability, Criticality, Risk.*

## ÍNDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>5</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>7</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>10</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>11</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>2. PROBLEMA.....</b>	<b>17</b>
2.1. Antecedentes .....	17
2.2. Importancia y Alcances.....	17
2.3. Delimitación.....	18
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
3.1. Objetivo General.....	19
3.2. Objetivos Específicos.....	19
<b>4. CAPÍTULO 1: CONFIABILIDAD HUMANA .....</b>	<b>20</b>
4.1. Antecedentes investigativos .....	20
4.2. Marco Teórico.....	22
4.2.1. Definición de Confiabilidad y Mantenimiento .....	22
4.2.2. Confiabilidad del equipo .....	24
4.2.3. Confiabilidad humana .....	27
4.2.4. Error humano.....	28
4.2.4.1. Tipos de errores .....	30
4.2.4.2. Clasificación de los errores humanos .....	30
4.2.5. Metodologías de mayor uso potencial para evaluar el error humano.....	31

4.2.6 Justificación para aplicar el método THERP .....	35
4.2.7 Originalidad del proyecto .....	38
<b>5. CAPÍTULO 2: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA THERP .....</b>	<b>40</b>
5.1. Metodología Therp .....	40
5.1.1. Proceso de aplicación .....	41
5.2. Aplicación de la metodología .....	45
5.2.1. Paso 1.....	45
5.2.2. Paso 2.....	47
5.2.3. Paso 3.....	57
5.2.4. Paso 4.....	58
5.2.5. Paso 5.....	62
5.2.6. Paso 6.....	64
5.2.7. Paso 7.....	75
5.2.8. Paso 8.....	80
<b>6. CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE PROCESOS CRÍTICOS EN ACTIVIDADES DE MANTEMIMIENTO .....</b>	<b>84</b>
6.1. Diagramas UML.....	84
6.2. Aplicación de los diagramas UML a las actividades críticas. ....	84
6.2.1. Cambio del disco de embrague.....	84
6.2.2. Cambio de discos de freno.....	86
6.2.3. Cambio de pastillas de freno. ....	88
6.2.4. Overhaul .....	89
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>8. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>94</b>

**Índice de ilustraciones.**

<b>Ilustración 1</b> Mapa de delimitación del proyecto.....	18
<b>Ilustración 2</b> Árbol de eventos convencional.....	43
<b>Ilustración 3</b> Diagrama de flujo del procedimiento Therp.....	45
<b>Ilustración 4</b> Subactividades del cambio de discos de embrague .....	62
<b>Ilustración 5</b> Subactividades del cambio de discos de freno delanteros. ....	63
<b>Ilustración 6</b> Subactividades del cambio de pastillas de freno.....	63
<b>Ilustración 7</b> Subactividades del overhaul. ....	64
<b>Ilustración 8</b> Tipos de errores aplicados en la metodología.....	64
<b>Ilustración 9</b> Valores de probabilidad según el tipo de error .....	76
<b>Ilustración 10</b> Árbol de eventos de manera secuencial.....	76
<b>Ilustración 11</b> Estimación según el nivel de estrés. ....	81
<b>Ilustración 12</b> Diagrama UML cambio de disco de embrague. ....	85
<b>Ilustración 13</b> Diagrama UML cambio de discos de freno. ....	87
<b>Ilustración 14</b> Diagrama UML cambio de pastillas de freno.....	89
<b>Ilustración 15</b> Diagrama UML overhaul.....	90

**Índice de tablas.**

<b>Tabla 1</b> Comparativa de las distintas técnicas de evaluación de error humano.....	35
<b>Tabla 2</b> Características de las unidades móviles de la empresa.....	46
<b>Tabla 3</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 179 .....	49
<b>Tabla 4</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 180 .....	50
<b>Tabla 5</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 181 .....	50
<b>Tabla 6</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 182 .....	51
<b>Tabla 7</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 183 .....	51
<b>Tabla 8</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 184 .....	52
<b>Tabla 9</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 185 .....	52
<b>Tabla 10</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 186 .....	53
<b>Tabla 11</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 187 .....	53
<b>Tabla 12</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 188 .....	54

<b>Tabla 13</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 189 .....	54
<b>Tabla 14</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 190 .....	55
<b>Tabla 15</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 191 .....	55
<b>Tabla 16</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 192 .....	56
<b>Tabla 17</b> Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 193 .....	56
<b>Tabla 18</b> Cuadro de criticidad de las unidades .....	57
<b>Tabla 19</b> Gravedad según la repercusión en el cliente/usuario.....	58
<b>Tabla 20</b> Clasificación según la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo. ....	58
<b>Tabla 21</b> Clasificación de la facilidad con la que se puede detectar un fallo. ....	59
<b>Tabla 22</b> Matriz de criticidad de la unidad 179 .....	59
<b>Tabla 23</b> Matriz de criticidad de la unidad 180 .....	60
<b>Tabla 24</b> Matriz de criticidad de la unidad 181 .....	60
<b>Tabla 25</b> Matriz de criticidad de la unidad 184 .....	60
<b>Tabla 26</b> Matriz de criticidad de la unidad 189 .....	61
<b>Tabla 27</b> Matriz de criticidad de la unidad 190 .....	61
<b>Tabla 28</b> Matriz de criticidad de la unidad 192 .....	61
<b>Tabla 29</b> Tipo de error para las subtareas del cambio de discos de embrague.....	65
<b>Tabla 30</b> Tipo de error para las subtareas del cambio de discos de freno delanteros. ....	66
<b>Tabla 31</b> Tipo de error para las subtareas del cambio de pastillas de freno. ....	69
<b>Tabla 32</b> Tipo de error para las subtareas del overhaul. ....	70
<b>Tabla 33</b> Cálculo de incertidumbres del cambio de disco de embrague.....	77
<b>Tabla 34</b> Cálculo de incertidumbres del cambio de disco de frenos delanteros. ....	78
<b>Tabla 35</b> Cálculo de incertidumbres del cambio de pastillas de freno. ....	78
<b>Tabla 36</b> Cálculo de incertidumbres del overhaul. ....	79
<b>Tabla 37</b> Experiencia de los técnicos de la empresa automotriz. ....	81
<b>Tabla 38</b> Resultados de la probabilidad de error humano para cada actividad crítica. ..	82
<b>Tabla 39</b> Resultados de la probabilidad según el límite superior de error humano para cada actividad crítica. ....	83
<b>Tabla 40</b> Resultados de la probabilidad según el límite inferior de error humano para cada actividad crítica.....	83

## 1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento efectivo que realizan técnicos y empresas se ha convertido en un factor crítico, dado que en la actualidad la dependencia de la tecnología ha hecho que el ser humano busque constantemente evolucionar e implementar herramientas para el monitoreo, pero no se ha enfocado en la fiabilidad que la persona puede ofrecer y que es un componente esencial en los procesos.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la confiabilidad humana dentro de los procesos de mantenimiento, así como profundizar en su importancia dentro de la industria, especialmente en el sector automotriz, explorando las fortalezas y los desafíos que ofrecen. Se analizarán todos los factores que influyen en la confiabilidad, tanto la de las personas como puede ser la capacitación, los problemas como estrés o fatiga, así como la confiabilidad de las máquinas a las cuales se les aplica los procesos de mantenimiento.

Con la ayuda de la investigación sobre que metodologías implementar en algo tan subjetivo como lo es evaluar la confiabilidad humana se procederá a cuantificar la probabilidad de error humano que se puede llegar a tener dentro de la empresa, buscando la que mejor se pueda adaptar al campo automotriz teniendo en cuenta que muy pocos estudios se realizan en esta área y que la iniciativa para evaluar estos rubros nació con la finalidad de aplicación nuclear.

Se presentarán resultados acerca de la confiabilidad de las máquinas sobre las cuales se operan para tener una visión más general de en qué situación están, ya que no toda la responsabilidad de un error radica directamente en el técnico especializado, sino también en el estado de la unidad al momento en el que se le va a realizar un trabajo.

Además, se busca dar enfoques y estrategias para aminorar la probabilidad de error humano dentro de los procesos críticos que se diagnostiquen, siendo esto clave para que se pueda proponer futuras soluciones o propuestas de seguimiento para que sean evaluados en otro momento y comparar si los resultados de criticidad y probabilidad de error humano disminuyeron o aumentaron.



## **2. PROBLEMA**

El factor humano dentro del desarrollo de procesos industriales, ha condicionado su resultado debido a los posibles errores que se pueden llegar a cometer, el análisis de su causa y origen es indispensable para el tratamiento del trabajador, debido a que esto pone en juego el conocimiento de la persona sobre la tarea. Para el estudio de la influencia del factor humano se utilizan metodologías como AMFE y THERP debido a que las mismas ayudan a minimizar el tiempo y el coste en cuanto al desarrollo y análisis de los potenciales fallos que pueden llegar a tener en un proceso de mantenimiento o reparación.

En Cuenca, el sector automotriz tiene múltiples servicios, tales como: importación de vehículos de carga pesada y maquinaria, comercialización de repuestos y reparación de sistemas en general. Por lo que, el problema radica en que al manejar un amplio catálogo de marcas el factor de error humano aumenta y deriva en diferentes consecuencias como retrasos en el proceso productivo del taller generando paradas imprevistas de la maquinaria y tracto camiones y como consecuencia atrasos en la entrega de vehículos a los clientes. Por ello, el estudio de la confiabilidad humana en procesos de mantenimiento, permite mantener los índices de eficiencia y eficacia de los operadores evitando cometer errores ligados al conocimiento de la actividad (Rojas, 2019)

### **2.1. Antecedentes**

La aplicación del mantenimiento en equipos, máquinas y flotas de transporte es fundamental para garantizar el buen funcionamiento de los mismos, por tal razón, existen procesos para asegurar que el mantenimiento de estos sea realizado de la manera más adecuada y correcta. Dentro del proceso de mantenibilidad existe la probabilidad de que el técnico responsable cometa un error que afecte el funcionamiento de la máquina lo cual conlleva gastos y paradas innecesarias del mismo, este error puede ser evaluado y cuantificado con varios métodos.

Los métodos ocupados para el estudio y evaluación del error humano muchas veces son subjetivos de acuerdo al criterio de un experto, pero sus normas básicas y sus pilares fundamentales son normados con el fin de garantizar resultados.

### **2.2. Importancia y Alcances**

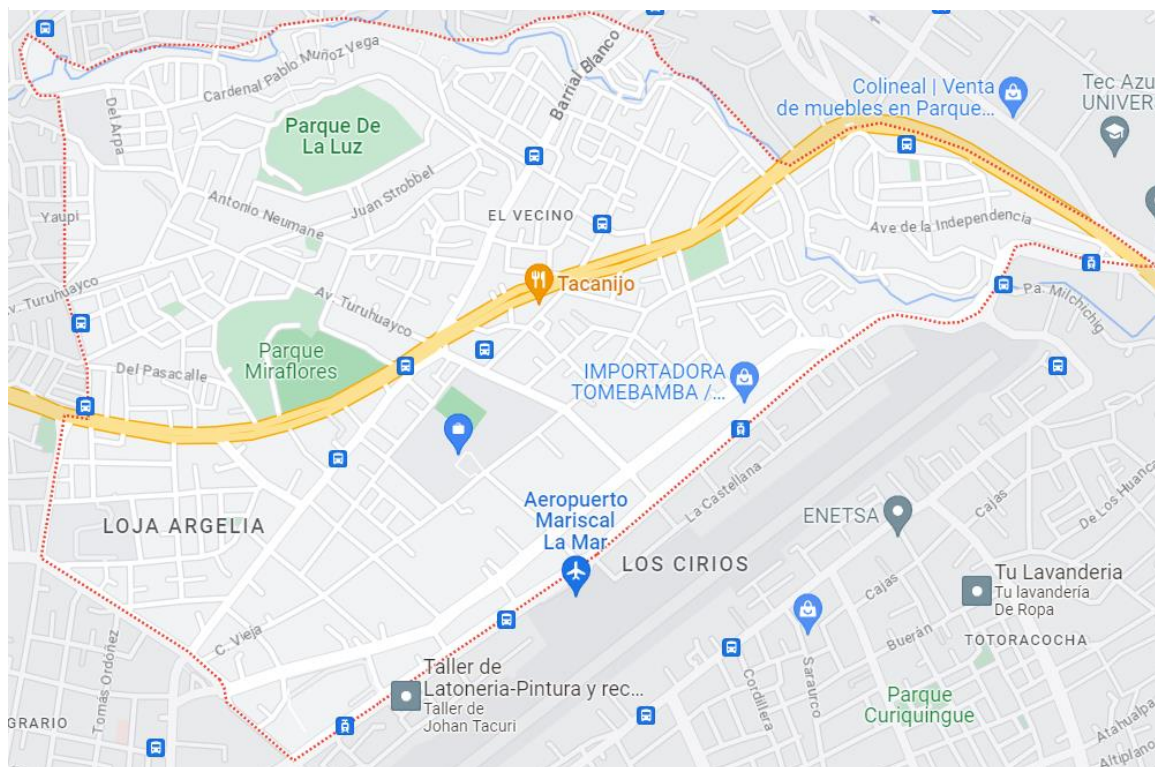
Tener una flota de vehículos implica muchas responsabilidades, entre ellas el mantener las unidades en óptimas condiciones de funcionamiento, el parar unidades por un mantenimiento y que este se vea retrasado por percances típicos dentro del taller llega a

afectar al propietario, así como al propio taller. Para evitar este tipo de situaciones se propone la aplicación de la metodología THERP y la metodología AMFE, para obtener un análisis estadístico preciso que logre predecir y minimizar el error humano en el mantenimiento, así también debido a la carencia del análisis del factor humano en la mayoría de empresas y la importancia que esta tiene dentro de los procesos se busca crear una base de datos que sea útil para realizar procesos correctos de mantenimiento y sirva como estudio para capacitar de manera eficaz a técnicos y operadores.

### 2.3. Delimitación

El proyecto se llevará a cabo en talleres automotrices en específico en uno centrado en la zona del barrio El Vecino de la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, el cuál lleva años funcionando y no ha evaluado la confiabilidad que requieren sus actividades diarias.

**Ilustración 1** Mapa de delimitación del proyecto



Nota. La zona se delimita con la línea entre puntada de color rojo.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

- Evaluar la confiabilidad humana dentro de los procesos de mantenimiento de empresas automotrices de la ciudad de Cuenca mediante la metodología THERP, con la finalidad de incrementar el nivel de fiabilidad de sus mantenimientos.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar el estado del arte de la influencia del factor humano en procesos de mantenimiento de las empresas mediante revisiones bibliográficas para la obtención de datos y modelos referenciales.
- Aplicar la metodología THERP con la finalidad de recolectar datos para el proceso de estimación del error humano por medio de la metodología AMFE.
- Crear una base de datos en base a los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las metodologías AMFE Y THERP.

## 4. CAPÍTULO 1: CONFIABILIDAD HUMANA

### 4.1. Antecedentes investigativos

En la conferencia los autores (Ruisi et al., 2023) hablan acerca de la introducción de las metodologías THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) y CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) utilizando la metodología THERP como base, aplicando el método de árbol de eventos para cuantificar y cualificar las acciones y determinar la probabilidad del error al momento de cumplir con sus labores dentro del control del tráfico aéreo.

La aplicación de la metodología THERP depende en gran parte de los datos que de manera previa fueron recolectados al momento de aplicar la metodología THERP, la aplicación de estas dos metodologías en conjunto ayuda que el estudio sea más preciso y tenga un margen de error más estrecho al momento de concluir el estudio del error humano.

La metodología CREAM evalúa a los controladores de tráfico aéreo comparándolos entre si sometiéndolos a las mismas acciones calificando las decisiones tomadas generando de esta manera una forma de predecir la falla del personal de control.

La aplicación tanto de la metodología THERP como de la metodología CREAM logran predecir con alta precisión la probabilidad de falla dentro de una cabina de control de aviación.

Los autores (Atushi et al., 2015) muestran la finalidad de su estudio que es el análisis del error humano dentro de los accidentes marítimos utilizando varias metodologías entre las cuales se encuentra la metodología THERP, la metodología de análisis de confiabilidad humana HRA (human reliability analysis), metodologías que en el estudio son de suma importancia para lograr identificar, cuantificar y cualificar los tipos de errores para después enlistarlos y ordenarlos según sea su importancia; entiéndase de menor importancia a mayor importancia. En el proceso de aplicación de la metodología THERP es necesario el uso del árbol de eventos para desarrollar la metodología adecuada.

EL desarrollo del árbol de eventos se realiza en base a los datos obtenidos por la metodología HRA, este árbol evalúa de manera cuantitativa las acciones de los operarios y a través de esta herramienta de análisis se obtiene las probabilidades de falla mismas que se obtienen a través de la aplicación de la metodología THERP.

(Abdelmoula et al., 2017) en su conferencia sobre los errores humanos en una operación marítima son la principal causante de accidentes marinos al momento de realizar una operación de alto riesgo.

Tratan sobre la implementación de la tecnología en buques de carga, así como en buques recreativos puede ayudar a disminuir el porcentaje de riesgo en esta clase de operaciones sin embargo el factor de error humano en el mantenimiento aumenta con la implementación de tecnología, en el mantenimiento marítimo existen varios factores de riesgo que pueden llevar desastrosas consecuencias si se realiza de una manera incorrecta.

Para evaluar el error humano en esta clase de mantenimiento en la conferencia se habla sobre aplicar dos metodologías mismas que son la THERP y la HRA. La metodología HRA ayuda a identificar las vulnerabilidades en un proceso de mantenimiento centrado en las tareas técnicas que un técnico deberá cumplir mientras que la metodología THERP se centra en la predicción de la tasa de error humano.

La metodología THERP ayuda en la cuantificación de la probabilidad del error humano y en la predicción de errores, para disminuir el error humano uno de los pilares fundamentales es la capacitación del personal de mantenimiento, esto garantiza una reducción del error humano en sus tareas mientras el buque se encuentra anclado.

En el trabajo de (Kirimoto et al., 2021) se emplean la metodología HRA, la metodología HEP y la metodología THERP para evaluar la confiabilidad y el error humano en equipos portátiles usados dentro de la industria.

El análisis de la fiabilidad humana lo realiza mediante la metodología HRA, mientras que la estimación del error humano se realiza mediante la metodología HEP (Human Error Probability) y por último la metodología THERP para la operación de las actividades de mantenimiento de los equipos, la operación y trabajo, así como el lugar donde se encuentra el equipo portátil y para recopilar información acerca del tiempo de operación del equipo, y la ubicación de este.

## **4.2. Marco Teórico**

### **4.2.1. Definición de Confiabilidad y Mantenimiento**

El término confiabilidad es un derivado de la palabra fiabilidad que proviene del latín fides el mismo que se puede traducir al castellano como fe, confianza o lealtad por lo tanto se podría entender el término de confiabilidad como la confianza en un objeto, máquina o persona para cumplir una acción actividad u objetivo propuesto por terceros.

La confiabilidad según la RAE (Real Academia Española) proviene del término fiabilidad, término que define la probabilidad de que algo funcione bien, no falle y se mantenga en estado óptimo de funcionamiento a corto y largo plazo.

El mantenimiento se puede definir de diversas maneras; según la Real Academia Española el mantenimiento se puede tomar como un conjunto de acciones y cuidados que son necesarios para que maquinaria industrial, automotriz, instalaciones o edificios tengan un funcionamiento adecuado y una larga vida útil.

Hoy la importancia del mantenimiento en el ámbito tanto industrial como automotriz y en el campo de la producción es prioritaria debido a que al realizar un mantenimiento adecuado el bienestar del equipo se maximiza obteniendo así mayores prestaciones por parte del mismo ayudándolo así a extender su vida útil.

En general, en empresas que cuentan con maquinaria industrial, así como en el área de transporte o maquinaria minera los costos de mantenimiento son del 15% al 30% de manufactura por lo que el mismo se vuelve una parte prioritaria y de suma importancia dentro de las empresas así pues se busca tener un mantenimiento programado para optimizar recursos y mano de obra.

Dentro del mantenimiento se encuentran dos tipos de manera primordial, mismos que son denominados mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo. El mantenimiento preventivo como su nombre lo indica es un mantenimiento que se realiza para prevenir fallos en la máquina o equipo dentro de este se realiza una inspección visual para corroborar que todos los sistemas se encuentran operando dentro de los rangos normales de funcionamiento así como un cambio de fluidos en caso de tenerlos para evitar la degradación excesiva del líquido y que por esta situación proceda un fallo de la máquina y por ende en una reducción de su confiabilidad y su vida útil.

Dentro del campo automotriz la importancia del mantenimiento radica en que un vehículo con un apropiado chequeo es más seguro y más confiable para los ocupantes. Así también un vehículo que se mantenga en estado óptimo supone un ahorro de combustible sustancial para el propietario, así como una conducción más segura y confortable. (Anonymous, 2008)

Para que el mantenimiento sea adecuado es importante recalcar que se deben realizar en servicios autorizados por los fabricantes de dicho equipo tanto para realizar mantenimientos preventivos como para realizar los mantenimientos correctivos.

Por lo tanto, el mantenimiento dentro del sector industrial y productivo, así como dentro del ámbito automotriz y en el transporte se define cómo las actividades u acciones en las que un técnico o mecánico realiza actividades para que un equipo, máquina se mantengan en un estado óptimo de funcionamiento.

Unificando los dos términos la confiabilidad y el mantenimiento van de la mano porque para que un equipo sea confiable se requiere de cierto cuidado para que a su vez mantenga óptimas condiciones a lo largo de su vida útil.

Existen dos consideraciones dentro del concepto de confiabilidad, la del ser humano y la de los equipos que son usados por el hombre; en breves rasgos la confiabilidad del equipo busca analizar qué tan fiable puede ser una máquina, así como la probabilidad de que llegue a fallar en un periodo de tiempo medido; mientras que la confiabilidad humana busca saber qué tan confiable es un técnico o mecánico al momento de realizar el mantenimiento dentro de un sistema de producción.

La confiabilidad humana es un término que no se centra solo en el mantenimiento pues también puede extenderse a otros hombritos dentro del campo de producción como los operarios.

Hoy en día el factor mantenimiento es clave para que un sistema operativo de un equipo se encuentre dentro de los mejores estándares industriales, además el cuidado de las máquinas ha pasado de ser una concepción reactiva a una forma de concepción proactiva.

En este punto entra en vigor un término clave dentro del análisis denominado confiabilidad operacional. El análisis de la confiabilidad operacional se realiza dentro de las empresas a modo de economizar y evaluar a los operarios dentro del campo de su

competencia. La evaluación de la confiabilidad operacional toma en cuenta tres factores para su evaluación mismos que son; la acción sinérgica entre el equipo, el recurso humano y el proceso tecnológico. (Concepción et al., 2021)

La confiabilidad operacional se puede definir como la capacidad de un sistema, equipo, tecnología, persona o grupo de personas para cumplir con una actividad u objetivo planteado o establecido.

El análisis de la confiabilidad operacional busca analizar el equilibrio entre el hombre y la máquina que este opera, así como las fallas posibles de la maquinaria por culpa del operador. Ejemplificando, en la operación de un tracto camión de transporte de carga la confiabilidad operacional a evaluar es el recorrido del vehículo, así como el consumo de combustible para determinar la rentabilidad neta del vehículo al finalizar la labor para la cual fue diseñado. (Arata, 2009)

#### **4.2.2. Confiabilidad del equipo**

La confiabilidad del equipo es la clave dentro de la industria para lograr una competitividad controlada y continua con respecto a otras empresas, dentro de un campo productivo es imprescindible que todos los equipos del sistema de producción mantengan una alta disponibilidad y un ciclo de vida prolongado. (Bethesda, 2021)

Para que los equipos mantengan una ventaja competitiva es necesario la implementación de estrategias o tácticas que ayuden a mejorar la confiabilidad del equipo, estas estrategias se logran a través de la planificación propia del mantenimiento de los equipos aprovechando así las ventajas que estos ofrecen, aumentando la vida útil del equipo y prolongando su tiempo de uso, así como su ciclo de vida.

El estudio principal que se realiza sobre la confiabilidad del equipo es el riesgo y la probabilidad de que éste llegue a fallar y a su vez interrumpa un proceso de producción, otro punto de análisis que se estudia es la disponibilidad del mismo, tal como verificar que el equipo cumpla con el propósito para el cual fue diseñado y fabricado, optimizando sus costos operativos y maximizando su tiempo de operación. (Campoverde, 2012)

Las tácticas y estrategias que tomen los propietarios de los equipos ayudarán a maximizar o en su defecto minimizar la vida útil del equipo y estas a su vez harán que el equipo cumpla con su misión o no la desarrolle de manera adecuada. Estas estrategias



pueden aumentar o disminuir la confiabilidad que pueda llegar a tener el equipo a lo largo de su vida útil.

Las estrategias de confiabilidad y mantenimiento se desarrollan con la única finalidad de reducir el impacto de falla de un equipo logrando de esta manera aumentar su confiabilidad.

La confiabilidad del equipo se puede describir como la toma de acciones organizadas para prever la falta de fiabilidad y la anticipación de problemas que el equipo pueda llegar a tener para que de esta manera el sistema pueda aumentar su productividad, disminuir su tiempo sin producir, aumentar su confiabilidad y maximizar de esta manera su vida útil. (Galiano & Bermejo, 2008)

Un equipo confiable se define como aquel equipo que tiene una alta probabilidad de lograr su cometido sin generar fallos, ni retrasos en el proceso de producción optimizando tantos recursos económicos como humanos disminuyendo la mano de obra requerida para completar dicho proceso de producción.

De igual manera un equipo poco confiable se definiría como aquel que retrasa procesos de producción además genera fallos recurrentes y consumen más recursos de los necesarios para completar un proceso de producción. Es importante recalcar que la fiabilidad del equipo disminuye con el paso del tiempo pues todo equipo se ve sometido a estrés de diferentes maneras.

Existen factores que influyen para que un equipo reduzca su confiabilidad a temprana edad los cuales pueden ser; la temperatura a la cual se encuentra operando, la humedad del ambiente en el que este se encuentra funcionando, la vibración que puede producirse al momento de trabajar así como el impacto que pueda recibir el equipo al momento de funcionar.

Inclusive una mala utilización o una mala acción del operario, puede llegar a perjudicar de manera grave al equipo, la marca o el diseño puede llegar a influir. En otras palabras, se puede entender que la confiabilidad de un equipo depende de muchos factores externos y que rodean al mecanismo, así como del trato que se le dé a la máquina.

Un equipo completo mecánico puede sufrir una reducción en la confiabilidad por factores como impacto, vibración, temperatura, cosas que no afectarían a un equipo

electrónico por lo tanto la confiabilidad del equipo puede reducirse debido a factores que dependerán del tipo de equipo analizado (Xian et al., 2011).

Hay que tomar en consideración que la exposición continua a estos factores logra disminuir la confiabilidad del equipo lo que provoca una reducción considerable en su fiabilidad por consiguiente es casi imposible predecir cuándo un equipo va a estar expuesto a estas condiciones, sin embargo, sí se puede tomar precauciones para evitar que un equipo entre en contacto con condiciones que disminuyan su vida útil y su credibilidad operacional, así como su disponibilidad.

El estrés del equipo es algo inevitable también considerado como desgaste natural de los componentes al cumplir la actividad para la cual fue creado, el estrés está considerado dentro de lo que es la vida útil del equipo por lo tanto con un buen acondicionamiento, un correcto cuidado al momento de operarlo, así como evitar los factores antes mencionado ayudarán a que no decrezca la vida funcional nominal del equipo.

Para preservar la vida nominal del equipo es común encontrar diversos tipos de “trampas” de seguridad que ayuden a preservar de mejor manera la maquinaria con el fin de que una sobrecarga de tensión coma una sobrecarga hidráulica o una falla mecánica dañe por completo el equipo terminando con su ciclo de trabajo característico.

Hoy otros elementos propios del equipo que pueden disminuir la confiabilidad y la disponibilidad del equipo estos son los instrumentos que se usan para que el equipo funcione por ejemplo cables, baterías, fluidos, etc.

Estos elementos son propensos a sufrir un fallo por estrés en consecuencia estos se fatigan de una manera precoz y a su vez hacen que un equipo sea menos confiable y que su disponibilidad en vez de aumentar como es lo ideal llegue a disminuir. (Long et al., 2013)

La tecnología que ocupa o que tiene implementado un equipo también llega a ser un factor crucial a la hora de determinar la confiabilidad de una herramienta de trabajo, que una empresa pueda tener tecnología de punta implementada en sus equipos no es garantía de una larga duración.

Sin embargo, puede llegar a rendir de mejor forma que algo no tan innovador y que tenga lo mínimo requerido, pero el costo de mantenimiento también llega a ser elevado y es un factor muy importante a la hora de saber que elegir para la maquinaria.

Un equipo más tecnológico puede llegar a ser más eficaz al momento de cumplir sus objetivos reduciendo recursos y facilitando más las cosas para el usuario, la confiabilidad también aumenta en parte porque en caso de un fallo del equipo ayudará a que el técnico a cargo de diagnosticar los fallos pueda hacerlo de manera más eficiente rápida.

Sin embargo, un equipo más tecnológico necesita de un plan de mantenimiento más minucioso debido a que el mantenimiento tradicional no satisface los requisitos que tiene una máquina con toda la tecnología equipada. (Quispe, 2016)

#### **4.2.3. Confiabilidad humana**

En primer lugar, se entiende el concepto de confiabilidad humana como la probabilidad de que una persona desempeñe una actividad adecuada, optimizando recursos y evitando que el sistema sufra una degradación o llegue a generar una falla en un futuro. (García Palencia, 2013)

Por lo tanto, se entiende a la confiabilidad humana dentro del campo automotriz como la probabilidad de que un técnico realice una actividad de mantenimiento preventivo o correctivo optimizando recursos tiempo y evitando la mínima degradación de una maquinaria, vehículo o sistema.

La confiabilidad humana comienza a analizarse a raíz de los años de 1950, como la principal base de estudio en estos años se centraba en los errores cometidos por los pilotos de aviación en el sistema conocido como “sistema hombre máquina” (man – technology – environment), radica en la preocupación que iniciaba desde los pilotos hasta los pasajeros en toda la cadena de transporte.

Dentro del estudio de la confiabilidad humana, los factores conocidos como el “factor humano” se define como la influencia que puede llegar a tener el operario, técnico o ingeniero sobre cierto mecanismo, equipo, vehículo, maquinaria, etc.

El factor humano puede influenciar tanto en el ámbito de la operación de una maquinaria como en el proceso técnico de mantenimiento de diferentes mecanismos o equipos en el ámbito industrial, automotriz como en la aeronáutica.

La confiabilidad humana se ve influenciada por diferentes factores que se orientan sobre todo hacia la persona que va a realizar dicha actividad estos factores tienen que ver ante todo con la ergonomía al momento de realizar el trabajo, así como la posesión de las herramientas adecuadas para realizar dicha tarea. (Waterson, 2017)

Dentro de la ergonomía existen varios factores que se toman en consideración los cuales son el uso del equipo de protección personal, equipo de seguridad, así como un correcto orden en el espacio de trabajo.

Hoy otro factor que influye en la confiabilidad humana y es el uso de herramientas, así como en la consulta de manuales propios de los equipos al momento de realizar las diversas actividades.

El consultar esta clase de material al momento de realizar actividades de mantenimiento ayuda a que los procesos se los realicen de manera adecuada, además que se utilicen las herramientas apropiadas al momento de realizar actividades de mantenimiento tanto preventivo y sobre todo mantenimiento correctivo.

Centrándose más específica en el campo automotriz al momento de aplicar un mantenimiento correctivo es imprescindible el consultar un manual por lo que al realizar dicha actividad el manual contiene diferentes mediciones, comprobaciones, tolerancias y torques que se deben manejar para aplicar de manera apropiada la actividad.

Si un técnico o mecánico no consulta dichos manuales el rango de confiabilidad humana se ve disminuido en gran medida pues el mantenimiento correctivo no es una clase de actividad que se pueda realizar por una persona sin un grado de conocimiento elevado.

#### **4.2.4. Error humano**

Las catástrofes que surgen de manera natural o provocada sirven en la mayoría de sus veces para recordar que las personas dentro de los sistemas de producción son el eslabón más frágil y los que menos garantía llegan a ofrecer.

Desde la perspectiva de varios autores el concepto de error humano se puede definir como una acción mal lograda de una persona realizando una actividad, esta puede ser realizado de manera consciente o inconsciente.

El error humano siempre se ha visto y ha sido tratado como algo inevitable, que no se puede controlar y que, aunque sea medido suele escaparse, las influencias de los factores humanos en los campos de mantenimiento han sido muy estudiados en particular en lo que se refiere a seguridad y confiabilidad. (Amendola, 2018)

### **Comportamiento y error humano**

El comportamiento del ser humano está arraigado de manera directa con los errores que este pueda llegar a cometer. Se pueden llegar a clasificar en dos modos; el basado en el conocimiento o denominado conciencia y el basado en la habilidad también denominado automático.

#### **Basado en el conocimiento: Conciencia**

Por lo general son los operarios que no cuentan con experiencia o son ocasionales en un puesto de trabajo, no mantienen tareas fijas y de repetición.

Son situados en entornos que les resultan novedosos y nuevos.

El aprendizaje o la resolución de las tareas son realizadas de manera lenta.

Ocupan mucho esfuerzo en las actividades y a cada instante tiene que hacer retroalimentación de los sistemas.

Las causas por las que surgen errores en este tipo de comportamiento suele ser la sobrecarga de trabajo, la falta de conocimiento en las operaciones que realiza, así como de las consecuencias que se pueden tener si surge el error.

#### **Basado en la habilidad Automático**

Trabajadores con experiencia en el sector, que haya realizado antes actividades parecidas o se asemejen a lo que se requiere.

El entorno en que trabaja u opera le resulta familiar, existe dentro de esto también el compañerismo y la solidaridad.

Las actividades que realiza las ejecuta de manera rápida y sin mucho esfuerzo, dado que la práctica lo ha llevado a conseguir eso.

No necesita mucha retroalimentación de las tareas porque se encuentra en un constante bucle.

Las causas en este comportamiento para que surja un error es la comodidad y exceso de confianza que le produce trabajar siempre en la misma actividad o los cambios en la actividad o sector con el que el operario no se siente a gusto o del que no tiene conocimiento.

#### 4.2.4.1. Tipos de errores

Los errores que se cometen dentro de un proceso de producción también pueden ser clasificados dependiendo el factor que haya influido en el mismo. (Collazo, 2008)

- Por omisión: cuando una acción encomendada no es realizada por el usuario.
- Por comisión: cuando una tarea prevista llega a desviarse de la planificación, ya sea en cuestiones de tiempo o de resultados.
- Voluntario: cuando una acción que llega a perjudicar el proceso o el resultado del mismo es realizada de manera consciente, no es necesario que el operario conozca las consecuencias de la misma ni que la acción lleve una mala intención.
- Involuntarios: Cuando la acción que dificulta un proceso es realizada de manera inconsciente.

#### 4.2.4.2. Clasificación de los errores humanos

Tener o conocer cómo se clasifican los errores humanos es de gran utilidad, esto sirve para organizar conceptos y saber cómo se llegan a producir los mismo y a que solución se puede llegar en caso de que estos surjan. Sin embargo, no está aceptada ninguna taxonomía general porque existen diferentes causales por lo tanto se pueden describir distintas taxonomías. (Di Pasquale et al., 2016)

- 1) **Modelo de mal funcionamiento humano interno:** se centra en el desempeño del operario, mostrando tres grados en los cuales su desempeño es descrito, el primero es basado en las habilidades que la persona tiene en su accionar, el segundo es las reglas que tiene el usuario al momento de cumplir con un proceso y el tercero se basa en el conocimiento que la persona tiene, esto con la finalidad de analizar

cómo se comporta antes situaciones en las que se vea rebasado por algún tema que no sea de su área.

- 2) **Modelo de procesamiento de información:** este modelo nace sin el fin de lograr analizar el error humano, pero con el tiempo se logró aplicar a esta área en consecuencia su estudio está basado en lo que es los estímulos sensoriales y actividades mentales, sabiendo, así como se puede comportar el cerebro de un operario ante situaciones como el estrés.
- 3) **Modelo de actos inseguros:** separa a los errores en; deslices y lapsos, omisión de una actividad o la falla en el proceso, y errores como tal. La razón del operario también es estudiada en este modelo, esto quiere decir que se analiza si el error fue causado de manera intencional y con consciencia de las consecuencias que tenía el error o si fue un acto sin intención.

#### **4.2.5. Metodologías de mayor uso potencial para evaluar el error humano**

Al existir la certeza de que tarde o temprano un error humano será provocado dentro de un proceso o sistema, han nacido varias metodologías que sirven para cuantificar, cualificar y ayudar a predecir el error humano, las cuales varios autores describen como de mayor uso potencial. (Salas et al., 2017)

##### **SLIM (Success Likely Hood Index Methodology)**

Esta metodología por su traducción modelo de índice de probabilidad de éxito es una de las técnicas más recurrentes para poder predecir y estimar el error humano.

Está basado en el juicio de expertos en el tema, se podría decir que su cuantificación llegaría a ser hasta subjetiva en ciertos puntos. Cuenta con 5 pasos para ser aplicado y su campo de aplicación es en la industria nuclear. (Abrishami et al., 2020)

Paso 1: determinar qué actividades van a tener una influencia dentro del error humano.

Paso 2: cuantificar de acuerdo a fórmulas estipuladas antes por conocedores cuál es el peso que tiene cada actividad respecto a su potencial fallo.

Paso 3: basándose en los pesos, se dan valores de tasas entre 1 al 9, siendo 1 lo más bajo y dando esta nota a los peores factores y 9 a las mejores condiciones.

Paso 4: en base a las tasas y los pesos, se aplica una fórmula estratégica para el cálculo del error humano, teniendo en cuenta las condiciones más relevantes.

Paso 5: se estima la probabilidad de error cuando una tarea se ejecuta.

### **SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach)**

Su aplicativo está basado en realizar un análisis jerárquico de las actividades que está realizando el operario, cualificando las tareas con errores creíbles que puedan ver afectada a la producción (Hughes et al., 2015).

La confiabilidad de esta metodología es muy aceptable y es una técnica de fácil aplicación y aprendizaje, trabaja mucho con lo que la persona que lo está aplicando observe, se ve aplicado a las áreas de transporte de productos, evaluando la logística de entrega, así como al chofer y su manera de conducir. Pero también es útil en el campo nuclear y petroleras.

Como todo método de predicción de error humano, su desventaja radica en la subjetividad de la persona que está evaluando, las acciones que el evaluado realiza no siempre serán realizadas de la misma manera.

Cuenta con 8 pasos que como en el anterior método sus dos primeros pasos consiste en la descripción de las tareas y darles su respectivo peso cuantitativo.

Paso 3: el analista desde su punto de vista considera que tareas representan un posible riesgo y las clasifica.

Paso 4: basado en lo descrito en el paso anterior, el analista describe las consecuencias que puede tener esa acción.

Paso 5: en cambio en este paso se dan soluciones a las consecuencias estudiadas.

Paso 6: calcular la probabilidad del error, midiendo con base en los dos pasos que antes fueron realizados.



Paso 7: Analizar la criticad tomando en cuenta los resultados sacados en el paso 6, y como paso final se da respuesta con un análisis bien estructurado de cómo se puede dar solución a todos los posibles errores que se vayan a tener.

### **ATHEANA (A Technique for Human Error Analysis)**

La principal búsqueda de esta metodología es ir más allá de ser un modelo que sirva para cuantificar datos, busca ubicar de manera más acertada donde sucederá un error y definirlo de mejor manera.

Para lograr dicho objetivo el enfoque de estudio es más centrado en identificar eventos en donde pueda surgir la falla humana, la inseguridad que una acción pueda tener dentro del contexto laboral y los errores que muchas veces llegan a ser forzados (Cooper et al., 1996).

Mejorar la experiencia de análisis también es importante para la metodología por lo que es esencial que la interacción entre analistas y operadores sea muy cercana, además de que los analistas en este caso ya parten con el conocimiento psicológico de porque puede llegar a suceder un fallo, volviendo a este método un poco más objetivo, su principal campo de aplicación es el nuclear.

Al igual que la mayoría de metodologías para prever el error humano esta cuenca con una secuencia de pasos a seguir, dividiendo tareas y cuantificándolas, pero al ser más interactiva posee ciertas cualidades diferenciales como:

- Familiarización con la planta a ser estudiada.
- Recopilación de información, la identificación y definición de los futuros problemas.
- Incorporación de los mismos al modelo lógico.
- Análisis de detección.
- Cuantificación detallada, además del análisis de incertidumbre.
- Documentación del proceso y resultados.

### **HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique)**

La metodología busca evaluar el error humano fundamentándose en tres claros pilares que son, la probabilidad de error genérico, las condiciones que llegan a producir un error y la proporción evaluada de efecto (Mirzaei et al., 2022).

Como principio base tiene el caracterizar las actividades que cumplen los usuarios dentro de una empresa para de manera posterior buscar las influencias que tienen ciertas condiciones negativas de trabajo y como estas llegan a afectar al trabajador.

Las condiciones de error son muy variables en este método y por eso la confiabilidad de su aplicación dependerá del enfoque y análisis que se tengan de estas condiciones, por último, la cuantificación de cada literal viene dada por el tercer pilar de la metodología que es la proporción evaluada de efecto la cual radica en virtud de la importancia que tenga el error.

El cálculo que se realiza no es tan exigente en ciertas cuestiones, como por ejemplo no toma en cuenta la experiencia que tiene un trabajador en su puesto, ni los conocimientos que posea al momento de ser evaluado, esto llega a ser muy influyente al comparar con otros métodos que si analizan este tipo de características.

Esta metodología es de las más completas en cuanto a campos de aplicación se trata, debido a que se la pueda aplicar en industrias como la nuclear, química, aeronáutica, ferrocarrilera y en la medicina.

### **CARA (Controller Action Reliability Assessment)**

Es un aplicativo con base metodológica en el HEART solo que su principal campo aplicativo es el sector de seguridad aérea. El enfoque de la técnica es clasificado de “primera generación”.

Esto quiere decir que la cuantificación de los datos de los empleados es centrada en los errores más primordiales, y no generalizada los factores secundarios como los psicológicos o que tengan que ver de manera más indirecta con el error de los operarios (Gibson & Kirwan, 2008).

Aunque el CARA no se concentra en los factores secundarios dentro de la cuantificación, si es importante como en cualquier otro aplicativo de cuantificación de error humano, si se debe cualificar la atmósfera en la que se encuentran los trabajadores porque es importante conocer el contexto social en que se están desarrollando.

## **THERP (Technique for Human Error Rate Prediction)**

El método fundamental para el estudio de la confiabilidad humana, considerado de primera generación, desarrollado y aplicado desde 1961 hasta la fecha con muchos cambios y constantes actualizaciones según lo que se requiera en el sector al que es aplicado. (Dsouza & Lu, 2017)

En principio era ocupado en el sector nuclear para evaluar cómo es que los errores humanos llegan a tener un gran impacto sobre los desempeños dentro de las fábricas.

Este método es tan completo que busca reflejar todos los aspectos que pueden llegar a influir en un error humano, y a su vez como afectan al estudio de los mismos, el THERP analiza las tareas que realiza el operario, los eventos que pueden llegar a tener las personas dentro de un ambiente que los conduzcan a cometer errores, la identificación del rendimiento de los empleados dentro del sistema, la representación de errores, y los tipos de cuantificaciones que se pueden dar dentro del método son los nominales, los básicos o los condicionales.

### **4.2.6 Justificación para aplicar el método THERP**

La elección de esta metodología es fundamentada en el tiempo que lleva en la industria, lo confiable que sus resultados llegan a ser y que de manera constante se encuentra en actualización de procesos y desarrollo.

Su campo aplicativo es el más grande y sobre todo aplica también dentro del sector automovilístico, a pesar de que tiene ciertas limitaciones como el uso de bastantes recursos y que su aplicación toma mucho tiempo, su gigantesca base de datos y sus innumerables libros y manuales son incondicionales para saber que esta metodología es la más apta al momento de cuantificar y cualificar el error humano.

En la Tabla 1, se puede observar un breve resumen de las distintas metodologías que sirven para ayudar a predecir el error humano, así como los campos de aplicación en los que son utilizados.

**Tabla 1** *Comparativa de las distintas técnicas de evaluación de error humano.*

<b>Técnica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Campos aplicación</b>	<b>Referencias</b>
----------------	--------------------	--------------------------	--------------------

SLIM	Evalúa que tan probable es que suceda un error mientras cumple una tarea específica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingeniería marina</li> </ul>	Metodología basada en SLIM para el cálculo de probabilidad de error humano de derrames de búnker en operaciones marítimas. (Kayisoglu et al., 2022)
SHERPA	Busca cuantificar y cualificar la posibilidad de errores humanos, dando recomendaciones concretas de cómo evitarlas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuclear</li> <li>• Servicio de correos</li> <li>• Minas</li> </ul>	Un Simulador para Análisis de Probabilidad de Error Humano (SHERPA). (Di Pasquale et al., 2015)  Identificación de errores humanos y priorización de riesgos en operaciones de puentes grúa utilizando métodos HTA, SHERPA y fuzzy VIKOR. (Mandal et al., 2015)
ATHEANA	Estudia factores no solo de los operarios, sino que involucra a la planta y ambiente de trabajo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de sistemas</li> </ul>	Un análisis de falla humana DFM/Fuzzy/ATHEANA de un sistema de control digital para un presurizador. (Pinto et al., 2014)

HEART	Consta de tareas genéricas que luego son comparadas con las tareas reales que servirán para cuantificarlas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuclear</li> <li>• Química</li> <li>• Aviación</li> <li>• Medicina</li> </ul>	<p>Un método basado en datos para evaluar y reducir el error humano para mejorar el rendimiento operativo. (Williams, 1988)</p> <p>HEART-IS: una técnica novedosa para evaluar incidentes de seguridad de la información relacionados con errores humanos. (Evans et al., 2019)</p> <p>Un método HEART híbrido para estimar las probabilidades de error humano en el proceso de conducción de locomotoras. (Zhou et al., 2019)</p>
CARA	Variante de la metodología HEART, pero aplicada al sector aéreo y a su tránsito.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tránsito aéreo</li> </ul>	<p>El desarrollo y la aplicación de CARA: una herramienta HRA para el tráfico aéreo</p> <p>Sistemas de gestión. (Kirwan et al., 2011)</p>

THERP	Cumple con la principal función de predecir errores humanos y evaluar el comportamiento de los sistemas respecto al error,	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuclear</li> <li>• Medicina</li> <li>• Transporte</li> <li>• Construcción</li> </ul>	<p>Evaluación de la influencia de la ingeniería del factor humano en la seguridad nuclear mediante técnicas de evaluación probabilística de la seguridad. (Farcasiu &amp; Constantinescu, 2021)</p> <p>Examinar el efecto de un sistema de apoyo al operador propuesto en la estimación de la probabilidad de error humano. (Arigi &amp; Kim, 2021)</p> <p>Investigación sobre evaluación de confiabilidad de equipos de suministro de energía de tracción considerando factores humanos (Yang et al., 2018)</p>
-------	--	---	--

Nota. Las referencias mencionadas en esta tabla, son artículos o conferencias en donde el uso de las metodologías es utilizado en los distintos campos de aplicación descritos.

#### 4.2.7 Originalidad del proyecto

Como se pudo observar a lo largo del capítulo hay distintos tipos de metodologías que sirven para el cálculo de error humano, la Therp es la más utilizada además de ser la que más campos aplicativos tiene.

La originalidad del proyecto radica en el estudio del error humano utilizando esta metodología dentro del sector automotriz sobre todo en el área del mantenimiento, muy pocos estudios se han realizado con este tema, y sobre todo muy pocos han aplicado la metodología basándose en la criticidad que factores internos y externos dentro de las empresas automotrices pueden llegar a afectar el trabajo de un operario.

## **5. CAPÍTULO 2: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA THERP**

### **5.1. Metodología Therp**

La metodología Therp es un método desarrollado a partir de la necesidad de verificar que los procesos a seguir en actividades de mantenimiento sean correctos, así como verificar que los técnicos de mantenimiento los apliquen de la manera adecuada. (Nezamodini et al., 2018)

Esta metodología se puede aplicar en diferentes campos del sector industrial de manera especial en el mantenimiento de maquinarias de cadena de producción en línea, así como en el sector automotriz. En el sector automotriz esta metodología se puede aplicar en flotas de transporte donde se mantenga un control de del mantenimiento realizado en las unidades, así como un plan de acción de mantenimiento. (Faig, 2008)

Como tal la metodología Therp busca predecir el error que puede llegar a cometer un técnico al momento de realizar un mantenimiento, mismo que puede ser predictivo, correctivo o mejorativo para el caso específico del sector automotriz. Esta posibilidad de errar al momento de realizar un mantenimiento se la denomina error humano.

Para la aplicación de esta metodología se deben cumplir con el desarrollo de diferentes fases dentro de la empresa que se va a aplicar; estas fases son: la familiarización con la planta, análisis cualitativo, análisis cuantitativo y la incorporación a la planta estudiada. (Salas et al., 2017)

La importancia de analizar el factor de error humano en un mantenimiento radica en el análisis de la fiabilidad de un mecanismo, por lo tanto, para analizar la fiabilidad del mecanismo es necesaria una metodología que busque complementar la metodología Therp.

Las variables que pueden llegar a determinar el porcentaje de error humano en actividades de mantenimiento pueden llegar a ser muy complejos por lo tanto las suposiciones realizadas acerca del comportamiento humano y de las máquinas no serán consideradas para modelar el comportamiento de las actividades de mantenimiento.

Para modelar se toman en cuenta las siguientes limitaciones relacionadas a la metodología Therp:



1. El comportamiento que adopte el técnico al momento de realizar un mantenimiento es complejo debido a que el mismo se ve afectado por factores como: factores sociales, factores ambientales, factores psicológicos, factores físicos, factores psicológicos, así como el nivel de estrés o fatiga que el técnico pueda presentar.
2. En el caso específico de fallo de un componente no se consideran las acciones tomadas por el técnico sobre el componente por lo tanto no puede ser analizado por el análisis de fiabilidad humana en la interacción del técnico con el componente como tal.
3. La mayor limitante del análisis de fiabilidad humana se encuentra en la escasez de datos de cómo se puede llegar a comportar un técnico, así como de los parámetros psicológicos del mismo.

### **5.1.1. Proceso de aplicación**

El Therp es un proceso de cinco pasos que se repiten no de forma obligatoria en el mismo orden y lo que busca esta constante repetición es que la degradación del sistema por el factor de error humano sea de un porcentaje aceptable para el posterior análisis.

Previo definir el proceso es importante recalcar que error humano puede darse en cualquier fase de la cadena de producción en la cual opera la maquinaria y no está ligada solo con el mantenimiento ya que pueden darse errores en la operación en la puesta en marcha o incluso en la fabricación de dicha maquinaria. (Swain, 1964)

Estos seis pasos son los siguientes:

1. La definición de las fallas en el sistema que se está evaluando.
2. Identificación de las tareas que realizan los operarios dentro del sistema, así como enumerar las funciones que cumplen.
3. Para cada operación humana que se haya identificado en el paso anterior se deben predecir tasas de error.

4. Con el resultado de las predicciones se deben definir los posibles efectos que pueden causar los errores humanos en el sistema.

5. Respecto a todo lo analizado, se deben dar recomendaciones que traten de ayudar a reducir las tasas de fallos del sistema. Procurando cambiar ciertas actividades o conductas que se estén manejando de mala forma.

6. Documentación.

#### **5.1.1.1. Definición de fallas**

En este apartado se deben tomar en cuenta solo las actividades que estén relacionadas de manera directa con el error humano, es necesario ser selectivo con las condiciones que se estén a punto de definir.

#### **5.1.1.2. Identificación de tareas**

Detallar de la manera más concreta y completa los pasos que se deben ejecutar en la actividad que realiza el operario y cuál es el comportamiento que se debe tener. Los errores que pueden pasar en las tareas según el Therp se clasifican en dos; por omisión o de acción.

Los errores de acción a su vez se subclasifican en las siguientes categorías:

**Errores de selección:** el procedimiento está o fue realizado de manera errónea.

**Errores en la secuencia:** el procedimiento no está siendo ejecutado en el orden que se debería.

**Errores temporales:** las acciones dentro del proceso no son realizadas en el momento que es, o bien se están ejecutando tarde o bien muy temprano.

**Error cualitativo:** la acción está ocupando mucho o poco esfuerzo del que en realidad se requiere.

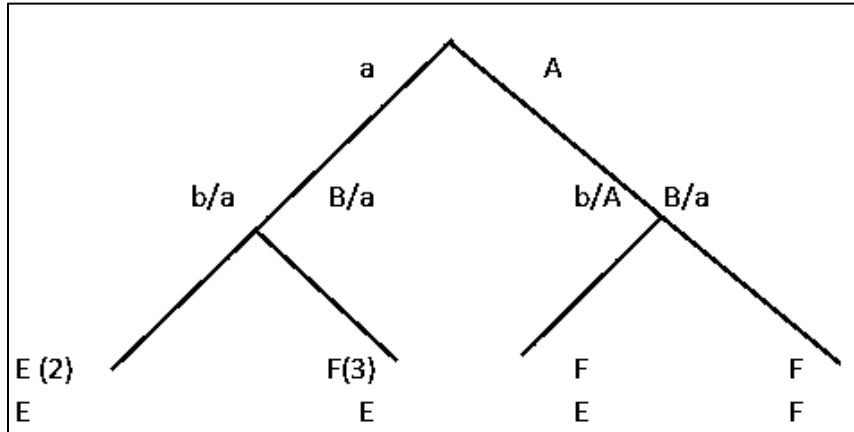
Para la identificación de las tareas hay que tener en cuenta ciertos aspectos, primero siempre se deben revisar de manera detallada los procedimientos que están descritos, en consecuencia, todo debe tener sentido al momento de la evaluación.

El error humano es tomado de forma única cuando este derive del operario, si la falla es por causas de maquinaria o sistemas no se deben tratar. Para ello, se debe revisar

bien que las máquinas estén funcionando como deben y que estén ubicados en el lugar correcto.

En la ilustración 2 se puede observar el “árbol de eventos” que es la herramienta más útil para poder modelar y describir las tareas de los operarios.

**Ilustración 2** *Árbol de eventos convencional*



Nota. Ilustración adaptada de *técnica de ramificación del árbol de probabilidades*, por Swain D, 1964, THERP.

### 5.1.1.3. Estimación de errores

Para la cuantificación de la fiabilidad humana se debe hacer pie en las tablas de guía que contiene la normativa NTP-621, a continuación, se describe de manera detallada el tipo de tablas que se encuentran en dicha normativa y sobre todo que servirán para esta aplicación.

En dicho documento se encuentra la tabla con los valores de probabilidad de los errores humanos que se dan en el control administrativo, cuantificando el PEH desde 0.001 hasta 0.5, así como el FE de 3 a 10.

A continuación, se describe la tabla para estimar los errores por omisión en procedimientos que se encuentren descritos, de igual forma se da a conocer los valores para el PEH que va de 0.001 a 0.05 y los valores de FE que son de 3 a 5.

La tabla de coeficientes que modifica a la PEH por causas de estrés, así como el nivel de experiencia que tenga el operario sirve para multiplicar a los valores y aumentar la probabilidad de que un fallo suceda por alguna de estas causas.

Dentro de la normativa de fiabilidad humana se encuentra muchas otras tablas que son útiles para la cuantificación sin embargo no se describirán ahora porque no se consideran importantes, pero no hay que dejarlas de lado en este proceso.

#### **5.1.1.4. Definición de efectos probables**

Lo primero que se debe hacer en este paso es incluir al árbol de sucesos los errores humanos que salieron del paso anterior, posterior se deben evaluar como estos contribuyen al fallo de la actividad.

Se debe además identificar si existen actividades dependientes de otras, es decir que vayan consiguientes ya sea por orden de desarrollo o porque el éxito o fracaso de la actividad anterior tenga consecuencias sobre la propia actividad.

#### **5.1.1.5. Propuestas de solución**

Se deberán analizar los resultados que los dos pasos anteriores concluyeron, esto con la finalidad de poder integrar soluciones y proponer ideas para intentar minimizar los valores de errores y con ello también sus consecuencias.

Las mejoras se suelen proponer en la mayoría de casos en la actualización de las acciones humanas operativas que van ligadas con las acciones administrativas, es decir, detallar de manera más amplia los manuales o instructivos a seguir dentro de los procesos, capacitar de mejor manera o de forma más rutinaria al personal en cuanto a cómo seguir los procesos que se desean.

Otra actualización que se puede ofertar según los resultados es poder automatizar ciertos procesos que quitan tiempo al operario o que generan carga de trabajo innecesaria y que también ayudaría a abaratar costos a la empresa.

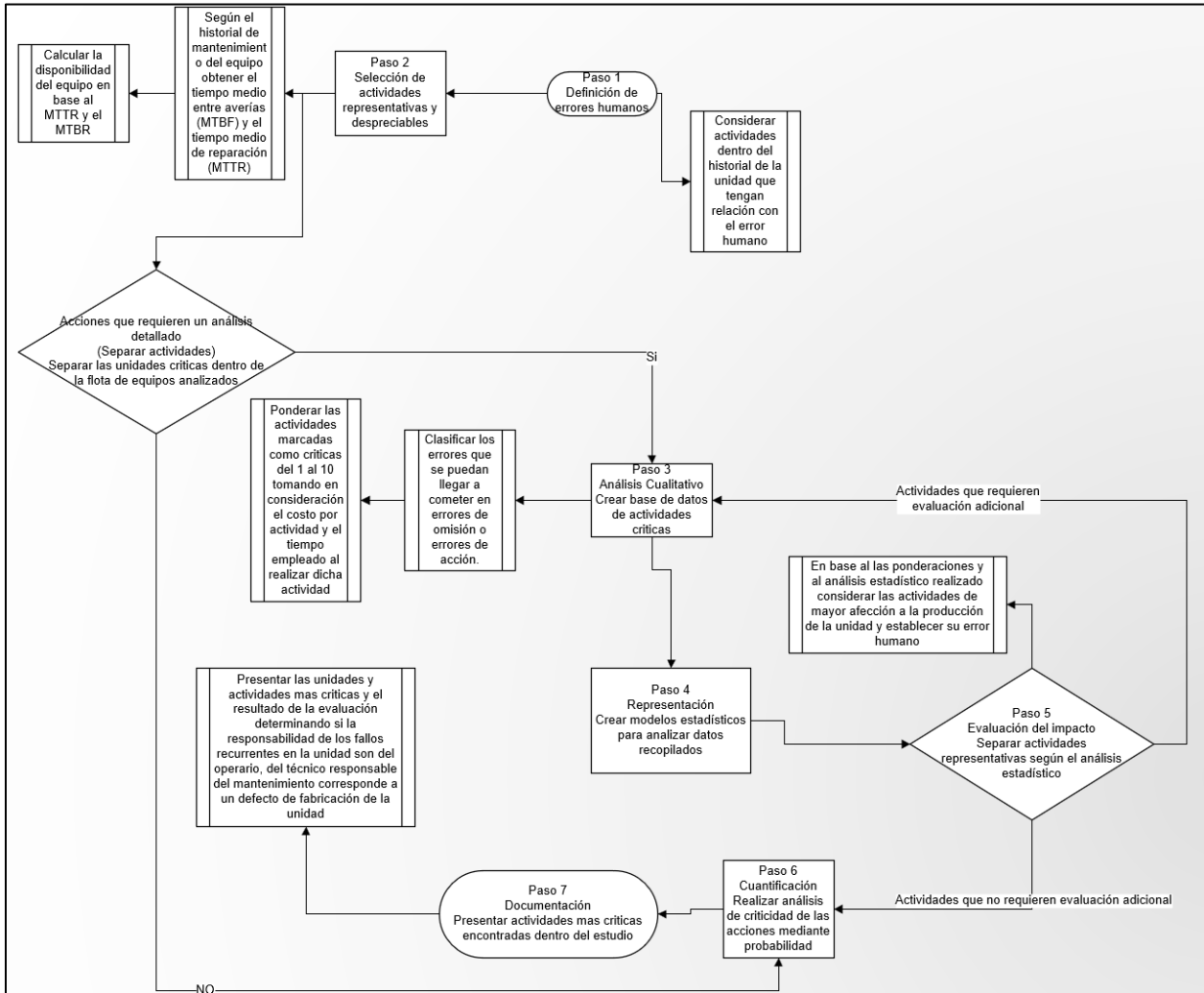
#### **5.1.1.6. Documentación**

La documentación consiste en tener una base de datos de los procesos que se realizan y de los errores que se pudieran haber cometido, tener en cuenta cada que tiempo se realizan mantenimientos a las máquinas o sistemas que funcionen para bien de la empresa, realizar y registrar de manera periódica la capacitación correcta del personal.

Esto ayuda a que futuros procesos de estudio de error humano o futuras planeaciones de mejoras y actualizaciones dentro de la empresa se pueda llevar de mejor

manera y de forma más rápida, sabiendo y dirigiendo estos cambios al área que de verdad lo necesita.

**Ilustración 3** Diagrama de flujo del procedimiento Therp



## 5.2. Aplicación de la metodología

### 5.2.1. Paso 1.

Antes de evaluar la probabilidad de error que puede llegar a tener el mecánico al momento de realizar una actividad dentro de una empresa es necesario también evaluar la confiabilidad de operabilidad que tienen las máquinas dentro de la empresa estudiada, es decir aplicar una metodología que ayude a la Therp, para ello se ocupa la metodología AMFE.

La empresa en cuestión al día en que se realiza el estudio contaba con 15 unidades, a las cuáles se les asignó un código para poder distinguir las de manera más sencilla, aunque se debe tomar en cuenta que las unidades son idénticas ya que fueron adquiridas de manera simultánea y con el mismo propósito. En la tabla 2 se detallan los datos técnicos y características de las mismas.

**Tabla 2** Características de las unidades móviles de la empresa.

<b>Código</b>	<b>Unidad</b>	<b>Categoría</b>	<b>Código</b>	<b>Año</b>	<b>Combustible</b>
		<b>Norma</b>	<b>Norma</b>		
		<b>INEN</b>	<b>INEN</b>		
179	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
180	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
181	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
182	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
183	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
184	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
185	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
186	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
187	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
188	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL
189	VOLQUETE 7 METROS CÚBICOS	N2	CCG	2021	DIÉSEL

190	VOLQUETE METROS CÚBICOS	7	N2	CCG	2021	DIÉSEL
191	VOLQUETE METROS CÚBICOS	7	N2	CCG	2021	DIÉSEL
192	VOLQUETE METROS CÚBICOS	7	N2	CCG	2021	DIÉSEL
193	VOLQUETE METROS CÚBICOS	7	N2	CCG	2021	DIÉSEL

Estas unidades han sido trabajadas y manipuladas a lo largo de un año que se toma en cuenta en este estudio, esto a generado gastos claros en lo que es repuestos y mano de obra, pero en ningún momento se llega a ni siquiera percibir lo que la indisponibilidad de estas unidades ha generado como gastos, de esta manera se puede justificar la realización de este estudio, enfocarse también en el factor de disponibilidad de las máquinas.

### 5.2.2. Paso 2.

La disponibilidad se define como la probabilidad de que un activo funcione de manera correcta cuando su poseedor lo requiera y se puede calcular de la siguiente forma.

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad eq (1).$$

Donde se pueden definir dos variables más que son:

**MTBF:** Tiempo medio entre averías (Mean Time Between Failures)

$$MTBF = \frac{\text{tiempo de funcionamiento}}{\# \text{ paradas de la unidad}} \quad eq (2).$$

**MTTR:** Tiempo medio de reparación (Mean Time To Repair)

$$MTTR = \frac{\text{total de tiempo de mantenimiento}}{\# \text{ paradas de la unidad}} \quad \text{eq (3).}$$

Con estas fórmulas se procederá a calcular primero el MTTR y el MTBF para posteriormente calcular la disponibilidad, para ello se toma en cuenta las ordenes de trabajo que se han realizado sobre las unidades a lo largo del año, en las tablas siguientes se detallaran las actividades que se realizaron sobre las unidades, así como la frecuencia con la que fueron realizadas, además de agregar el costo que tuvieron las mismas y cuanto fue el tiempo de funcionamiento previo daños.

Detalles de cómo se calcularon los valores analizados en cada unidad:

$$\text{Tiempo total de funcionamiento} = \sum \text{Tiempo total por actividades} \quad \text{eq (4).}$$

$$\text{Costo total del mantenimiento} = \sum \text{Costo total por actividades} \quad \text{eq (5).}$$

$$\text{Num paradas} = \sum \text{Num de veces que se realizaron los mantenimientos} \quad \text{eq (6).}$$

A continuación, se irán detallando una por una cada tabla de cada unidad:



**Tabla 3 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 179**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
179	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	89.50	5285.00	2750.00	29.00	94.83	3.09
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 40000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 45000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 50000 km	8	330	1	400	8	400						
	Calibración de válvulas	1	60	1	90	1	90						
	Mantenimiento 55000 km	2	120	1	150	2	150						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	2	340	16	680						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	1	65	1	65						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	3	120	6	360						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	2	120	4	240						
	Cambio de disco de embrague	6	250	2	350	12	700						
	Cambio bolla de combustible	0.5	110	1	130	0.5	130						
Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60							
Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	4	120	8	480							

**Tabla 4 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 180**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
180	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	85.00	4805.00	2250.00	76.00	29.61	1.12
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 40000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 45000 km	2	120	1	150	2	150						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	3	340	24	1020						
	Cambio bases del motor	3	140	2	190	6	380						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	1	65	1	65						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	3	120	6	360						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	3	120	6	360						
	Cambio de disco de embrague	6	250	2	350	12	700						
Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60							
Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	1	120	2	120							

**Tabla 5 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 181**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
181	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	67.00	3930.00	2250.00	21.00	107.14	3.19
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 40000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 45000 km	2	120	1	150	2	150						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	1	340	8	340						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	2	65	2	130						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de disco de embrague	6	250	3	350	18	1050						
Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	2	60	4	120							
Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	1	120	2	120							

**Tabla 6 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 182**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
182	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	51.00	3070.00	2000.00	16.00	125.00	3.19
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 40000 km	4	150	1	180	4	180						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	1	340	8	340						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	2	120	4	240						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de disco de embrague	6	250	1	350	6	350						
Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	2	120	4	240							

**Tabla 7 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 183**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
183	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	38.00	2690.00	2750.00	14.00	196.43	2.71
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 40000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 45000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 50000 km	4	330	1	400	4	400						
	Mantenimiento 55000 km	2	120	1	150	2	150						
	Calibración de válvulas	1	60	1	90	1	90						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	1	120	2	120						

**Tabla 8 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 184**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
184	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	90.00	5105.00	1750.00	27.00	64.81	3.33
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	4	340	32	1360						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	1	65	1	65						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	5	120	10	600						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de disco de embrague	6	250	2	350	12	700						
	Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60						
Cambio cilindros de freno posteriores	1	90	2	120	2	240							
Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	3	120	6	360							

**Tabla 9 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 185**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
185	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	57.00	3595.00	2500.00	19.00	131.58	3.00
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 40000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 45000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 50000 km	4	330	1	400	4	400						
	Calibración de válvulas	1	60	1	90	1	90						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	1	340	8	340						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	1	65	1	65						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de disco de embrague	6	250	1	350	6	350						
	Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60						
	Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	1	120	2	120						

**Tabla 10 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 186**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
186	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	53.50	3215.00	2250.00	19.00	118.42	2.82
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 40000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 45000 km	2	120	1	150	2	150						
	Calibración de válvulas	1	60	1	90	1	90						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	1	340	8	340						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	1	65	1	65						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de disco de embrague	6	250	1	350	6	350						
	Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60						
Cambio de tapa reservorio de agua	0.5	15	1	20	0.5	20							
Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	1	120	2	120							

**Tabla 11 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 187**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
187	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	35.00	2290.00	2250.00	13.00	173.08	2.69
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 40000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 45000 km	2	120	1	150	2	150						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	2	120	4	240						

**Tabla 12 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 188**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
188	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	54.00	3175.00	2750.00	16.00	171.88	3.38
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	2	340	16	680						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	1	65	1	65						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	2	120	4	240						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de disco de embrague	6	250	1	350	6	350						
Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	1	120	2	120							

**Tabla 13 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 189**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
189	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	74.00	4635.00	1250.00	16.00	78.13	4.63
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	2	340	16	680						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	1	65	1	65						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	2	120	4	240						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de disco de embrague	6	250	1	350	6	350						
	Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60						
	Reparación bomba e inyectores de combustible	24	1500	1	2000	24	2000						
Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	1	120	2	120							

**Tabla 14** Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 190

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
190	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	34.00	1785.00	1000.00	10.00	100.00	3.40
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	1	340	8	340						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	1	65	1	65						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de disco de embrague	6	250	1	350	6	350						
Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60							

**Tabla 15** Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 191

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
191	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	50.00	2955.00	2000.00	16.00	125.00	3.13
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 30000 km	4	400	1	450	4	450						
	Mantenimiento 35000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 40000 km	4	150	1	180	4	180						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	1	340	8	340						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	1	65	1	65						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	1	120	2	120						
	Cambio de disco de embrague	6	250	1	350	6	350						
	Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60						
	Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	1	120	2	120						

**Tabla 16 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 192**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
192	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	177.00	14070.00	1250.00	31.00	40.32	5.71
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 25000 km	2	120	1	150	2	150						
	Cambio discos de frenos delanteros	8	240	4	340	32	1360						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de ducto de admisión	1	50	2	65	2	130						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	5	120	10	600						
	Cambio de discos de freno posterior	2	90	2	120	4	240						
	Cambio de disco de embrague	6	250	2	350	12	700						
	Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60						
	Cambio cilindros de freno posteriores	1	90	2	120	2	240						
	Cambio parabrisas delantero	6	700	1	1000	6	1000						
	Cambio parachoques delantero	2	120	2	150	4	300						
	Overhaul (reparacion de motor)	80	5000	1	8000	80	8000						
Cambio de tanque de combustible	2	150	1	200	2	200							
Cambio de pastillas de freno traseras	2	90	2	120	4	240							

**Tabla 17 Cálculos de MTBF Y MTTR de la Unidad 193**

Unidad	Actividad	Tiempo (h)	Costo (\$)	# de veces	Costo por mantenimiento	Tiempo total por actividades	Costo total por actividades	Tiempo total de mantenimiento	Costo total del mantenimiento	Tiempo de funcionamiento	Número de paradas	MTBF	MTTR
193	Mantenimiento 5000 km	2	120	1	150	2	150	21.00	1150.00	1000.00	8.00	125.00	2.63
	Mantenimiento 10000 km	4	150	1	180	4	180						
	Mantenimiento 15000 km	2	120	1	150	2	150						
	Mantenimiento 20000 km	4	150	1	180	4	180						
	Cambio bases del motor	3	140	1	190	3	190						
	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	90	2	120	4	240						
	Cambio de bases del tanque de combustible	2	40	1	60	2	60						



### 5.2.3. Paso 3.

Una vez determinado lo que es el MTBF y MTTR se dispone de la ecuación antes dada de disponibilidad además de ocupar otros indicadores que se deben tener en cuenta para conocer la criticidad de las máquinas, los cuales se detallan a continuación. (Gallegos et al., 2020)

**Confiabilidad:** es la probabilidad de que un activo funcione bien, este indicador se asienta dentro cuatro pilares de la confiabilidad integral; la humana, la de gestión, la intrínseca que es la que viene dada por fábrica y la del contexto operacional. Su ecuación está dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda*t} = e^{-\frac{1}{MTBF}*t} \quad eq (7).$$

**Mantenibilidad:** el concepto de este indicador es básicamente la probabilidad de que una vez que un activo haya fallado, al repararse quede trabajando en óptimas condiciones. Su ecuación viene dada por:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu*t} = 1 - e^{-\frac{1}{MTTR}*t} \quad eq (8).$$

Se ocupa una distribución exponencial dado que existe una tasa de fallos constante en el periodo de revisión, así de esta forma se podrá tener mayor certeza de que los cálculos realizados están siendo lo más precisos posibles.

Ahora bien, para calcular estos indicadores previamente mencionados, se tomará en cuenta que las máquinas pasan por un proceso de mantenimiento cada 250 horas de trabajo, por lo cual el tiempo utilizado en las fórmulas será de un tiempo medio de 150 horas. En la tabla 18 se pueden observar los resultados de todas las unidades.

*Tabla 18 Cuadro de criticidad de las unidades*

UNIDAD	MTBF	MTTR	DISPON	$\lambda$	$\mu$	R(150h)	M(150h)	COSTO ANUAL DE MANTENIMIENTO
179	94.83	3.09	96.7%	0.011	0.324	20.6%	100.0%	5285.00
180	29.61	1.12	96.2%	0.034	0.89	0.6%	100.0%	4805.00
181	107.14	3.19	97.0%	0.009	0.313	24.7%	100.0%	3930.00
182	125.00	3.19	97.5%	0.008	0.314	30.1%	100.0%	3070.00
183	196.43	2.71	98.6%	0.005	0.368	46.6%	100.0%	2690.00
184	64.81	3.33	94.9%	0.015	0.30	9.9%	100.0%	5105.00
185	131.58	3.00	97.7%	0.008	0.333	32.0%	100.0%	3595.00
186	118.42	2.82	97.6%	0.008	0.355	28.2%	100.0%	3215.00

187	173.08	2.69	98.4%	0.006	0.371	42.0%	100.0%	2290.00
188	171.88	3.38	98.0%	0.006	0.296	41.8%	100.0%	3175.00
189	78.13	4.63	94.1%	0.013	0.216	14.7%	100.0%	4635.00
190	100.00	3.40	96.6%	0.010	0.294	22.3%	100.0%	1785.00
191	125.00	3.13	97.5%	0.008	0.320	30.1%	100.0%	2955.00
192	40.32	5.71	85.8%	0.025	0.18	2.4%	100.0%	14070.00
193	125.00	2.63	97.9%	0.008	0.381	30.1%	100.0%	1150.00

Se pueden observar que la mantenibilidad en todas las unidades es del 100% pero esto no implica que sean fiables, ahora bien, el análisis para el error humano se va a llevar de acuerdo a los resultados que da la confiabilidad, y es que hay siete unidades que tienen una confiabilidad por debajo del 25% y de esas tres unidades no alcanzan ni el 10% razón por la cual el análisis se enfocará en esas unidades.

#### 5.2.4. Paso 4.

Una vez identificadas las unidades más problemáticas se deben analizar cuáles son las tareas críticas para ello se debe hacer uso de la técnica de matriz de criticidad total por riesgo.

Se tienen que dar valores de 1 a 10 dependiendo la frecuencia y criterio que se tengan de riesgo en las actividades, para ello se hace uso de las tablas 19, 20 y 21 que son tomadas de la NTP 679, que hace referencia a la metodología AMFE. Estas tablas funcionaran como una guía para dar una ponderación en la matriz de criticidad.

**Tabla 19** Gravedad según la repercusión en el cliente/usuario.

Gravedad	Criterio	Valor
Muy baja	Fallo de pequeña importancia.	1
Baja	Fallo con ligero inconveniente al cliente.	2 – 3
Moderada	Produce insatisfacción y disgusto al usuario.	4 – 6
Alta	Fallo crítico.	7 – 8
Muy alta	Fallo potencialmente muy crítico.	9 – 10

**Tabla 20** Clasificación según la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo.

Frecuencia	Criterio	Valor
Muy baja	Ningún fallo asociado.	1

Baja	Fallos aislados en procesos parecidos.	2 – 3
Moderada	Defectos que aparecen de manera ocasional.	4 – 5
Alta	Fallo con frecuencia.	6 – 8
Muy alta	Fallo casi inevitable.	9 – 10

**Tabla 21** Clasificación de la facilidad con la que se puede detectar un fallo.

Detectabilidad	Criterio	Valor
Muy alta	El defecto es evidente.	1
Alta	Aunque es la mayoría de ocasiones es evidente, se puede escapar a primera revisión.	2 – 3
Mediana	Posiblemente se detecte y no llegue al cliente.	4 – 6
Pequeña	Es de tal naturaleza que resulta de difícil detección.	7 – 8
Improbable	No se puede detectar.	9 – 10

En base a estas tablas antes vistas se presentan los resultados de las unidades establecidas. En donde para sacar la CTR total se utiliza la siguiente fórmula:

$$CTR = frecuencia * ((Io * Fo) + Cm + SHA) \quad eq (9).$$

**Tabla 22** Matriz de criticidad de la unidad 179

ANUAL									
Unidad	Sistema	Actividad	Frecuencia de fallos	Io (Impacto en la producción)	Fo (Flexibilidad operacional)	Cm (Costes de mantenimiento)	SHA (Seguridad higiene y ambiente)	CTR	
179	Completo	Mantenimiento 5000 km	1	2	2	3	2	9	
	Completo	Mantenimiento 10000 km	1	3	4	5	3	20	
	Completo	Mantenimiento 15000 km	1	2	2	3	2	9	
	Completo	Mantenimiento 20000 km	1	3	4	5	3	20	
	Completo	Mantenimiento 25000 km	1	2	2	3	2	9	
	Completo	Mantenimiento 30000 km	1	5	6	5	3	38	
	Completo	Mantenimiento 35000 km	1	2	2	3	2	9	
	Completo	Mantenimiento 40000 km	1	3	4	5	3	20	
	Completo	Mantenimiento 45000 km	1	2	2	3	2	9	
	Completo	Mantenimiento 50000 km	1	6	6	6	6	48	
	Sistema de admisión y escape	Calibración de válvulas	1	3	2	2	2	2	10
	Completo	Mantenimiento 55000 km	1	2	2	3	2	9	
	Sistemas frenantes	Cambio discos de frenos delanteros	2	7	8	7	6	138	
	Chasis	Cambio bases del motor	1	3	2	4	5	15	
	Sistema de admisión y escape	Cambio de ducto de admisión	1	1	2	1	1	4	
	Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno delanteras	3	4	6	6	2	96	
	Sistemas frenantes	Cambio de discos de freno posterior	2	3	2	6	3	30	
	Sistema de transmisión	Cambio de disco de embrague	2	8	7	6	7	138	
	Sistema de alimentación	Cambio bolla de combustible	1	2	2	5	1	10	
Chasis	Cambio de bases del tanque de combustible	1	3	3	5	4	18		
Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno traseras	4	4	6	6	2	128		

**Tabla 23 Matriz de criticidad de la unidad 180**

ANUAL								
Unidad	Sistema	Actividad	Frecuencia de fallos	Io (Impacto en la producción)	Fo (Flexibilidad operacional)	Cm (Costes de mantenimiento)	SHA (Seguridad higiene y ambiente)	CTR
180	Completo	Mantenimiento 5000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 10000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 15000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 20000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 25000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 30000 km	1	5	6	5	3	38
	Completo	Mantenimiento 35000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 40000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 45000 km	1	2	2	3	2	9
	Sistemas frenantes	Cambio discos de frenos delanteros	3	8	8	7	6	231
	Chasis	Cambio bases del motor	2	3	2	4	5	30
	Sistema de admision y escape	Cambio de ducto de admisión	1	1	2	1	1	4
	Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno delanteras	3	4	6	6	2	96
	Sistemas frenantes	Cambio de discos de freno posterior	3	4	3	4	4	60
	Sistema de transmision	Cambio de disco de embrague	2	8	7	7	7	140
Chasis	Cambio de bases del tanque de combustible	1	3	3	2	4	15	
Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno traseras	1	3	5	5	2	22	

**Tabla 24 Matriz de criticidad de la unidad 181**

ANUAL								
Unidad	Sistema	Actividad	Frecuencia de fallos	Io (Impacto en la producción)	Fo (Flexibilidad operacional)	Cm (Costes de mantenimiento)	SHA (Seguridad higiene y ambiente)	CTR
181	Completo	Mantenimiento 5000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 10000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 15000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 20000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 25000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 30000 km	1	5	6	5	3	38
	Completo	Mantenimiento 35000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 40000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 45000 km	1	2	2	3	2	9
	Sistemas frenantes	Cambio discos de frenos delanteros	1	7	8	7	6	69
	Chasis	Cambio bases del motor	1	3	2	4	5	15
	Sistema de admision y escape	Cambio de ducto de admisión	2	2	3	2	1	18
	Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno delanteras	1	3	5	5	2	22
	Sistemas frenantes	Cambio de discos de freno posterior	1	2	2	3	3	10
	Sistema de transmision	Cambio de disco de embrague	3	9	8	8	8	264
Chasis	Cambio de bases del tanque de combustible	2	5	5	4	6	70	
Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno traseras	1	3	5	5	2	22	

**Tabla 25 Matriz de criticidad de la unidad 184**

ANUAL								
Unidad	Sistema	Actividad	Frecuencia de fallos	Io (Impacto en la producción)	Fo (Flexibilidad operacional)	Cm (Costes de mantenimiento)	SHA (Seguridad higiene y ambiente)	CTR
184	Completo	Mantenimiento 5000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 10000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 15000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 20000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 25000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 30000 km	1	5	6	5	3	38
	Completo	Mantenimiento 35000 km	1	2	2	3	2	9
	Sistemas frenantes	Cambio discos de frenos delanteros	4	10	9	8	6	416
	Chasis	Cambio bases del motor	1	3	2	4	5	15
	Sistema de admision y escape	Cambio de ducto de admisión	1	1	2	1	1	4
	Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno delanteras	5	5	7	7	3	225
	Sistemas frenantes	Cambio de discos de freno posterior	1	2	2	3	3	10
	Sistema de transmision	Cambio de disco de embrague	2	8	7	7	7	140
	Chasis	Cambio de bases del tanque de combustible	1	3	3	2	4	15
	Sistemas frenantes	Cambio cilindros de freno posteriores	2	4	2	3	5	32
Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno traseras	3	4	6	6	3	99	

**Tabla 26 Matriz de criticidad de la unidad 189**

ANUAL								
Unidad	Sistema	Actividad	Frecuencia de fallos	Io (Impacto en la producción)	Fo (Flexibilidad operacional)	Cm (Costes de mantenimiento)	SHA (Seguridad higiene y ambiente)	CTR
189	Completo	Mantenimiento 5000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 10000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 15000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 20000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 25000 km	1	2	2	3	2	9
	Sistemas frenantes	Cambio discos de frenos delanteros	2	7	8	7	6	138
	Chasis	Cambio bases del motor	1	3	2	4	5	15
	Sistema de admision y escape	Cambio de ducto de admisión	1	1	2	1	1	4
	Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno delanteras	2	3	6	6	3	54
	Sistemas frenantes	Cambio de discos de freno posterior	1	2	2	3	3	10
	Sistema de transmision	Cambio de disco de embrague	1	7	6	6	6	54
	Chasis	Cambio de bases del tanque de combustible	1	3	3	2	4	15
	Sistema de alimentacion	Reparación bomba e inyectores de combustible	1	8	8	9	5	78
Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno traseras	1	3	5	5	2	22	

**Tabla 27 Matriz de criticidad de la unidad 190**

ANUAL								
Unidad	Sistema	Actividad	Frecuencia de fallos	Io (Impacto en la producción)	Fo (Flexibilidad operacional)	Cm (Costes de mantenimiento)	SHA (Seguridad higiene y ambiente)	CTR
190	Completo	Mantenimiento 5000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 10000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 15000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 20000 km	1	3	4	5	3	20
	Sistemas frenantes	Cambio discos de frenos delanteros	1	7	8	7	6	69
	Chasis	Cambio bases del motor	1	3	2	4	5	15
	Sistema de admision y escape	Cambio de ducto de admisión	1	1	2	1	1	4
	Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno delanteras	1	3	5	5	2	22
	Sistema de transmision	Cambio de disco de embrague	1	7	6	6	6	54
	Chasis	Cambio de bases del tanque de combustible	1	3	3	2	4	15

**Tabla 28 Matriz de criticidad de la unidad 192**

ANUAL								
Unidad	Sistema	Actividad	Frecuencia de fallos	Io (Impacto en la producción)	Fo (Flexibilidad operacional)	Cm (Costes de mantenimiento)	SHA (Seguridad higiene y ambiente)	CTR
192	Completo	Mantenimiento 5000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 10000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 15000 km	1	2	2	3	2	9
	Completo	Mantenimiento 20000 km	1	3	4	5	3	20
	Completo	Mantenimiento 25000 km	1	2	2	3	2	9
	Sistemas frenantes	Cambio discos de frenos delanteros	4	10	9	8	6	416
	Chasis	Cambio bases del motor	1	3	2	4	5	15
	Sistema de admision y escape	Cambio de ducto de admisión	2	2	3	2	1	18
	Sistemas frenantes	Cambio de pastillas de freno delanteras	5	5	7	7	3	225
	Sistemas frenantes	Cambio de discos de freno posterior	2	3	2	3	3	24
	Sistema de transmision	Cambio de disco de embrague	2	8	7	7	7	140
	Chasis	Cambio de bases del tanque de combustible	1	3	3	2	4	15
	Sistemas frenantes	Cambio cilindros de freno posteriores	2	4	2	3	5	32
	Cabina	Cambio parabrisas delantero	1	7	6	8	4	54
	Chasis	Cambio parachoques delantero	2	4	3	5	4	42
	Motor	Overhaul (reparacion de motor)	1	10	10	10	10	120
	Sistema de alimentacion	Cambio de tanque de combustible	1	3	2	3	3	12
		Cambio de pastillas de freno traseras	2	3	5	5	2	44

### 5.2.5. Paso 5.

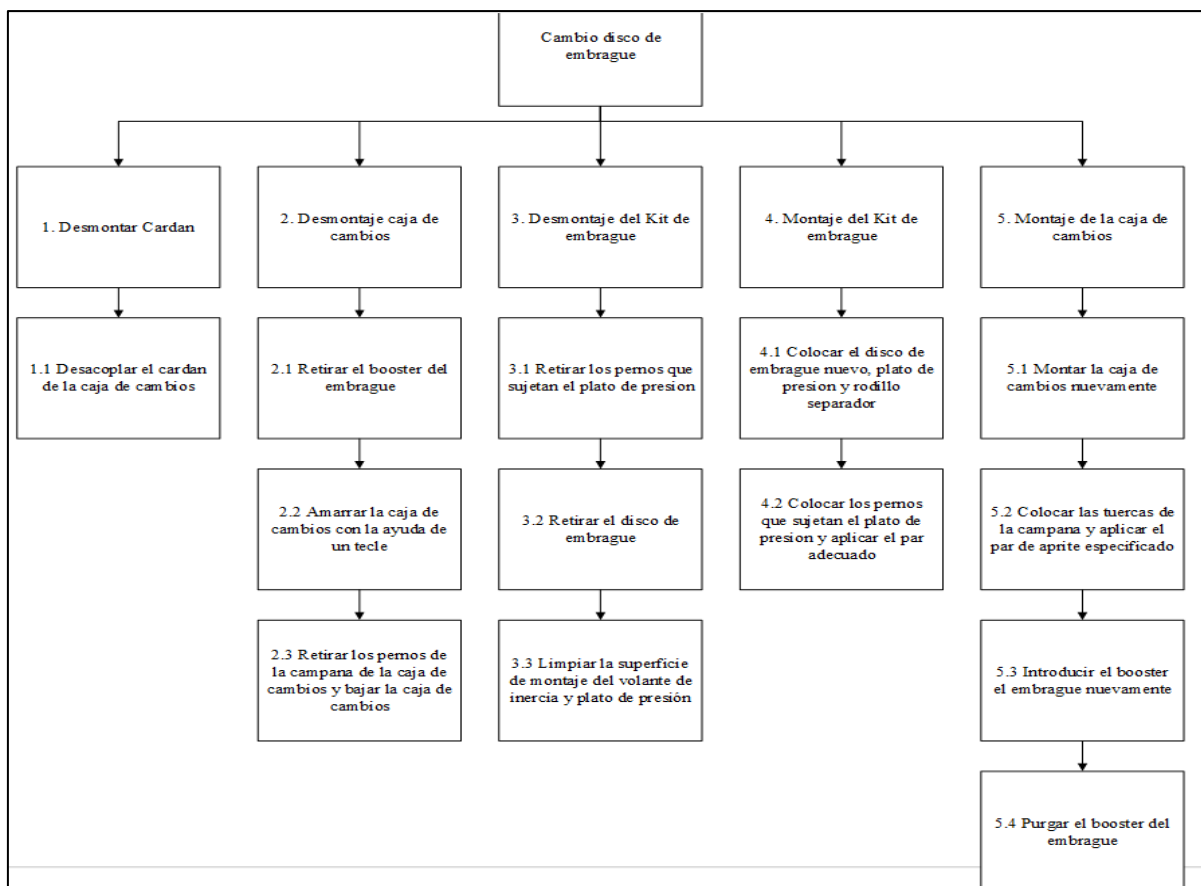
La matriz de criticidad ofrece cuáles son las tareas con más riesgo para los operarios y mecánicos se utilizarán solo aquellas actividades cuya CTR supere el valor de 100 y con eso se procede a aplicar la metodología THERP.

Las actividades contabilizando todas las unidades y que ofrecen una mayor criticidad son:

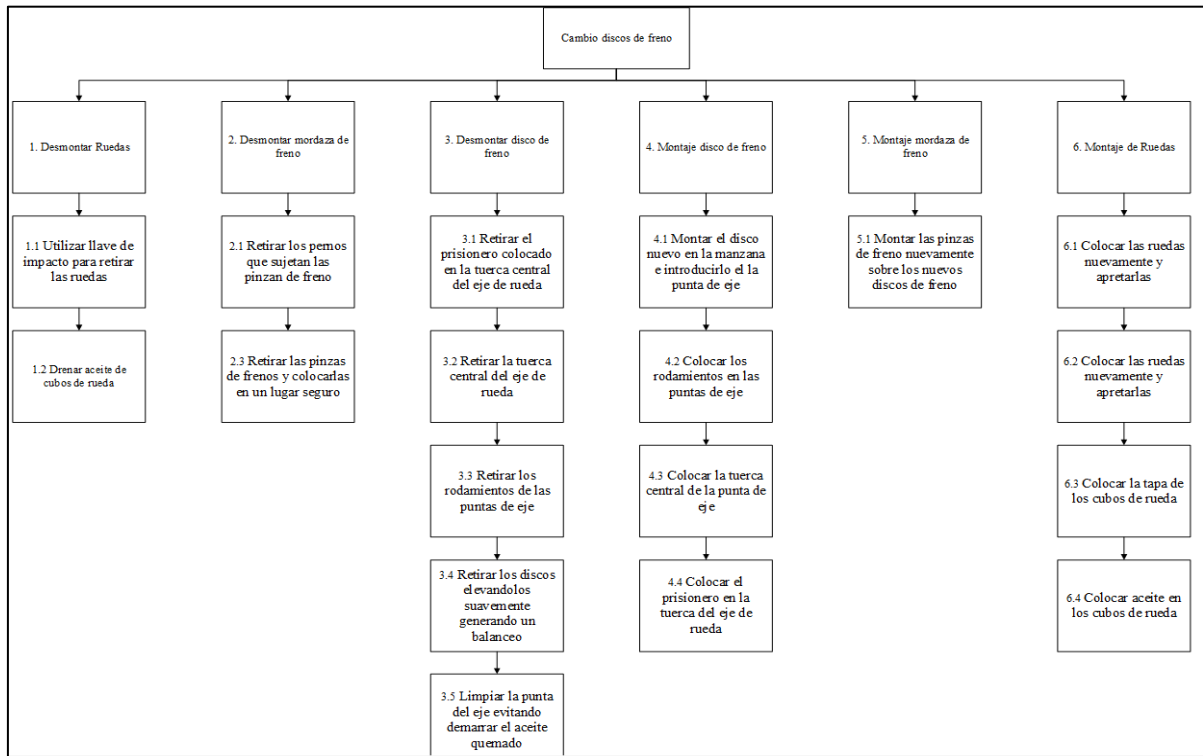
- Cambio de discos de embrague.
- Cambio de discos de freno delanteros.
- Cambio de pastillas de frenos delanteros y posteriores.
- Overhaul (reparación del motor).

La criticidad de estas actividades radica sobre todo en la frecuencia con la que son realizadas por el mecánico, y en casos como el overhaul; el precio, tiempo de parada y mayor probabilidad de que el mecánico llegue a cometer errores que perjudiquen gravemente al cliente. Para ello se deben tomar en cuenta cada actividad y separarlos en subactividades para analizarlos individualmente. Las ilustraciones 4, 5, 6 y 7 muestran el desglose de subactividades de cada actividad central.

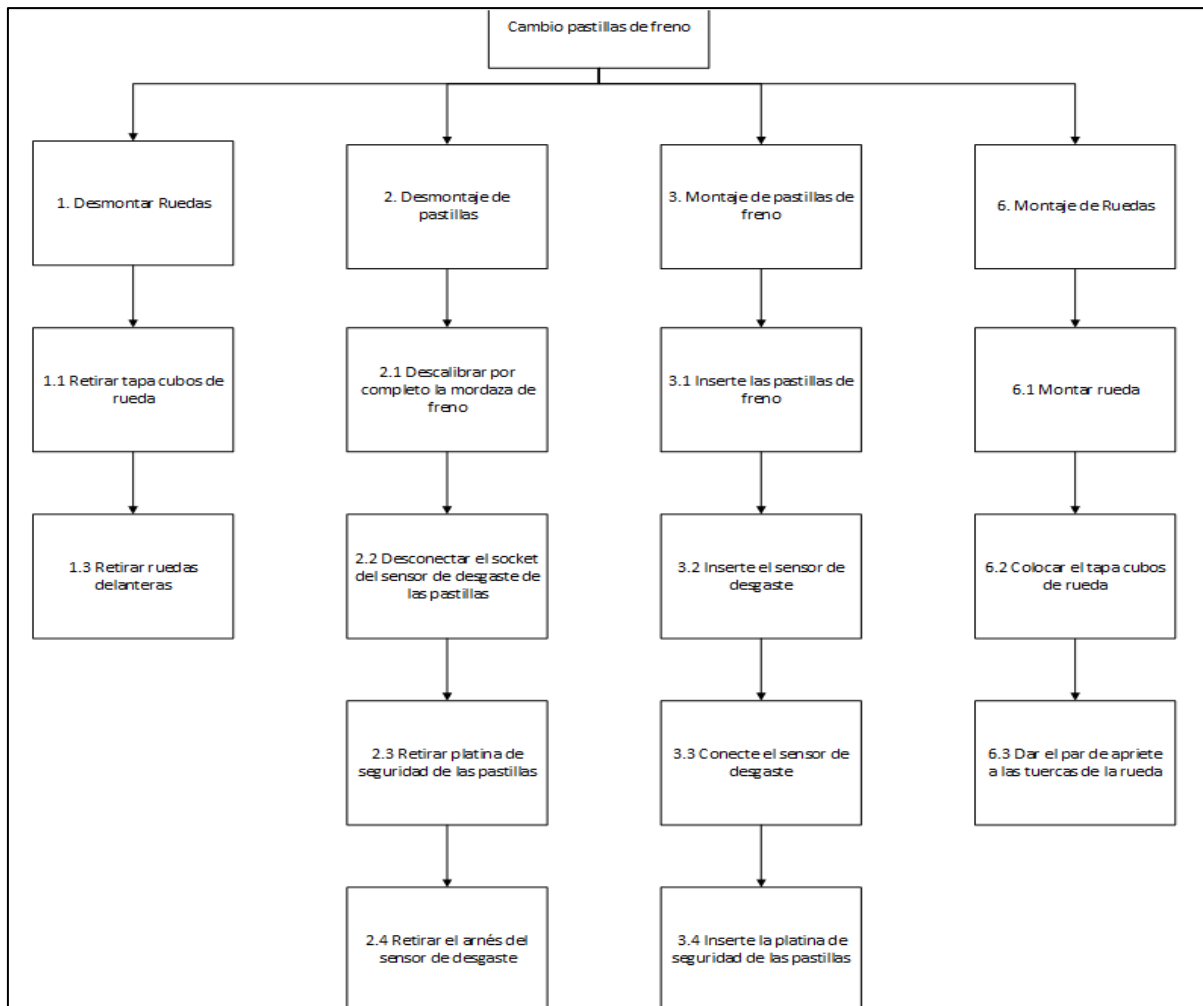
**Ilustración 4** Subactividades del cambio de discos de embrague



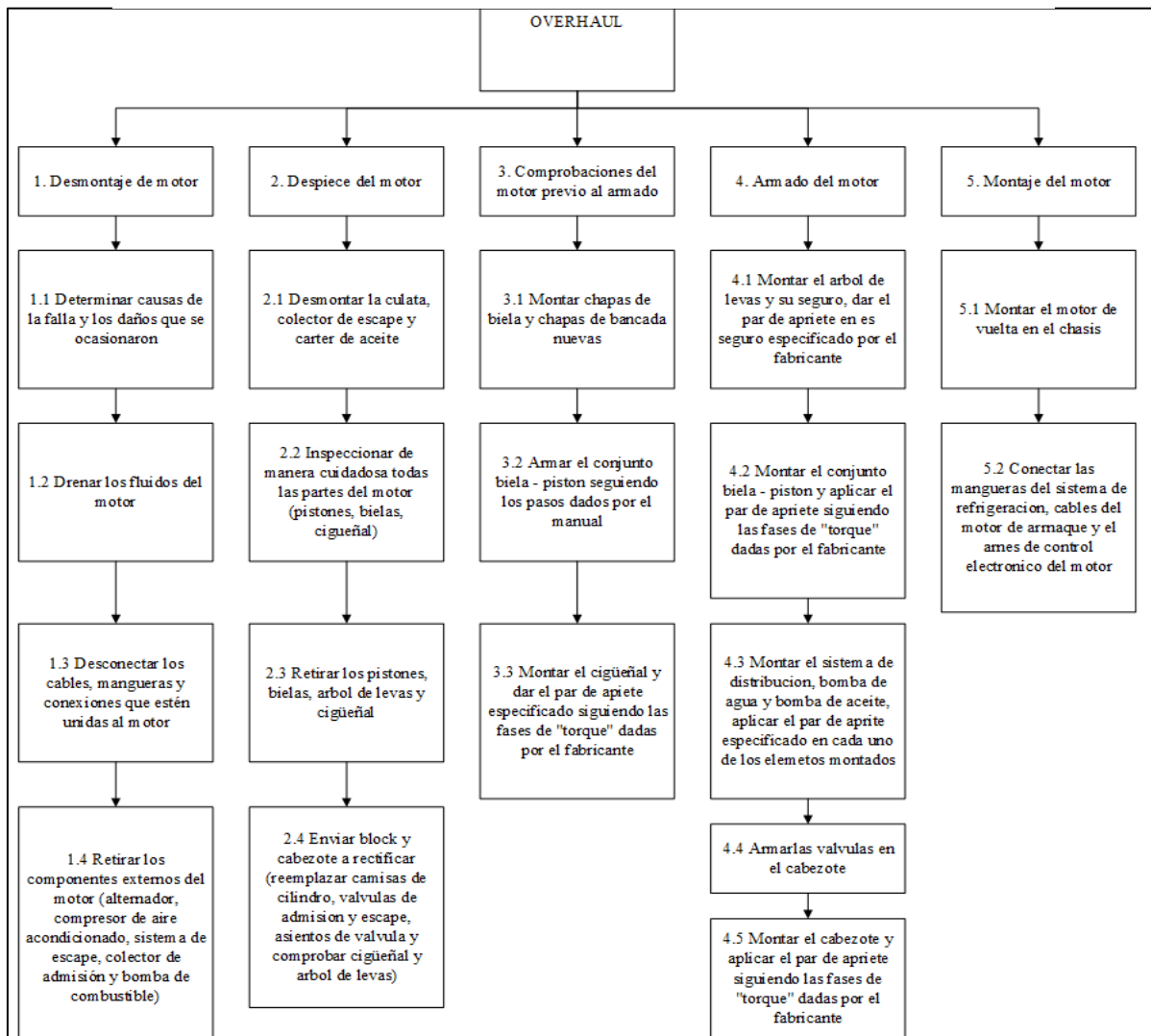
**Ilustración 5** Subactividades del cambio de discos de freno delanteros.



**Ilustración 6** Subactividades del cambio de pastillas de freno.



**Ilustración 7** Subactividades del overhaul.



**5.2.6. Paso 6.**

Una vez descritas las subactividades se procede a clasificar el tipo de error que pueden generarse de las mismas tomándose en cuenta dos tipos de errores para estos procesos, mismos que se detallan en la ilustración 8. Este paso es más concretamente el análisis y clasificación de errores.

**Ilustración 8** Tipos de errores aplicados en la metodología.

TIPO DE ERROR	DESCRIPCIÓN
<b>Omisión</b>	Omite toda la tarea o pasos para cumplir con la misma.
<b>Acción</b>	Mala selección de herramientas, adelantar o retrasar un paso del proceso, realizarlo con mayores o menores medidas



Clasificarlas servirá para conocer cómo puede verse afectado el proceso o el resultado de las actividades, además de que será de mucha importancia ya que según el tipo se le podrá dar un valor cuantitativo en el árbol de eventos. Las tablas 29, 30, 31 y 32 muestran en qué tipo de error se enmarcaron cada subactividad.

**Tabla 29** Tipo de error para las subtareas del cambio de discos de embrague.

<b>CAMBIO DE DISCOS DE EMBRAGUE</b>				
<b>Código</b>	<b>Subtareas</b>	<b>Tipo de error humano</b>	<b>Descripción del error</b>	<b>Consecuencias del error</b>
A01	Desacoplar el cardan de la caja de cambios	ERROR DE ACCIÓN	Daño en la punta del cardan al momento de desacoplar	Golpes al momento de transmitir el movimiento
A02	Retirar el booster del embrague	ERROR DE ACCIÓN	Dañar los pernos de sujeción del booster	Sujeción inadecuada del booster
A03	Amarrar la caja de cambios con la ayuda de un tecele	ERROR DE ACCIÓN	Sujeción incorrecta de la caja de cambios	Daño en el piloto de entrada de la caja de cambios
A04	Retirar los pernos de la campana de la caja de cambios y bajar la caja de cambios	ERROR DE OMISIÓN	Dañar el piloto de entrada de la caja al momento de separar la caja de cambios	Golpes en la caja de cambios
A05	Retirar los pernos que sujetan el plato de presión	ERROR DE ACCIÓN	Daño en la cabeza de sujeción de los pernos	Ajuste inadecuado de los pernos del plato de presión
A06	Retirar el disco de embrague	ERROR DE ACCIÓN	Daño a la salud por aspirar asbesto	Afección al sistema respiratorio
A07	Limpiar la superficie de montaje del volante	ERROR DE OMISIÓN	Oxidación del volante motor por uso inadecuado de fluidos	Desgaste temprano del disco de embrague

	de inercia y plato de presión			
A08	Colocar el disco de embrague nuevo, plato de presión y rodillo separador	ERROR DE ACCIÓN	Centrado inadecuado del disco de embrague	Mal funcionamiento del disco de embrague
A09	Colocar los pernos que sujetan el plato de presión y aplicar el par adecuado	ERROR DE ACCIÓN	Aplicación inadecuada del par de ajuste del plato de presión	Mal funcionamiento del disco de embrague
A10	Montar la caja de cambios nuevamente	ERROR DE OMISIÓN	Centrado inadecuado del piloto de entrada de la caja de cambios	Daño en el buje interior del piloto de entrada de la caja de cambios
A11	Colocar las tuercas de la campana y aplicar el par de apriete especificado	ERROR DE OMISIÓN	No aplicar el par de apriete adecuado	Vibraciones en la caja de cambios
A12	Introducir el booster el embrague nuevamente	ERROR DE OMISIÓN	No centrar el piloto de acción del booster	El embrague no separa el movimiento
A13	Purgar el booster del embrague	ERROR DE OMISIÓN	No purgar el booster	Las marchas engranan de manera difícil

**Tabla 30** Tipo de error para las subtareas del cambio de discos de freno delanteros.

<b>CAMBIO DE DISCOS DE FRENOS DELANTEROS</b>				
<b>Código</b>	<b>Subtareas</b>	<b>Tipo de error humano</b>	<b>Descripción del error</b>	<b>Consecuencias del error</b>

A01	Utilizar llave de impacto para retirar las ruedas	ERROR DE OMISIÓN	Aislar las tuercas de las ruedas	Daños en las manzanas del vehículo
A02	Drenar el aceite de las puntas de los cubos de rueda	ERROR DE OMISIÓN	Romper las tapas de los cubos de rueda	Fugas de aceite a futuro
A03	Retirar los pernos que sujetan las pinzas de freno	ERROR DE OMISIÓN	Aislar los pernos que sujetan las mordazas de freno	Mal ajuste de la mordaza
A04	Retirar las pinzas de frenos y colocarlas en un lugar seguro	ERROR DE ACCIÓN	Dañar las cañerías de aire	Fallos en el sistema de freno, falta de presión de aire
A05	Retirar el prisionero colocado en la tuerca central del eje de rueda	ERROR DE OMISIÓN	Dañar la cabeza del prisionero	No ajuar el prisionero adecuadamente
A06	Retirar la tuerca central del eje de rueda	ERROR DE ACCION	Dañar la cabeza de la tuerca	No ajustar la tuerca adecuadamente
A07	Retirar los rodamientos de las puntas de eje	ERROR DE ACCION	Dañar los rodamientos	Ruidos en el vehículo al momento de funcionar
A08	Retirar los discos elevándolos suavemente generando un balanceo	ERROR DE ACCIÓN	Dañar el retenedor de la punta de eje	Fugas de aceite de las puntas de eje
A09	Limpiar la punta del eje evitando demarrar el aceite quemado	ERROR DE OMISIÓN	Dañar la rosca de la punta de eje	Ajuste inadecuado de la tuerca central

A10	Separar el disco de freno de la manzana	ERROR DE ACCIÓN	Dañar la cabeza de los pernos que sujetan la manzana al disco	Ajuste inadecuado de la manzana con el disco
A11	Montar el disco nuevo en la manzana e introducirlo en la punta de eje	ERROR DE ACCION	Aislar los pernos que sujetan la manzana con el disco	Ruptura de los pernos, falta de eficiencia de frenado
A12	Colocar los rodamientos en las puntas de eje	ERROR DE ACCIÓN	Dañar los rodamientos	Ruidos en el vehículo al momento de funcionar
A13	Colocar la tuerca central de la punta de eje	ERROR DE ACCIÓN	Dañar la cabeza de la tuerca	No ajustar la tuerca adecuadamente
A14	Colocar el prisionero en la tuerca del eje de rueda	ERROR DE ACCION	Dañar la cabeza del prisionero	No ajustar el prisionero adecuadamente
A15	Montar las pinzas de freno nuevamente sobre los nuevos discos de freno	ERROR DE ACCIÓN	Golpear el disco de freno con la mordaza	Falta de eficiencia de freno, ruidos al momento de frenar
A16	Colocar las ruedas nuevamente y apretarlas	ERROR DE OMISIÓN	No dar el par de apriete adecuado a las tuercas de la rueda	Golpes en la rueda
A17	Colocar la tapa de los cubos de rueda	ERROR DE ACCION	Ajuste excesivo en la tapa de los cubos de rueda	Fuga de aceite de los cubos de rueda

A18	Colocar aceite en los cubos de rueda	ERROR DE OMISIÓN	Nivel de aceite muy alto o muy bajo	Daños en la punta del eje del vehículo
-----	--------------------------------------	------------------	-------------------------------------	--

*Tabla 31 Tipo de error para las subtareas del cambio de pastillas de freno.*

<b>CAMBIO DE PASTILLAS DE FRENO</b>				
<b>Código</b>	<b>Subtareas</b>	<b>Tipo de error humano</b>	<b>Descripción del error</b>	<b>Consecuencias del error</b>
A01	Retirar tapa cubos de las ruedas	ERROR DE OMISIÓN	Dañar el tapacubos	Ruptura del elemento
A02	Retirar ruedas delanteras	ERROR DE ACCIÓN	No aflojar bien las tuercas	Aislar las tuercas de la rueda
A03	Descalibrar por completo la mordaza de freno	ERROR DE OMISIÓN	No descalibrar como se deben las mordazas	Dañar los pistones de las mordazas
A04	Desconectar el socket del sensor de desgaste de las pastillas	ERROR DE OMISIÓN	Olvidar desconectar el cable	Ruptura o daño del elemento por mala maniobra
A05	Retirar la platina de seguridad de las pastillas	ERROR DE ACCIÓN	La platina queda sujeta en su lugar	Impedimento para poder retirar la pastilla desgastada
A06	Retirar el arnés del sensor de desgaste	ERROR DE ACCIÓN	Dejar conectado el arnés	Ruptura o daño del elemento al momento de intentar sacarlo
A07	Retirar las pastillas de freno	ERROR DE ACCIÓN	No realizar la maniobra con habilidad	Dañar elementos conjuntos por mala maniobra

A08	Insertar las pastillas de freno	ERROR DE ACCIÓN	No realizar la maniobra con habilidad	Dañar las nuevas pastillas generando gastos o mal funcionamiento
A09	Insertar el sensor de desgaste	ERROR DE OMISIÓN	Olvidar conectar el sensor de desgaste	Se activa un foco en el tablero en señal de desconexión
A10	Insertar la platina de seguridad de las pastillas	ERROR DE ACCIÓN	Olvidar poner la platina de seguridad	Genera incertidumbre al momento de conocer como están trabajando las pastillas
A11	Calibrar las mordazas de freno	ERROR DE ACCIÓN	No realizar la calibración de manera correcta	Falla de eficiencia en el frenado
A12	Montar la rueda	ERROR DE ACCIÓN	Colocar de manera incorrecta los pernos	Dañar la rosca de los pernos
A13	Colocar el tapacubos de la rueda	ERROR DE ACCIÓN	Dañar el tapacubos	Ruptura del elemento
A14	Dar el par de apriete a las tuercas de la rueda	ERROR DE ACCIÓN	No aplicar el par de apriete adecuado	La llanta puede quedar floja

**Tabla 32** Tipo de error para las subtareas del overhaul.

<b>OVERHAUL</b>				
<b>Código</b>	<b>Subtareas</b>	<b>Tipo de error humano</b>	<b>Descripción del error</b>	<b>Consecuencias del error</b>

A01	Determinar causas de la falla y los daños que se ocasionaron	ERROR DE OMISIÓN	Omitir posibles causas por las que el motor sufrió daños	Motor vuelve a sufrir daños o el diagnóstico es equivocado
A02	Drenar los fluidos del motor	ERROR DE OMISIÓN	No drenar los fluidos del motor	Derramamiento de fluidos al ambiente
A03	Desconectar los cables, mangueras y conexiones que estén unidas al motor	ERROR DE OMISIÓN	No desconectar las mangueras y cables del motor	Ruptura del arnés, ruptura de las mangueras, daños en los sensores de control del motor, daño al radiador del motor.
A04	Retirar los componentes externos del motor (alternador, compresor de aire acondicionado, sistema de escape, colector de admisión y bomba de combustible)	ERROR DE ACCIÓN	Retirar de manera inadecuada los componentes del motor	Daño a los componentes externos generando un mayor gasto en la reparación
A05	Desmontar la culata, colector de escape y cárter de aceite	ERROR DE ACCIÓN	Desmontaje inadecuado de la culata y colectores	Torcedura de la culata o daño en los colectores de admisión y escape
A06	Inspeccionar de manera cuidadosa todas las partes del motor (pistones, bielas, cigüeñal)	ERROR DE OMISIÓN	Omitir posibles daños en las partes móviles del motor	Daño generado nuevamente en el motor

A07	Desmontar el ventilador del motor en conjunto con el deflector del ventilador ubicado en el radiador	ERROR DE ACCIÓN	Desmontar de manera inadecuada el ventilador y el deflector	Ruptura del ventilador y deflector
A08	Desmontar el motor y ubicarlo en una mesa apropiada para su despiece	ERROR DE ACCIÓN	Mala ubicación del motor	Golpes y daños en el motor
A09	Retirar los pistones, bielas, árbol de levas y cigüeñal	ERROR DE ACCIÓN	Mal desmontaje del árbol de levas y cigüeñal	Aumento en el costo de reparación del motor
A10	Enviar block y cabezote a rectificar (reemplazar camisas de cilindro, válvulas de admisión y escape, asientos de válvula y comprobar cigüeñal y árbol de levas)	ERROR DE ACCIÓN	Mal asentamiento de válvulas, mal asentamiento de camisas, comprobación del cigüeñal y árbol de levas mal realizada	Fallo del motor de manera prematura, consumo de aceite y refrigerante y golpes en el motor al momento de funcionar
A11	Montar chapas de biela y chapas de bancada nuevas	ERROR DE ACCIÓN	Mal montaje de chapas	Golpes y daños en el motor al momento de funcionar



A12	Armar el conjunto biela - pistón siguiendo los pasos dados por el manual	ERROR DE ACCIÓN	Mal armado del conjunto	Motor no va a girar
A13	Montar el cigüeñal y dar el par de apriete especificado siguiendo las fases de "torque" dadas por el fabricante	ERROR DE ACCIÓN	Aplicación inadecuada del par	Daños en el motor de manera prematura
A14	Montar el árbol de levas y su seguro, dar el par de apriete en es seguro especificado por el fabricante	ERROR DE ACCIÓN	Mal montaje de árbol de levas y cigüeñal	Daños en el motor de manera prematura
A15	Montar el conjunto biela - pistón y aplicar el par de apriete siguiendo las fases de "torque" dadas por el fabricante	ERROR DE ACCIÓN	Mal montaje del conjunto	El motor no va a girar

A16	Montar el sistema de distribución, bomba de agua y bomba de aceite, aplicar el par de apriete especificado en cada uno de los elementos montados	ERROR DE ACCIÓN	Montaje inadecuado del sistema de distribución, bomba de agua y bomba de aceite	Daños en el motor de manera prematura y golpes de válvulas
A17	Armar las válvulas en el cabezote	ERROR DE ACCIÓN	Armado inadecuado de las válvulas	Golpes de válvulas al momento de funcionar
A18	Montar el cabezote y aplicar el par de apriete siguiendo las fases de "torque" dadas por el fabricante	ERROR DE ACCIÓN	Par de apriete mal aplicado	Fugas de refrigerante y aceite por el cabezote
A19	Montar los múltiples de admisión y escape, aplicar el par de apriete especificado por el fabricante	ERROR DE ACCIÓN	Par de apriete mal aplicado	Perdida de fuerza del motor

A20	Montar la bomba de combustible, cárter y sistema de alimentación de combustible aplicando el par de apriete en cada elemento montado	ERROR DE ACCIÓN	Mal montaje de cárter, bomba de combustible y sistema de alimentación	Fugas de aceite y combustible
A21	Calibrar válvulas según las tolerancias dadas por el fabricante y montar la tapa de válvulas	ERROR DE ACCIÓN	Válvulas mal calibradas	Golpe de válvulas al momento de funcionar, pérdida de fuerza del motor
A22	Montar el motor de vuelta en el chasis	ERROR DE ACCIÓN	Golpes en el cárter del motor durante el montaje	Fugas de aceite y combustible
A23	Conectar las mangueras del sistema de refrigeración, cables del motor de arranque y el arnés de control electrónico del motor	ERROR DE ACCIÓN	Mangueras y cables mal ajustados	Fugas de refrigerante y arranque del motor tardío

### 5.2.7. Paso 7

Este paso consiste en aplicar el árbol de eventos en dónde se darán valores de predicción según el tipo de error que se esté dando, la ilustración 9 muestra cuáles serán dichos valores.

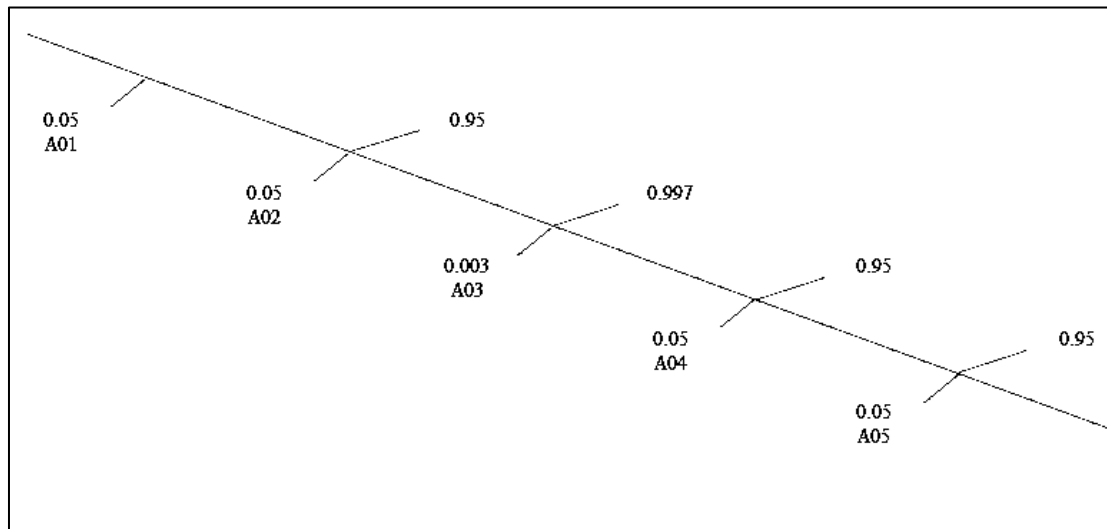
**Ilustración 9** Valores de probabilidad según el tipo de error

Tipo de error	Probabilidad de que se haga bien	Probabilidad de que se cometa un error
<b>Acción</b>	0.95	0.05
<b>Omisión</b>	0.997	0.003

Nota. Ilustración adaptada de las tablas 20-2 y 20-5 de Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications (Swain & Guttman, 1983).

Ahora bien, el árbol de eventos se lo desarrollará de manera secuencial dado que las subactividades son de esta manera, de modo que el árbol tenga la forma que muestra la ilustración 10.

**Ilustración 10** Árbol de eventos de manera secuencial.



Nota. En la parte inferior se aprecian los valores de lo que corresponde a la probabilidad de error de cada subactividad, y en la parte superior la probabilidad de acierto.

Se debe calcular con la ayuda de este árbol de eventos la incertidumbre que generan cada actividad, la fórmula es muy sencilla, se empieza poniendo directamente el valor de error que tenga la subactividad 1, luego para la subactividad 2 se multiplicará el valor previo de la 1 por el valor de acierto de la 2 y así sucesivamente. Quedando la incertidumbre nominal de la siguiente manera:

$$A01 = 0.05$$

$$A02 = 0.05 * 0.95 = 0.0475$$

$$A03 = 0.0475 * 0.997 = 0.0473$$

Además de calcular el valor nominal de cada tarea, se calcularán límites inferiores y superiores, que se calculan de la siguiente manera

$$Lim\ Sup = Incertidumbre\ nominal * 5 \quad eq\ (10)$$

$$Lim\ Inf = \frac{Incertidumbre\ nominal}{5} \quad eq\ (11)$$

En las tablas 33, 34, 35 y 36 se detalla el cálculo de la incertidumbre con sus respectivos límites de cada tarea principal que eran 4.

**Tabla 33** Cálculo de incertidumbres del cambio de disco de embrague.

<b>DISCOS DE EMBRAGUE</b>			
<b>Fallo</b>	<b>Valor nominal</b>	<b>Limite inferior de incertidumbre</b>	<b>Limite superior de incertidumbre</b>
A01	0.003	0.00060	0.015
A02	0.00285	0.000570	0.01425
A03	0.00271	0.000542	0.01354
A04	0.00270	0.00054	0.0135
A05	0.00256	0.00051	0.0128
A06	0.00244	0.000487	0.0122
A07	0.00243	0.000486	0.0121
A08	0.00231	0.000461	0.0115
A09	0.00219	0.000438	0.0110
A10	0.00219	0.000437	0.0109
A11	0.00218	0.000436	0.0109
A12	0.00217	0.000434	0.0109
A13	0.00217	0.000433	0.0108
<b>TOTAL</b>	<b>0.032</b>	<b>0.006</b>	<b>0.159</b>

Se puede observar que la probabilidad nominal de que ocurra un error al momento de cambiar los discos de embrague es de un 3.2%. Esto también indica que nominalmente el técnico tendrá un 96.8% de acierto.

**Tabla 34** Cálculo de incertidumbres del cambio de disco de frenos delanteros.

<b>DISCOS DE FRENO DELANTEROS</b>			
<b>Fallo</b>	<b>Valor nominal</b>	<b>Limite inferior de incertidumbre</b>	<b>Limite superior de incertidumbre</b>
A01	0.003	0.00060	0.015
A02	0.002991	0.000598	0.014955
A03	0.00298	0.000596	0.01491
A04	0.00283	0.00057	0.0142
A05	0.00282	0.00056	0.0141
A06	0.00268	0.000537	0.0134
A07	0.00255	0.000510	0.0127
A08	0.00242	0.000484	0.0121
A09	0.00241	0.000483	0.0121
A10	0.00229	0.000459	0.0115
A11	0.00218	0.000436	0.0109
A12	0.00207	0.000414	0.0103
A13	0.00197	0.000393	0.0098
A14	0.00187	0.000374	0.0093
A15	0.00177	0.000355	0.0089
A16	0.00177	0.000354	0.0088
A17	0.00168	0.000336	0.0084
A18	0.00168	0.000335	0.0084
<b>TOTAL</b>	<b>0.042</b>	<b>0.008</b>	<b>0.210</b>

Se puede observar que la probabilidad nominal de que ocurra un error al momento de cambiar los discos de freno delanteros es de un 4.2%. De manera que el técnico tendrá una probabilidad de acierto de 95.8%.

**Tabla 35** Cálculo de incertidumbres del cambio de pastillas de freno.

<b>PASTILLAS DE FRENO</b>			
<b>Fallo</b>	<b>Valor nominal</b>	<b>Limite inferior de incertidumbre</b>	<b>Limite superior de incertidumbre</b>

A01	0.003	0.00060	0.015
A02	0.00285	0.00057	0.01425
A03	0.00284	0.00057	0.01420725
A04	0.00283	0.00057	0.014164628
A05	0.00269	0.00054	0.013456397
A06	0.00256	0.00051	0.012783577
A07	0.00243	0.00049	0.012144398
A08	0.00231	0.00046	0.011537178
A09	0.00230	0.00046	0.011502567
A10	0.00219	0.00044	0.010927438
A11	0.00208	0.00042	0.010381066
A12	0.00197	0.00039	0.009862013
A13	0.00187	0.00037	0.009368912
A14	0.00178	0.00036	0.008900467
<b>TOTAL</b>	<b>0.034</b>	<b>0.007</b>	<b>0.168</b>

Se puede observar que la probabilidad nominal de que ocurra un error al momento de cambiar las pastillas de freno es de un 3.4%. Teniendo una probabilidad de acierto de 96.6%.

**Tabla 36** Cálculo de incertidumbres del overhaul.

<b>OVERHAUL</b>			
<b>Fallo</b>	<b>Valor nominal</b>	<b>Limite inferior de incertidumbre</b>	<b>Limite superior de incertidumbre</b>
A01	0.003	0.00060	0.01500
A02	0.00299	0.00060	0.01496
A03	0.00298	0.00060	0.01491
A04	0.00283	0.00057	0.01416
A05	0.00269	0.00054	0.01346
A06	0.00268	0.00054	0.01342
A07	0.00255	0.00051	0.01275
A08	0.00242	0.00048	0.01211
A09	0.00230	0.00046	0.01150
A10	0.00219	0.00044	0.01093

A11	0.00208	0.00042	0.01038
A12	0.00197	0.00039	0.00986
A13	0.00187	0.00037	0.00937
A14	0.00178	0.00036	0.00890
A15	0.00169	0.00034	0.00846
A16	0.00161	0.00032	0.00803
A17	0.00153	0.00031	0.00763
A18	0.00145	0.00029	0.00725
A19	0.00138	0.00028	0.00689
A20	0.00131	0.00026	0.00654
A21	0.00124	0.00025	0.00622
A22	0.00118	0.00024	0.00590
A23	0.00112	0.00022	0.00561
<b>TOTAL</b>	<b>0.047</b>	<b>0.009</b>	<b>0.234</b>

Se puede observar que la probabilidad nominal de que ocurra un error al momento de realizar una reparación de motor es de 4.7% Siendo esta actividad la de más alto riesgo y cuya probabilidad de acierto también es menor con respecto a sus anteriores con un porcentaje de 95.3%

### 5.2.8. Paso 8

#### Estimación de la probabilidad de error humano.

Una vez evaluados los valores de incertidumbre que se tienen por cada tarea crítica que realiza un operario es momento de evaluar los PSF (Performance Shaping Factors) por su traducción al español Factores de Incidencia o cambio de forma, estos son los que afectan al desempeño de una persona y por ende aumenta la probabilidad de errores humanos. Se les puede catalogar en dos grupos:

**PSF internos:** es cuando una persona adquiere un puesto de trabajo con conocimientos adquiridos por el mismo, para ello la empresa es la encargada de evaluar la capacitación y nivel con el que cuenta el mecánico y elabora planes de capacitación basados en la evaluación.

**PSF externos:** son las características acerca del entorno del trabajo, como el ruido, la vibración las horas que trabaja, las horas que descansa. Además de que se analiza si la empresa



estudiada cuenta con manual para desarrollar las actividades que le encomiendan al mecánico o las indicaciones solo son dadas de manera verbal.

No obstante, existe otro grupo grande de análisis que se los conoce como estresores, son los factores ligados al estrés que pueda tener una persona y que lleguen a afectarle física o mentalmente. En la ilustración 11 se observa los valores de multiplicación según el nivel de estrés y de experiencia que tenga el usuario, la norma estipula que un mecánico se considera experto si sobrepasa los seis meses de trabajo en el cargo.

**Ilustración 11** Estimación según el nivel de estrés.

<b>Nivel de estrés</b>	<b>Con experiencia</b>	<b>Sin experiencia</b>
Muy bajo	x2	x2
Óptimo	x1	x2
Moderadamente alto	x2	x4
Extremadamente alto	x5	x10

Nota. Ilustración adaptada de la tabla 20-16 de Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications.

En la tabla 37 se muestra el nivel de experiencia de los técnicos que laboran en la empresa automotriz estudiada.

**Tabla 37** Experiencia de los técnicos de la empresa automotriz.

<b>TÉCNICO</b>	<b>EXPERIENCIA EN AÑOS</b>	<b>AÑOS DE TRABAJO EN LA EMPRESA</b>	<b>EDAD (AÑOS)</b>
Técnico 1	10	4	30
Técnico 2	7	1	30
Técnico 3	27	10	45
Técnico 4	22	0.7	40
Técnico 5	2	2	21

Con la catalogación que da la normativa se puede asumir que todos los técnicos son expertos en su área de trabajo, además de que el nivel de estrés que se maneja en la empresa debido a los horarios y al sistema de trabajo se lo puede clasificar como un nivel

moderadamente alto de estrés. Siguiendo con la ecuación 12 se puede calcular la probabilidad de error humano dentro de la empresa para cada actividad según los valores de incertidumbres nominales. Por su parte las ecuaciones 13 y 14 hacen relación al cálculo de los límites superiores e inferiores.

$$HEP = NHEP * Nivel\ de\ estrés \quad eq\ (12).$$

$$HEP_{max} = LsHEP * Nivel\ de\ estrés \quad eq\ (13).$$

Donde:

Ls = Límite superior de incertidumbre

$$HEP_{min} = LiHEP * Nivel\ de\ estrés \quad eq\ (14).$$

Donde:

Li = Límite inferior de incertidumbre

En la tabla 38 se muestran los resultados de confiabilidad humana dentro de la empresa para cada actividad. Así como las tablas 39 y 40 los resultados de confiabilidad en los límites superiores e inferiores respectivamente.

**Tabla 38** Resultados de la probabilidad de error humano para cada actividad crítica.

<b>Actividad</b>	<b>Cálculo</b>	<b>HEP</b>
Cambio de discos de embrague	0.032 * 2	0.064
Cambio de discos delanteros de frenos	0.042 * 2	0.084
Cambio de pastillas de frenos	0.034 * 2	0.068
Overhaul	0.047 * 2	0.094

**Tabla 39** Resultados de la probabilidad según el límite superior de error humano para cada actividad crítica.

<b>Actividad</b>	<b>Cálculo</b>	<b>HEPmax</b>
Cambio de discos de embrague	0.159 * 2	0.318
Cambio de discos delanteros de frenos	0.210 * 2	0.42
Cambio de pastillas de frenos	0.168 * 2	0.336
Overhaul	0.234 * 2	0.468

**Tabla 40** Resultados de la probabilidad según el límite inferior de error humano para cada actividad crítica.

<b>Actividad</b>	<b>Cálculo</b>	<b>HEPmin</b>
Cambio de discos de embrague	0.006 * 2	0.012
Cambio de discos delanteros de frenos	0.008 * 2	0.016
Cambio de pastillas de frenos	0.007 * 2	0.014
Overhaul	0.009 * 2	0.018

Para el análisis de procesos críticos se tomarán en cuenta los HEP máximos ya que estos nos indican que existen valores de error muy altos, teniendo por ejemplo en el overhaul un porcentaje de 47% de probabilidad de error y teniendo un porcentaje de éxito de apenas el 53% siendo esto un valor muy bajo para un proceso tan complejo y de tanta importancia.

## 6. CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE PROCESOS CRÍTICOS EN ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

Los resultados de probabilidad de error humano en cuanto a su límite máximo supone que cada actividad tiene su grado de complejidad, de esta manera se evaluará los pasos que tiene cada una de estas y se buscará una solución que ayude a disminuir la probabilidad de error.

### 6.1. Diagramas UML

Este tipo de diagramas son utilizados para modelar flujos de trabajo o procesos empresariales, su utilización radica en las siguientes ventajas; facilita la comprensión de ideas y de cómo están funcionando sistemas que pueden parecer complejos, de tratarse de códigos o normativas guiadas por la empresa estos diagramas los convierten en un método visual y fácil de entender, además permite tener un concepto global del proceso.

**Diagramas UML de secuencia:** este tipo de diagrama será utilizado en el presente proyecto, ya que con este se puede representar como los procesos llegan a interactuar entre sí, además de conocer de mejor manera como ciertos pasos y acciones afectan directamente al siguiente paso.

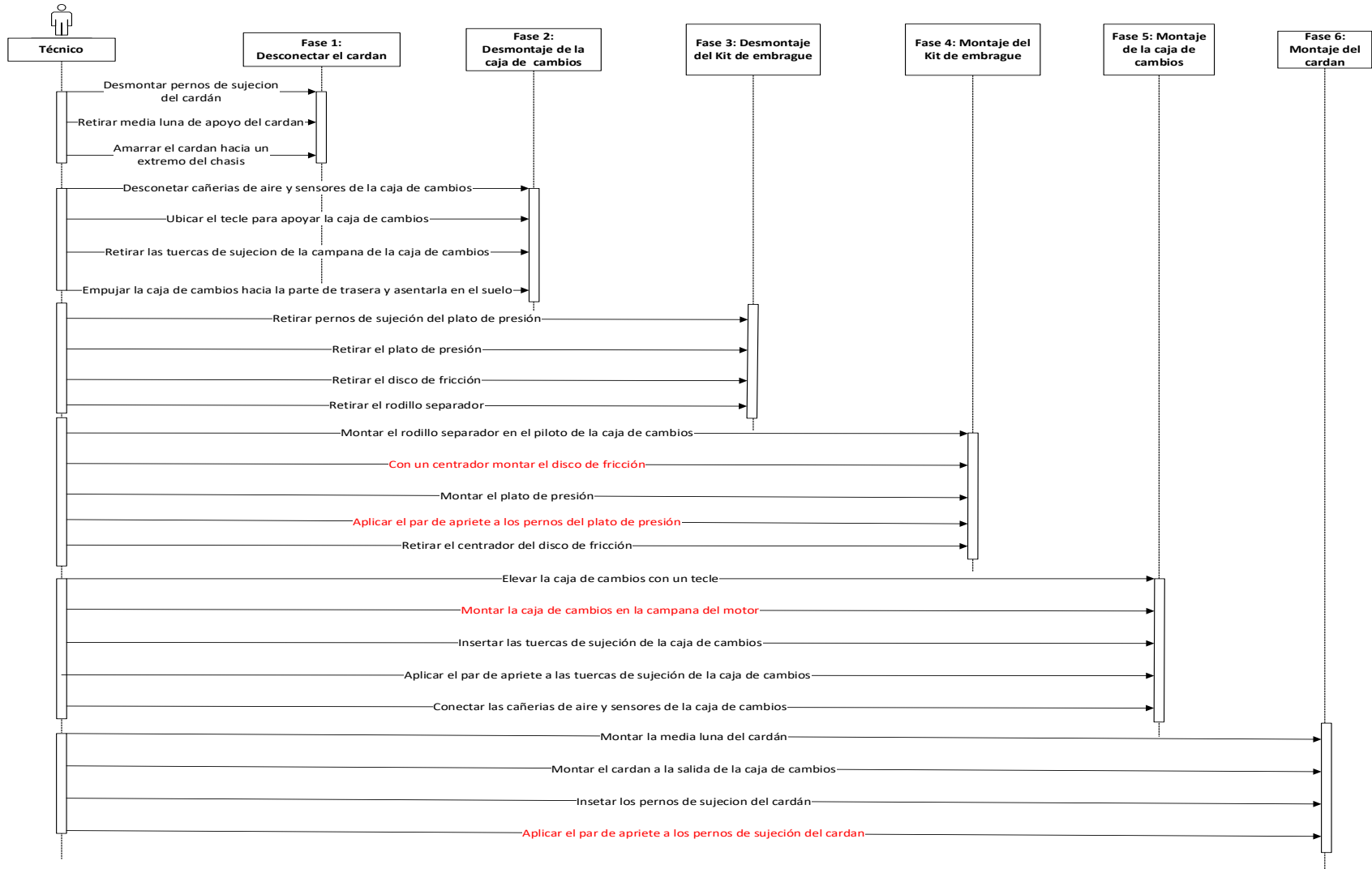
### 6.2. Aplicación de los diagramas UML a las actividades críticas.

Cada actividad crítica evaluada en el capítulo anterior tiene subprocesos los cuáles se evaluarán a continuación de manera minuciosa para poder distinguir en donde se pueden corregir ciertos aspectos del proceso y con ello buscar mejorar las probabilidades de error. Es decir, estos ayudarán a identificar y corregir los posibles errores.

#### 6.2.1. Cambio del disco de embrague.

En la ilustración 12 se muestra el diagrama UML para esta actividad crítica, la cual cuenta con seis fases de proceso que los realiza un técnico, dentro de estos pasos, con rojo se encuentran resaltados los procesos que causan mayor conflicto dentro de la actividad y de la cual se detallará con mayor precisión a continuación.

Ilustración 12 Diagrama UML cambio de disco de embrague.



Se puede observar que dentro de los pasos los que llegan a ser críticos son: el montar el disco de fricción, el aplicar el par de apriete correcto, montar la caja de cambios en la campana del motor y nuevamente dar par de apriete en los pernos de sujeción. Los problemas de cada actividad se detallan a continuación.

**Montar el disco de fricción:** para su montaje el técnico requiere de un centrador que le facilite el cumplimiento de esta tarea, la empresa no cuenta con el centrador necesario, ya que tiene en su bodega uno para cajas Eaton Fuller que son cajas de cambio de procedencia norteamericanas, y el tipo de cajas que emplean los vehículos en los que se trabaja son ZF de procedencia europea.

El no contar con el centrador propio de la caja es que la misma quede desalineada y esto provoque fallas o demoras en el armado. Para ello se recomienda adquirir el centrador apropiado.

**Aplicar par de apriete a los pernos del plato de presión:** los técnicos suelen utilizar el mismo par de apriete en todos los platos de presión, sin tomar en cuenta la marca o las recomendaciones del fabricante, sino por pura intuición o experiencia, además de que no se toma en cuenta que al momento de utilizar extensiones o acoples el par de fuerza disminuye.

La recomendación en este caso sería una verificación de los manuales previo a realizar el paso, así como el chequeo de que se haya realizado de manera correcta el apriete.

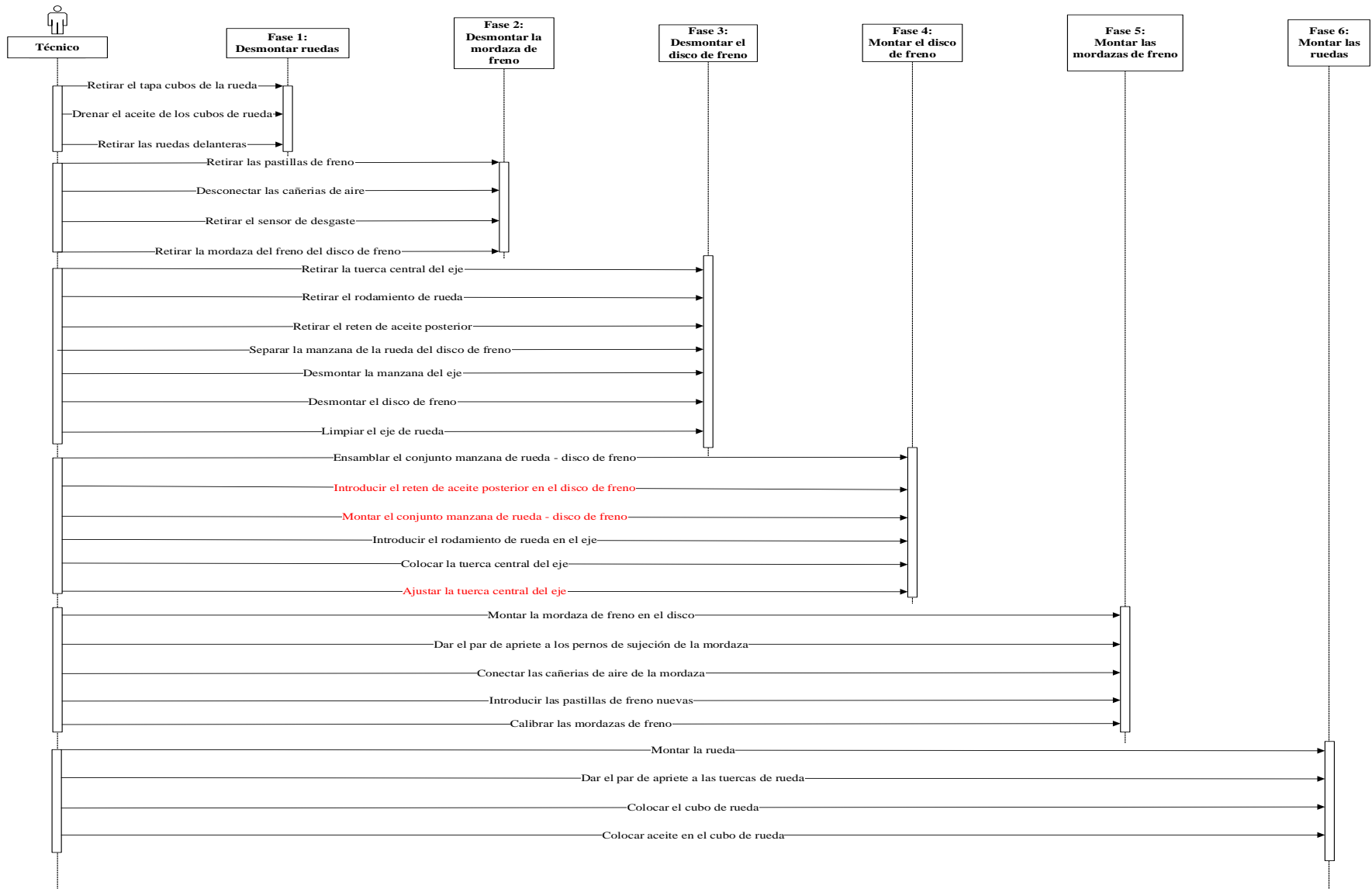
**Montar la caja de cambios en la campana del motor:** la falta de una herramienta especializada en cuanto al montaje de la caja en la campana hace que los técnicos ejerzan su fuerza y esto puede llevar a corto o largo plazo lesiones cervicales. Además, el no cuadrar bien la caja puede hacer que se golpee el piloto de entrada, causando daños no previstos y retrasos.

**Aplicar par de apriete a los pernos de sujeción del cardán:** los mismos defectos que puede llegar a generar cualquier error de no tomar en cuenta de manera apropiada los valores de par de apriete.

### 6.2.2. Cambio de discos de freno

La ilustración 13 muestra el diagrama UML de este proceso, este cuenta con seis fases que son realizadas por un técnico y que cuenta con tres pasos críticos dentro de este subproceso.

Ilustración 13 Diagrama UML cambio de discos de freno.



Cuenta con tres pasos críticos que pueden llegar a generar inconvenientes y aumentan la probabilidad de error humano; la introducción del retén posterior en el disco, el montaje del conjunto manzana de rueda disco de freno y el ajuste de la tuerca central del eje.

**Introducir el retén de aceite posterior en el disco de freno:** este paso puede tener dos tipos de errores, omisión o acción, ya que en ocasiones olvidar cambiar este elemento puede generar problemas de fugas por el desgaste del mismo, por lo tanto, se puede sugerir que siempre exista revisión y comprobación de que el elemento ha sido cambiado.

Los errores de acción más habituales en este paso son que centran mal el retén o que queda aplastado por no colocarlo bien, causando fugas de aceite a largo plazo y con esto se genera una nueva parada de la unidad.

**Montar el conjunto manzana de rueda – disco de freno:** los operarios realizan esta actividad alzando con sus propias fuerzas, lo que llega a generar a largo plazo problemas cervicales, se debe tomar en cuenta la adquisición de un teclé para facilitar esta actividad, y no causar lesiones a los técnicos.

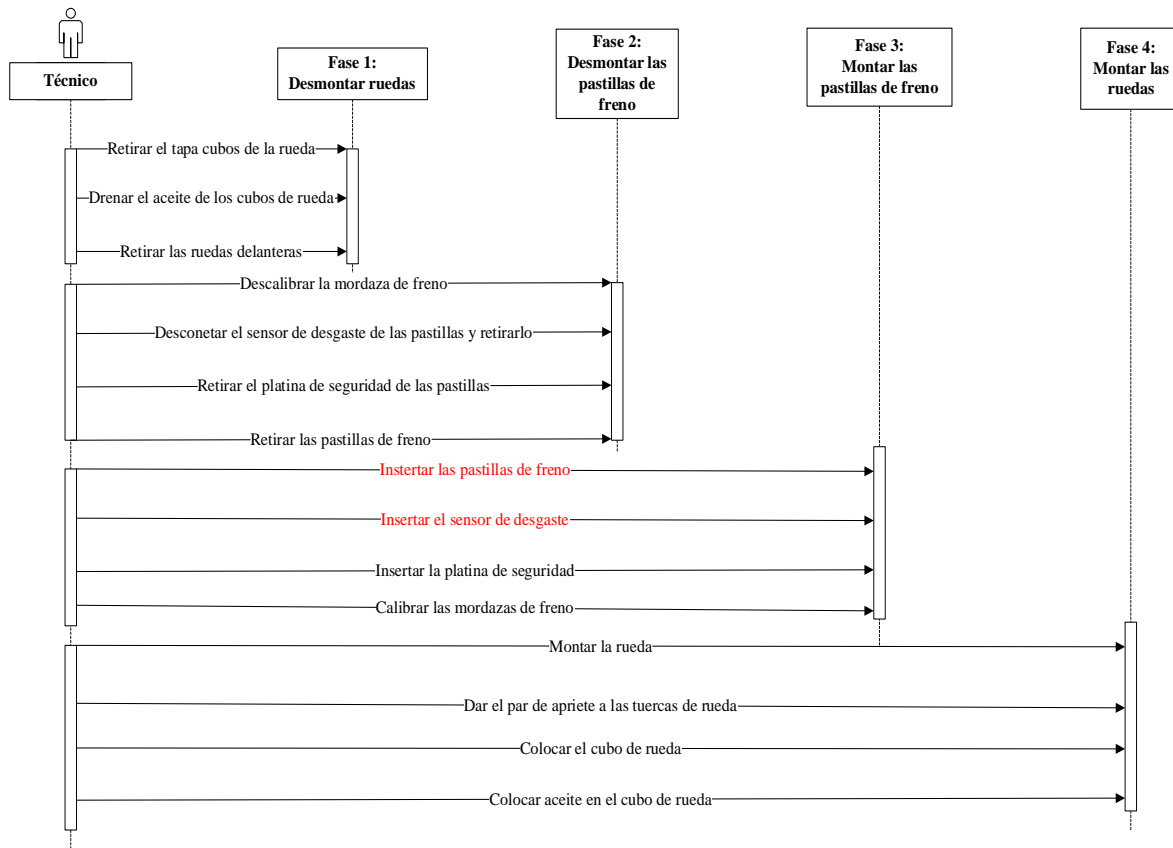
**Ajustar la tuerca central del eje:** el error de omisión de no dar el par de apriete necesario es el más común en este tipo de actividades, el que se deje floja esta tuerca va a generar inconvenientes en el disco ya que este quedará sin la fuerza necesario para trabajar. Procurar tener cuidado con este y siempre ir corroborando que esta tuerca se encuentre bien apretada y trabajando de manera correcta.

### **6.2.3. Cambio de pastillas de freno.**

La ilustración 14 muestra los pasos que contiene esta actividad con 6 fases estelares y con dos pasos críticos descritos y analizados.



**Ilustración 14** Diagrama UML cambio de pastillas de freno



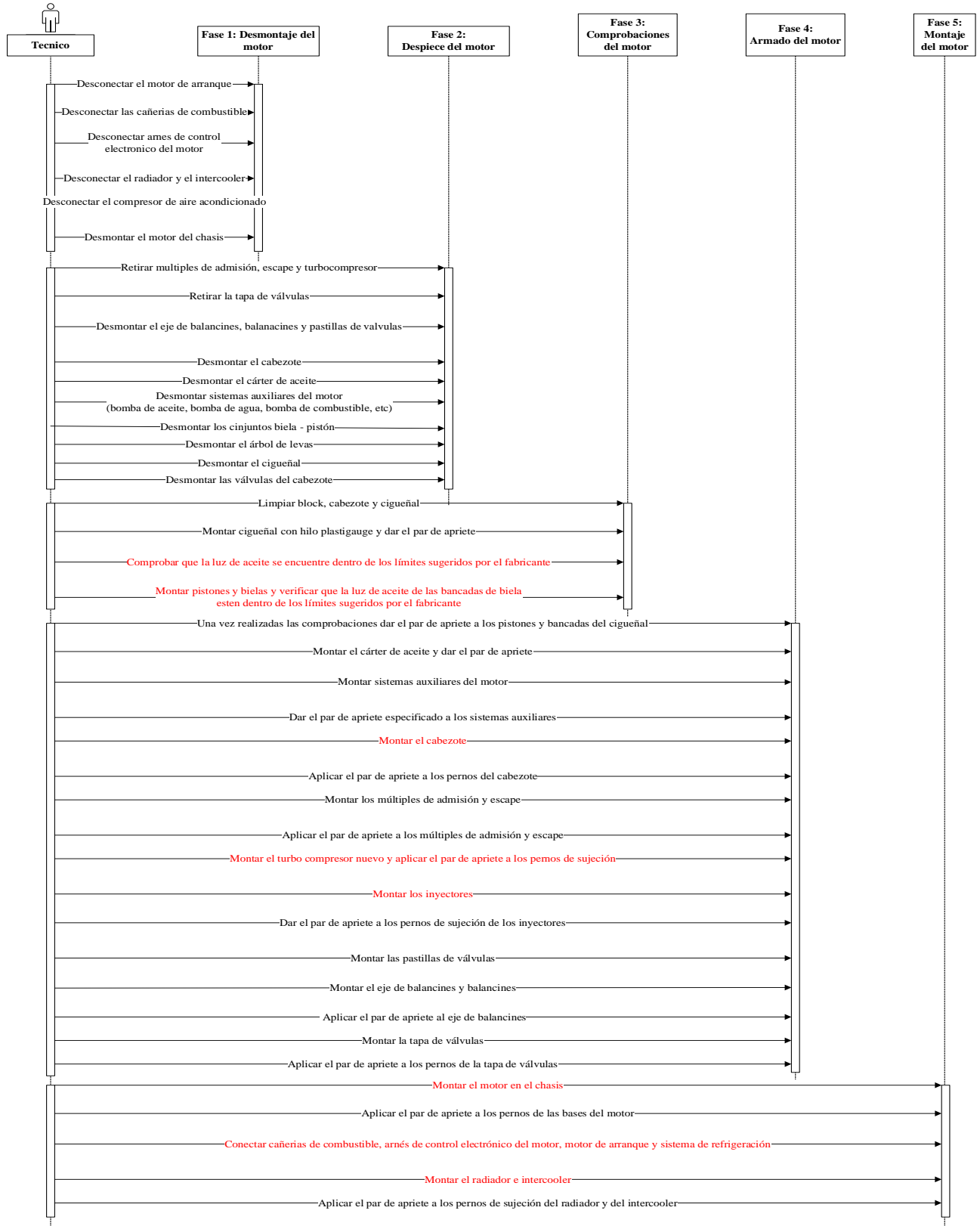
**Insertar las pastillas de freno:** centrar las pastillas debe ser un proceso fácil y sin inconvenientes, pero esto genera un exceso de confianza en los técnicos y por lo tanto se generan errores muy básicos como que las pastillas queden mal centradas y esto ocasiona pérdida de eficiencia de frenado además un desgaste prematuro de las pastillas de freno.

**Insertar el sensor de desgaste:** olvidar conectar este sensor o no tomar en cuenta si está bien conectado genera que se active una luz alarma en el tablero, no es un defecto altamente grave pero el descuido de los operarios es significativo ya que suele pasar de manera reiterada.

#### 6.2.4. Overhaul

La actividad que mayor probabilidad de error presenta, y por lo tanto también la que mayor número de pasos críticos tiene, con un total de ocho, los cuales se describen en la ilustración 15.

Ilustración 15 Diagrama UML overhaul.



**Comprobar luz de aceite:** un error común de omisión, los técnicos con frecuencia al menos en las primeras veces que realizan una reparación omiten este paso, el tener un incorrecto valor de cuanto está midiendo el aceite puede llegar a causar daños graves en el motor debido a la falta de lubricación para ello es recomendable que se tomé mucho en consideración esto a la hora de realizar la inspección.

**Montar pistones y bielas:** generalmente el pistón es montado al revés, esto provoca que el motor gire de manera inadecuada y dañe los ring, además de que siempre se debe tomar en cuenta el nivel de aceite de las bancadas, éstos deben estar en los rangos sugeridos por el fabricante, de esta manera se puede garantizar que el giro se realice de manera correcta y suave.

**Montar cabezote:** la falta de comprobación de si está bien centrado o no el cabezote es un error que suele ser poco común, pero que de darse por faltas de atención o por errores como el descuido o la confianza generan problemas muy serios, dentro de los cuales están las fugas y la falta de fuerza del motor.

**Montar turbo compresor:** error clásico de omisión sobre todo en momentos de apuro o de tener un técnico novato, es el no lubricar el turbo con ello se genera un daño al mismo que puede llegar a ser muy costoso, además de que se pueden conectar mal las cañerías de la lubricación lo que impida que el turbo trabaje bien.

**Montar los inyectores:** el principal inconveniente que se genera en este proceso es el que los técnicos no centren bien los inyectores, causando fugas o pérdidas de fuerzas, los ring se pueden llegar a dañar por montar mal, logrando que haya fugas de presión, se recomienda tener mucho cuidado y tino al momento de montar estos, además de estar siempre pendientes de que el repuesto este en óptimas condiciones.

**Montar el motor en el chasis:** por lo general los defectos que llegan a surgir de este paso se debe al poco cuidado que tienen los técnicos al momento de montar el motor, si no tienen las debidas precauciones y cautela se dan golpes en el cárter, el ventilador sufre golpes e incluso puede llegarse a romper, la consideración a tomar en cuenta es que los técnicos sean capacitados en cuánto a ser cuidadosos en estos aspectos ya que no deben ser imprudentes.

**Conexión de arnés, cañerías:** el ocasionar fugas de gasolina por mala conexión de cañerías y luego generar chispas por conectar mal la batería puede terminar en un desastre catastrófico, no solo para el técnico sino para toda la empresa, para ello llevar un orden en el

proceso es de vital importancia, saber que antes de seguir al siguiente paso se debe verificar bien que las conexiones estén establecidas de manera correcta y sin falta de apriete.

**Montaje intercooler y radiador:** tener el mayor cuidado al momento de no hacer chocar estos elementos contra otras partes, ya que una ruptura de los mismos puede generar fugas de refrigerante, y posteriormente un sobrecalentamiento en el motor.

## 7. CONCLUSIONES

Se consiguió identificar el concepto de error humano, las condiciones y factores que intervienen para que suceda el mismo, además de conceptualizar que el error humano no es un término único e individual, sino que viene arraigado directamente al entorno en el que la persona se encuentra realizando una actividad, así como el estado en el que se encuentran los equipos y maquinaria con las que trabaja. Calcular o estimar la probabilidad de error humano es algo que lleva años investigándose y evolucionando, gracias a esto han surgido diversas metodologías que se pueden aplicar a distintos campos de trabajo, siendo la metodología THERP la más relevante por sus años de existencia y versatilidad a la hora de aplicar en cualquier campo de estudio.

Se aplicó la metodología THERP en los procesos de mantenimiento dentro de la empresa, para lo cual lo esencial era primero identificar la confiabilidad de las unidades sobre las que se aplican esos procesos de mantenibilidad, resultando siete unidades críticas con valores de confiabilidad menores a 20% como se puede observar en la tabla 18. Luego se evaluaron las actividades con criticidad mayor a 120 y fueron: cambio de discos de freno, cambio de discos de embrague, cambio de pastillas y un overhaul. Con base en estos resultados se procede a categorizar las subactividades cuantificarlas en el árbol de eventos y estimar una probabilidad de error en cada actividad. Teniendo en cuenta un multiplicador por experiencia los resultados por cada actividad estimaron que en condiciones nominales; un cambio de discos de embrague tiene un 6.4% de probabilidad que suceda un error, un cambio de discos de frenos delanteros tiene 8.4% de probabilidad de error, un cambio de pastillas de freno tiene un 6.8% y un overhaul tiene un 9.4%. Y para condiciones extremas estos valores aumentan teniendo que; en un cambio de discos de embrague existe un 31.8% de probabilidad de error, un cambio de discos de freno tiene 42%, un cambio de pastillas 33.6% y un overhaul 46.8% de probabilidad de error.

Finalmente, se desmenuzó cada proceso, organizándolos en un diagrama UML, donde se identificaron que pasos son los que llegan a ser de mayor cuidado ya que si se falla en alguno de esos podría surgir grandes inconvenientes, determinando así recomendaciones para lograr disminuir las probabilidades de error en cada actividad.

## **8. RECOMENDACIONES**

Se recomienda proponer e implementar un proceso de manera continua para poder valorar las actividades que se consideraron como críticas en este proyecto, de esta manera se tendrá un seguimiento más cercano y se podrá observar si las mismas llegan a disminuir en cuanto a sus valores de criticidad.

La capacitación de manera continua al personal y a los directivos sobre la influencia de los distintos factores que colaboran al error humano debería ser esencial para que se pueda programar horarios rotativos, así como que las actividades que realizan los técnicos no sean monótonas, ya que el desconocimiento de esto puede afectar tanto a la imagen de la empresa como a la salud del personal a corto o largo plazo.

Por último, se propone que como parte de la evaluación de las unidades se analice las condiciones de manejo y uso que dan los conductores a las mismas, ya que estos juegan un papel importante en los mantenimientos y en la confiabilidad que lleguen a tener las máquinas.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelmoula, A., Khalifa, M., Mohammed, Q., & Mohamed, Y. (2017). *Task human reliability analysis for a safe operation of autonomous ship*. 8. <https://doi.org/10.1109/ICSRS.2017.8272800>
- Abrishami, S., Khakzad, N., Hosseini, S., & van Gelder, P. (2020). BN-SLIM: A Bayesian Network methodology for human reliability assessment based on Success Likelihood Index Method (SLIM). *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106647. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106647>
- Amendola, L. (2018). *MODELO DE CONFIABILIDAD HUMANA EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS*. 11.
- Anonymous. (2008). La importancia del mantenimiento del coche en invierno. *La Voz Hispanic*. <https://www.proquest.com/docview/434604767/citation/6AA0424B363B44D9PQ/1>
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. Aplicación de la Plataforma R-MES* (1.<sup>a</sup> ed.). RIL Editores. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=4ahVVXPe-nUC&oi=fnd&pg=PA193&dq=confiabilidad+operacional&ots=LNH\\_eZeFmR&sig=zEmnSkUW8ELax9HIkKnRoh39IS0#v=onepage&q=confiabilidad%20operacional&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=4ahVVXPe-nUC&oi=fnd&pg=PA193&dq=confiabilidad+operacional&ots=LNH_eZeFmR&sig=zEmnSkUW8ELax9HIkKnRoh39IS0#v=onepage&q=confiabilidad%20operacional&f=false)
- Arigi, A., & Kim, J. (2021). *Examining the effect of a proposed operator support system on human error probability estimation*. 3306-3311. [https://doi.org/10.3850/978-981-18-2016-8\\_500-cd](https://doi.org/10.3850/978-981-18-2016-8_500-cd)
- Atushi, H., Chihiro, N., & Nobuo, M. (2015). *A study on application to marine accident of human reliability analysis method*. 4. <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2015.7334048>
- Bethesda, N. (2021). ISPE Publishes ISPE Good Practice Guide: Equipment Reliability: This Guide offers best practices with respect to equipment reliability, addresses specific

- opportunities for the pharmaceutical industry beyond the general reliability of equipment, and can serve as the basis for an effective reliability program. [News]. En *PR Newswire*. PR Newswire Association LLC. <https://www.proquest.com/docview/2479454101/citation/19E81EC77B354BB6PQ/1>
- Campoverde, E. (2012). *Análisis de Fiabilidad de Equipos Rotativos de la Central Hidroeléctrica Paute Molino*. [BachelorThesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/1639>
- Collazo, G. (2008). *Error Humano: C4c06* (1.<sup>a</sup> ed.). Casa del Libro. <https://books.google.es/books?id=j88DRCPfgpoC&lpg=PA7&dq=error%20humano&lr&hl=es&pg=PA4#v=onepage&q&f=false>
- Concepción, A., Serpa, A., Gómez, J., Montalvo, R., Ledo, L., & Piñeiro, A. (2021). Formulación de un nuevo concepto de confiabilidad operacional. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 29(1), 87-93.
- Cooper, S., Ramey, A., Wreathall, J., & Parry, G. (1996). *A technique for human error analysis (ATHEANA)* (p. 111). [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:27066091](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:27066091)
- Di Pasquale, V., Franciosi, C., Lambiase, A., & Miranda, S. (2016). Methodology for the analysis and quantification of human error probability in manufacturing systems. *2016 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2016.7810093>
- Di Pasquale, V., Miranda, S., Iannone, R., & Riemma, S. (2015). A Simulator for Human Error Probability Analysis (SHERPA). *Reliability Engineering & System Safety*, 139, 17-32. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.02.003>
- Dsouza, N., & Lu, L. (2017). A Literature Review on Human Reliability Analysis Techniques Applied for Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Industry. En S. Cetiner, P. Fechtelkötter, & M. Legatt (Eds.), *Advances in Human Factors in Energy: Oil, Gas,*



- Nuclear and Electric Power Industries* (pp. 41-54). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-41950-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41950-3_4)
- Evans, M., He, Y., Maglaras, L., & Janicke, H. (2019). HEART-IS: A novel technique for evaluating human error-related information security incidents. *Computers & Security*, 80, 74-89. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.09.002>
- Faig, J. (2008). *NTP 620: Fiabilidad humana: Evaluación simplificada del error humano (II)*.
- Farcasiu, M., & Constantinescu, C. (2021). Evaluation of human factor engineering influence in nuclear safety using probabilistic safety assessment techniques. *Walter de Gruyter GmbH*, 86(6), 470-477. <https://doi.org/10.1515/kern-2020-0062>
- Galiano, P., & Bermejo, E. (2008). Gestión del mantenimiento basado en el riesgo: Factores que influyen en la fiabilidad de equipos dinámicos. *Mantenimiento: ingeniería industrial y de edificios*, 219, 24-30.
- Gallegos, C., Viscaíno, M., & Villacrés, S. (2020). Estudio de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad aplicado a grupos electrógenos prime. 3, 3, 16.  
<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i3.1266>
- García Palencia, O. (2013). *Confiabilidad Humana Clave de la Sostenibilidad Industrial*.
- Gibson, H., & Kirwan, B. (2008). Application of the CARA HRA tool to Air Traffic Management safety cases. *9th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management 2008, PSAM 2008*, 2, 9.  
[https://www.researchgate.net/publication/366006221\\_Application\\_of\\_the\\_CARAHRA\\_Tool\\_to\\_Air\\_Traffic\\_Management\\_Safety\\_Cases](https://www.researchgate.net/publication/366006221_Application_of_the_CARAHRA_Tool_to_Air_Traffic_Management_Safety_Cases)
- Hughes, C., Baber, C., Bienkiewicz, M., Worthington, A., Hazell, A., & Hermsdörfer, J. (2015). The application of SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) in the development of compensatory cognitive rehabilitation

- strategies for stroke patients with left and right brain damage. *Ergonomics*, 58(1), 75-95. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.957735>
- Kayisoglu, G., Gunes, B., & Besikci, E. B. (2022). SLIM based methodology for human error probability calculation of bunker spills in maritime operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 217, 108052. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108052>
- Kirimoto, Y., Hirotsu, Y., Nonose, K., & Sasou, K. (2021). Development of a human reliability analysis (HRA) guide for qualitative analysis with emphasis on narratives and models for tasks in extreme conditions. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(2), 376-385. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.004>
- Kirwan, B., Kilner, A., Gibson, H., Piccione, D., & Sawyer, M. (2011). The Development and Application of CARA - a HRA Tool for Air Traffic Management Systems. *ESREL*, 8.
- Long, C., Jianguo, L., Junjie, D., Na, H., & Zhining, Z. (2013). *Analysis of the reliability of rasterized electronic information equipment maintenance*. 3. <https://doi.org/10.1109/QR2MSE.2013.6625892>
- Mandal, S., Singh, K., Behera, R., Sahu, S., Raj, N., & Maiti, J. (2015). Human error identification and risk prioritization in overhead crane operations using HTA, SHERPA and fuzzy VIKOR method. *Expert Systems with Applications*, 42(20), 7195-7206. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.05.033>
- Mirzaei, M., Mohammadfam, I., Soltanian, A., & Najafi, K. (2022). Human Error Probability Determination in Blasting Process of Ore Mine Using a Hybrid of HEART and Best-Worst Methods. *Safety and Health at Work*, 13(3), 326-335. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2022.03.010>
- Nezamodini, Z., Movahedi, Z., Kouhnavard, B., & Mosavianasl, Z. (2018). Investigation of human error by using THERP method in control room of incoiler department in a pipe

- manufacturing company. *Archives of Hygiene Sciences*, 7(3), 200-207.  
<https://doi.org/10.29252/ArchHygSci.7.3.200>
- Pinto, J., Melo, P., & Saldanha, P. (2014). A DFM/Fuzzy/ATHEANA Human Failure Analysis of a Digital Control System for a Pressurizer. *Nuclear Technology*, 188(1), 20-33.  
<https://doi.org/10.13182/NT13-48>
- Quispe, C. (2016). *Evaluación técnico económico para el mejoramiento de fiabilidad en equipos de movimiento de tierra de la Empresa DCDS – Cajamarca, 2016* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/8929>
- Ruisi, T., Tianyu, Y., & Shenghou, L. (2023). *THERP-CREAM Prediction Method for Human Failure Probability for Air Traffic Control*. 6.  
<https://doi.org/10.1109/ICPECA56706.2023.10075991>
- Salas, K., Madriz, C., Sánchez, O., Sánchez, M., & Hernández, J. (2017). Modelos de Cuantificación de Error Humano aplicados en la Industria de Manufactura Moderna (Revisión literaria). *Revista Tecnología en Marcha*, 30(2), 66.  
<https://doi.org/10.18845/tm.v30i2.3197>
- Swain, A. (1964). *THERP* (1.<sup>a</sup> ed.). Sandia Corporation.
- Swain, A., & Guttman, H. (1983). *Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. Final report* (NUREG/CR-1278, SAND-80-0200, 5752058; p. NUREG/CR-1278, SAND-80-0200, 5752058).  
<https://doi.org/10.2172/5752058>
- Waterson, P. (2017). Designing for human reliability: Human factors engineering in the oil, gas and process industries. En *Policy and Practice in Health and Safety* (Vol. 15, Número 1, pp. 82-83). Taylor & Francis Ltd.  
<https://www.proquest.com/docview/2016426409/abstract/AF3E686D204B453DPQ/1>

- Williams, J. (1988). A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance. *Conference Record for 1988 IEEE Fourth Conference on Human Factors and Power Plants*, 436-450. <https://doi.org/10.1109/HFPP.1988.27540>
- Xian, Z., Chuan, L., & Xiao, G. (2011). *Reliability function of electronic equipments suffering a single environmental stress based on Poisson Process*. 4. <https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2011.6035358>
- Yang, Q., Lin, S., & Feng, D. (2018). Research on Reliability Evaluation of Traction Power Supply Equipment Considering Human Factors. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2017*, 483, 185-195. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7989-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7989-4_19)
- Zhou, J., Lei, Y., & Chen, Y. (2019). A hybrid HEART method to estimate human error probabilities in locomotive driving process. *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.001>