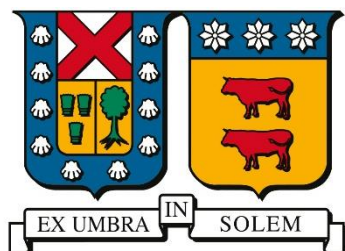


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE



PROPUESTA DE UN MODELO DE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD HUMANA EN EL MANTENIMIENTO DE CORREAS TRANSPORTADORAS

ÁLVARO JAVIER BURGOS HERRERA

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

PROFESOR GUÍA: Ing. Luis Guzmán Bonet

PROFESOR COREFERENTE: Ing. Nelson Álvarez Campillay

Enero – 2022

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mis padres, abuela, hermanos y mi pareja, quien siempre me apoyan y me han apoyado de forma incondicional en mi formación académica, motivándome a seguir adelante, además de formarme como persona, entregándome virtudes, valores y herramientas que se reflejan cada día.

También quisiera agradecer al cuerpo docente de la Universidad Técnica Federico Santa María y, en particular, al Departamento de Ingeniería Mecánica, que me han entregado las herramientas y conocimientos para poder desarrollarme como un profesional en el área.

Finalmente, a todos mis amigos dentro y fuera de la universidad, ya que también me formaron como persona, además de ser con quienes compartí dificultades académicas y gratos momentos que me acompañaran durante toda mi vida.

A todos, Muchas Gracias.

Dedicatoria

A mis padres.

Resumen

El ser humano y su trabajo está presente en distintas áreas y, por lo tanto, también las consecuencias de sus acciones, ya sean éstas hechas de forma voluntaria o no. En el mundo de la ingeniería mecánica, en el mantenimiento de equipos, son fundamentales los análisis de causa raíz para encontrar soluciones efectivas y eficientes a los problemas que surgen. El error humano se encuentra presente en todas las áreas y es imposible de erradicar, por lo que es necesario poseer una herramienta que pueda cuantificarlo y, de este modo, poder medirlo y disminuir dicho error.

Para la generación de esta herramienta, primero se referencia la confiabilidad humana, su estado del arte y las distintas definiciones del error humano. Gracias a esto se logran rescatar ejemplos en donde esta ciencia se aplica, además de adaptar y proponer coeficientes del rendimiento humano, ámbitos que permiten la formación de un modelo de medición del error humano a través de Redes Bayesianas.

El trabajo concluye con la propuesta de un modelo que pueda ser utilizado como herramienta y ejemplo para el análisis de la confiabilidad humana en la ingeniería mecánica, además de un plan de acción y recomendaciones para que éste pueda ser aplicado en distintas organizaciones, áreas y equipos, midiendo el error humano con el fin de controlarlo y disminuirlo.

Abstract

The human being and their work are present in different areas and, therefore, also the consequences of their actions, whether they are done voluntarily or not. In the world of mechanical engineering, in equipment maintenance, root cause analysis is essential to find effective and efficient solutions to problems that arise. Human error is present in all areas and is impossible to eradicate, so it is necessary to have a tool that can quantify it and, in this way, be able to measure it and reduce said error.

For the creation of this tool, human reliability, its state of the art and the different definitions of human error are first referenced. Thanks to this, it is possible to rescue examples where this science is applied, in addition to adapting and proposing coefficients of human performance, areas that allow the formation of a model for measuring human error through Bayesian Networks.

The work concludes with the proposal of a model that can be used as a tool and example for the analysis of human reliability in mechanical engineering, as well as an action plan and recommendations so that it can be applied in different organizations, areas and equipment, measuring human error in order to control and reduce it.

Glosario

HSE: Health and Safety Executive

UTC: Universal Time Coordinated

EST: East Standard Time

SRB: Solid Rocket Booster

HRA: Human Reliability Analysis

ACH: Análisis de la Confiabilidad Humana

PSFs: Performance Shaping Factors

FDD: Factores que Definen el Desempeño

HEP: Human Error Probability

PEH: Probabilidad Error Humano

Tabla de Contenidos (Índice)

Tabla de contenido

Agradecimientos	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen	iv
Abstract.....	v
Glosario	vi
Tabla de Contenidos (Índice)	vii
Lista de Figuras (Índice de Figuras)	ix
Lista de Tablas (Índice de Tablas).....	xiii
Introducción	xv
Objetivos	xvi
Desarrollo del Tema	17
1. Marco Teórico	17
1.1 Error Humano.	17
1.1.1 Definición.	17
1.1.2 Tipos de Errores.	17
1.1.3 Factores de influencia del Error Humano.	20
1.1.4 Errores Humanos Relacionados con el Mantenimiento.	20
1.1.5 Antecedentes históricos del error humano.	22
1.1.5.1 Accidente del Transbordador Espacial Challenger:.....	23
1.1.5.2 Reporte Médico de los E.E.U.U., To Err is Human:	24
1.2 Confiabilidad Humana.....	25
1.2.1 Definición.	25
1.2.2 Estrategias de Confiabilidad Humana.	26
1.3 Estado del Arte del Análisis Confiabilidad Humana.	27
1.3.1 Definición Análisis Confiabilidad Humana.	28
1.3.2 Modelos de Primera Generación.	28
1.3.3 Modelos de Segunda Generación.	31
1.3.4 Modelos de Tercera Generación.....	33

1.4	Cintas Transportadoras.....	36
1.4.1	Definición.	36
1.4.2	Componentes Principales de las Cintas Transportadoras.....	37
1.4.3	Fallas Principales de Cintas Transportadoras.....	40
2.	Desarrollo del Trabajo.....	49
2.1	Relación entre el Error humano y las Fallas en Cintas Transportadoras.....	49
2.2	Definición de Factores que Definen el Desempeño (Performance Shaping Factors).	62
2.3	Propuesta de Modelo de Confiabilidad Humana.	68
2.3.1	Caso N°1 para la Construcción del Modelo de Confiabilidad Humana.	68
2.3.2	Caso N°2 para la Construcción del Modelo de Confiabilidad Humana.	80
2.4	Discusión y Plan de Acción.....	85
3	Conclusiones.....	87
4	Bibliografía.....	89
5.	Anexos	92
5.1	Ejemplo N°1	92
5.2	Cuestionario N°1	93
5.3	Cuestionario Tareas Relacionadas con el Diseño.....	93
5.4	Cuestionario Tareas Relacionadas con Inspecciones de Rutina	94
5.5	Cuestionario Tareas Relacionadas con el Mantenimiento	94
5.6	Cuestionario Tareas Relacionadas con la Instalación	95
5.7	Ficha para el Registro de Datos para la Construcción de una Red Bayesiana.	96
5.8	Extracto de Base de Datos Consolidada para la generación de la Red Bayesiana..	97

Lista de Figuras (Índice de Figuras)

Figura 1: Diagrama de flujo de los tipos de error humano (Health and Safety Executive, 2012).	19
Figura 2: Diagrama de los tipos de errores humanos en el mantenimiento (Dhillon B. S., 2006).	22
Figura 3: Modelo de confiabilidad Operacional y su relación con la confiabilidad humana (García O., 2006).	26
Figura 4: Diagrama de las estrategias de la confiabilidad humana (García O., 2006).	27
Figura 5: Modelo de rendimiento humano (Blackman H.S., Gertman D.I, Boring R.L., 2008).	31
Figura 6: Diagrama referenciando las relaciones de los PSFs (Calixto E., 2016).	33
Figura 7: Ejemplo de una red bayesiana simple, elaboración propia.	34
Figura 8: Ejemplo de Red Bayesiana para analizar el error humano en una tarea de mantenimiento, elaboración propia.	35
<i>Figura 9: Componentes de una cinta transportadora (Tan Gómez, W.H., 2016).</i>	<i>37</i>
Figura 10: Ejemplo de una banda o correa transportadora.	38
Figura 11: Ejemplo de rodillos.	38
Figura 12: Ejemplo de polines o estaciones.	39
Figura 13: Ejemplo de tambor o polea.	39
Figura 14: Ejemplo de tensor de banda.	40
Figura 15: Ejemplo motor eléctrico en banda transportadora.	40
Figura 16: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de la banda o correa de la Tabla 3, elaboración propia.	50
Figura 17: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de los polines de la Tabla 3, elaboración propia.	51
Figura 18: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de los elementos tensores de la Tabla 3, elaboración propia.	52
Figura 19: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de los limpiadores de la Tabla 3, elaboración propia.	53
Figura 20: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de la tolva de la Tabla 3, elaboración propia.	54

Figura 21: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de otras fallas de la Tabla 3, elaboración propia.....	55
Figura 22: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-110 de la Tabla 4, elaboración propia.....	56
Figura 23: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-111 de la Tabla 5, elaboración propia.....	57
Figura 24: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-112 de la Tabla 6, elaboración propia.....	58
Figura 25: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-113 de la Tabla 7, elaboración propia.....	59
Figura 26: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-114 de la Tabla 8, elaboración propia.....	60
Figura 27: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de la Cinta de la Tabla 9, elaboración propia.	61
Figura 28: Diagrama de los factores del rendimiento humano, elaboración propia.	64
Figura 29: Analogía de los FDD considerados para un modelo bayesiano como se presenta en la Figura 7, elaboración propia.	67
Figura 30: Diagrama de flujo de causa-efecto, incluyendo modos de falla, efecto de falla y la evidencia de la falla asociado a la confiabilidad humana, elaboración propia.....	67
Figura 31: Representación gráfica de la aplicación del modelo de confiabilidad humana para las tareas de mantenimiento relacionadas con el diseño, elaboración propia.	72
Figura 32: Representación gráfica de la aplicación del modelo de confiabilidad humana para las tareas de mantenimiento relacionadas con las Inspecciones de Rutina, elaboración propia.	74
Figura 33: Representación gráfica de la aplicación del modelo de confiabilidad humana para las tareas de mantenimiento relacionadas con las tareas de Mantenimiento, elaboración propia.	76
Figura 34: Representación gráfica de la aplicación del modelo de confiabilidad humana para las tareas de mantenimiento relacionadas con las tareas de Mantenimiento, elaboración propia.	78
Figura 35: Diagrama de la Red Bayesiana propuesta para la estimación del Error Humano en el Mantenimiento de Cintas Transportadoras, elaboración propia.....	82

Figura 36: Imágenes del software Netica para la construcción de la Red Bayesiana, elaboración propia.	82
Figura 37: Extracto de imagen del software Netica para la importación de datos a utilizar en la construcción de la red bayesiana, elaboración propia.	83
Figura 38: Red Bayesiana construida a partir del Software Netica, elaboración propia.	84
Figura 39: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano de acuerdo con los FDD seleccionados, elaboración propia.	92
Figura 40: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia.	93
Figura 41: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano para el diseño de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia.	93
Figura 42: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano para la inspección de rutina de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia.	94
Figura 43: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano para las tareas de mantenimiento de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia.	94
Figura 44: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano para las tareas de instalación de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia.	95
Figura 45: Encuesta del registro de las detenciones de los elementos de una cinta transportadora para la fabricación de un modelo de ACH con Redes Bayesianas, elaboración propia.	96
Figura 46: Resumen de Tabla de base de datos para la generación de la Red Bayesiana utilizando un total de 2080 casos, datos disponibles en la bibliografía N°31.	97
Figura 47: Resumen de las frecuencias de los modos y efectos de falla para el elemento “Polín” en la base de datos para la generación de la Red Bayesiana, respectivamente.	97
Figura 48: Resumen de las frecuencias de los modos y efectos de falla para el elemento “Cinta” en la base de datos para la generación de la Red Bayesiana, respectivamente.	98
Figura 49: Resumen de las frecuencias de los modos y efectos de falla para el elemento “Fallas_Electricas” en la base de datos para la generación de la Red Bayesiana, respectivamente.	98

Figura 50: Resumen de las frecuencias de los modos y efectos de falla para el elemento “Tambor_Motriz” en la base de datos para la generación de la Red Bayesiana, respectivamente.
..... 98

Lista de Tablas (Índice de Tablas)

Tabla 1: Tabla extracto de modelos de primera generación de análisis de confiabilidad humana (Calixto E., 2016).....	30
Tabla 2: Tabla extracto de modelos de segunda generación de análisis de confiabilidad humana (Calixto E., 2016).....	32
Tabla 3: Tabla de detenciones en una planta de cemento, días de detención por año (Rojas Valdés F.A., 2018).	41
Tabla 4: Detenciones para una cinta transportadora “CV-110” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).....	43
Tabla 5: Detenciones para una cinta transportadora “CV-111” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).....	44
Tabla 6: Detenciones para una cinta transportadora “CV-112” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).....	45
Tabla 7: Detenciones para una cinta transportadora “CV-113” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).....	46
Tabla 8: Detenciones para una cinta transportadora “CV-114” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).....	47
Tabla 9: Detenciones no programadas para una cinta transportadora en una minera andina para el año 2014 (Silva Sanhuesa S.E., 2017).	48
Tabla 10: Tabla de comparación de distintos FDD respecto a cuatro modelos distintos de ACH (Boring R.L., 2010).....	66
Tabla 11: Tabla de pesos atribuidos a los FDD en relación con las tareas de Diseño, elaboración propia.	69
Tabla 12: Tabla de pesos atribuidos a los FDD en relación con las tareas de Inspecciones de Rutina, elaboración propia.	70
Tabla 13: Tabla de pesos atribuidos a los FDD en relación con las tareas de Mantenimiento, elaboración propia.....	70
Tabla 14: Tabla de pesos atribuidos a los FDD en relación con las tareas de Instalación, elaboración propia.....	71
Tabla 15: Consolidado de fallas en cintas transportadoras de acuerdo con las Tablas 5,6,7,8 y 9 en horas.	81

Tabla 16: Tabla resumen del resultado de validación de la Red Bayesiana a través del Software Netica. 84

Introducción

La principal motivación de este trabajo se basa en la discusión y presentación de la confiabilidad humana y, por lo tanto, el error humano, en el mantenimiento de cintas transportadoras, junto con una herramienta para poder medirla.

Muchos de los objetivos de un estudio de los planes de mantenimiento de maquinaria apuntan a mejorar la confiabilidad de este y por ende la de una cadena de producción, sin embargo, un elemento importante, que influye directamente en toda la cadena, y que frecuentemente no se mide en estos estudios, corresponde al ser humano y su confiabilidad

Actualmente, la medición de la confiabilidad humana en el mantenimiento es un tema que no está explorado por las organizaciones, ya que, es una medición compleja que ha requerido mucho tiempo y recursos para poder estudiarla, sin embargo, ya se ha evidenciado su utilidad e importancia en otras industrias, como la petrolera, aeronáutica y de energía nuclear.

A pesar de que el error humano se encuentra presente en muchas partes y su erradicación es imposible, es importante para toda organización conocer cabalmente como funciona su proceso y sus variables, ya que comenzar a implementar esta ciencia al mundo del mantenimiento, nos brindará herramientas que se pueden complementar con las que existen actualmente para reducir las detenciones no programadas.

Objetivos

Objetivo general:

Proponer un modelo de análisis de confiabilidad humana bajo enfoque bayesiano centrado en el mantenimiento de correas transportadoras y sus modos de fallas.

Objetivos específicos:

- Realizar un levantamiento de la estructura técnica de las correas transportadoras.
- Exponer las fallas más comunes de las correas transportadoras.
- Identificar las fallas más comunes en correas transportadoras debido a la confiabilidad humana.
- Identificar los factores que definen el desempeño humano en el mantenimiento de correas transportadoras.
- Desarrollar un modelo de confiabilidad humana aplicada en el mantenimiento de correas transportadora.

Desarrollo del Tema

Para la elaboración de nuestro modelo que sirva como una herramienta para medición del error humano en el mantenimiento de correas transportadoras, es necesario ir cumpliendo con nuestros objetivos específicos de forma secuencial, sin embargo, primeramente, se debe entregar las definiciones y el contexto del error humano para cumplir con esta tarea, por lo que a continuación se presenta el marco teórico de este trabajo.

1. Marco Teórico.

A continuación, se presentará una serie de conceptos, todos estos necesarios, tanto como para entregar contexto y definir las herramientas, las cuales se utilizarán para el desarrollo de este trabajo.

1.1 Error Humano.

1.1.1 Definición.

El error humano se ha intentado definir a lo largo de los años en numerosas oportunidades, lo que ha dado origen muchas definiciones para este concepto tan amplio y abstracto, por lo que lo utilizaremos la definición de algo que se realizó que “no fue intencional por el actor; no deseado por un conjunto de reglas o de un observador externo; o que llevó la tarea o el sistema fuera de sus límites aceptables...”, en resumen, es una desviación de la intención, la expectativa o la conveniencia (Senders J. W., & Moray N. P., 2019).

1.1.2 Tipos de Errores.

Existen varias formas de clasificar el error humano: desde el punto de origen, ya sea fuera o dentro del individuo (Senders J. W., & Moray N. P., 2019), por el nivel de análisis,

manipulación física, ya sea deslices o lapsos (Human Performance Improvement Handbook), errores activos, error latente, etc. Por lo que en este trabajo de título se categorizarán los tipos de errores de acuerdo con la Agencia Ejecutiva de Salud y Seguridad del Reino Unido (HSE), la Biblioteca de Vuelo (SKYbrary) de la Organización Europea por la Seguridad de Navegación Aérea y Human Error (Reason J., 1990).

De acuerdo con el HSE, hay 3 tipos de error humano: deslices, lapsos y errores. Estos tipos de errores pueden suceder incluso con la persona de mayor experiencia y mejor entrenamiento.

Deslices y Lapsos: Estos ocurren en tareas que son muy familiares por lo que pueden realizarse sin dedicar una gran atención consciente, en este caso, la intención de la persona fue correcta, pero la ejecución de la acción fue incorrecta, imperfecta o no realizada. Cuando la acción apropiada es llevada a cabo incorrectamente se clasifica como un desliz y cuando la acción es simplemente omitida o no llevada a cabo, el error se clasifica como lapso. En ambos casos el error está basado en la habilidad de la persona. Algunos ejemplos de deslices son, realizar una acción muy pronto o muy tarde, omitir un paso o serie de pasos de una tarea, llevar a cabo una acción con mucha o muy poca fuerza, realizar una acción en la dirección incorrecta, etc. Por otro lado, algunos ejemplos de lapsos son dejar de utilizar alguna máscara después de hablar con algún colega, olvidar asegurar un elemento, etc.

Errores o Equivocaciones: Están basados en la toma de decisiones, los dos tipos principales de equivocaciones son los que están establecidos en reglas o en conocimiento. Estos errores surgen cuando se realiza una acción incorrecta, creyendo que es correcta. Un ejemplo de este tipo de errores ocurre cuando un operador malinterpreta el sonido de una máquina descomponiéndose y falla en apagar el equipo inmediatamente. Las causas de estos errores se pueden deber al hacer muchas tareas al mismo tiempo y/o que éstas sean de gran complejidad, presión debido al tiempo, el ambiente de trabajo, problemas sociales, estrés individual, problemas de equipo, problemas organizacionales, etc.

Infracciones: Estas se definen como fallas intencionales que se desvían del procedimiento establecido, en este caso se tiene plena conciencia de que la tarea se está realizando incorrectamente. Las infracciones en las normas de salud y seguridad o procedimientos son las causas más grandes de accidentes y heridas en el campo laboral. Hay distintos tipos de infracciones, por lo que se clasificarán en las siguientes:

Infracciones de Rutina: Son aquellas que surgen debido a la automatización e inconciencia del comportamiento, son acciones habituales aceptadas por un grupo de trabajo y son toleradas por la organización o cuerpo gubernamental.

Infracciones de Situación: Corresponde al resultado de factores ambientales y de organización que hacen dificultoso para el empleador no cometer infracciones, entre los que se encuentra la presión del tiempo, ausencia de supervisión, pobre ambiente laboral, recursos insuficientes y una mala cultura.

Infracciones Excepcionales: Son eventos de poca ocurrencia que toman lugar en circunstancias inusuales como emergencias o fallas de equipo, pueden ser el resultado de una acción consiente de violar una normativa o una acción instintiva a la situación (SKYbrary, 2021).

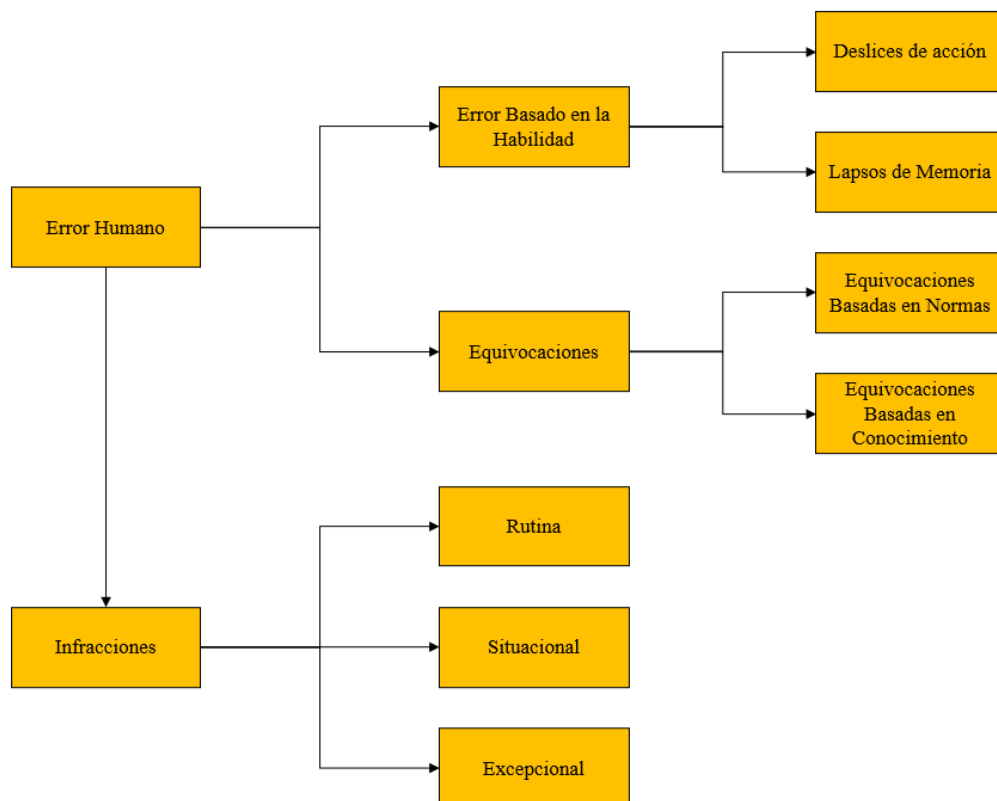


Figura 1: Diagrama de flujo de los tipos de error humano (Health and Safety Executive, 2012).

1.1.3 Factores de influencia del Error Humano.

El estudio de los factores de influencia del error humano es extenso y complejo, comprendiendo el estudio a partir de muchas disciplinas, por lo que se nombraran algunos de los factores, principalmente aquellos que consideran la interacción entre las personas y los sistemas productivos, en este ámbito se pueden clasificar en cuatro categorías (García O., 2006):

Factores Antropométricos: Estos son los factores relacionados con el tamaño y la resistencia física del personal que va a realizar la tarea, estos errores no constituyen la causa del problema, en su defecto, provienen del mismo sistema, como errores de diseño. Un ejemplo de este tipo factor es cuando un operador no se puede acomodar a las condiciones del equipo o sistema.

Factores Sensoriales: Se relacionan con la forma en que las personas usan los sentidos para entender lo que sucede a su alrededor. Tienen que ver con aspectos tales como visibilidad o nivel de ruido, que requieren una acción correctiva para mitigarlos.

Factores Fisiológicos: Se refieren a los elementos medioambientales que afectan el desempeño humano como, por ejemplo, fatiga. Requieren una acción relacionada con cambios en el clima organizacional o en los procesos operacionales para mitigarlos.

Factores Psicológicos: Se refieren a los aspectos internos de las personas, pueden generar errores intencionales o no intencionales y en la mayoría de los casos requieren tratamiento especializado.

En concordancia con lo mencionado anteriormente, se es posible señalar que el error humano se encuentra presente en forma constante en distintas disciplinas y escenarios, con sus definiciones y sus categorizaciones, las cuales son bastante extensas y complejas.

1.1.4 Errores Humanos Relacionados con el Mantenimiento.

Cualquier actividad industrial está sujeta a cambios y mejoras permanentes, por lo que nuevos métodos hacen su aporte para optimizar los procesos de gestión, y la mantención no es excepción. El mantenimiento centrado en la confiabilidad es un método en que se define la

estrategia de mantenimiento más apropiada para cada equipo actuando en su contexto operativo real. Una estrategia apropiada es un conjunto de tareas capaces de evitar que sucedan modos de falla o reducir drásticamente sus consecuencias de manera eficiente (Pistarelli A. J., 2017).

El error humano está presente en muchos ámbitos de forma global, por lo que es natural que se presente en el mundo del mantenimiento, en este último, el error humano se puede clasificar en las siguientes categorías (Dhillon B. S., 2006).

Error de Operador: Son el resultado del error del operador y entre los motivos de su ocurrencia se encuentran las tareas complejas, un mal ambiente de trabajo, la ausencia de procedimientos correctos, descuidos del operador, pobre capacitación y mala selección de personal.

Error de Mantenimiento: Ocurren en el campo de trabajo por descuidos del personal de mantenimiento, algunos ejemplos son: la reparación incorrecta de un artefacto, errores en la calibración de equipos, aplicar el lubricante indebido en puntos apropiados de los equipos, etc.

Error de Ensamblaje: Son el resultado de errores humanos durante el ensamblaje de un producto, algunas causas de este error son: la poca iluminación, baja calidad de los planos, materiales inadecuados, mal diseño del plan de trabajo e ineficiente comunicación de información.

Error de Instalación: Ocurren debido a múltiples razones, incluyendo: la mala instalación de equipos, uso de materiales distintos a la especificación del fabricante, usar instrucciones de instalación incorrectas o utilizar planos de instalación incorrectos.

Errores de Diseño: Proviene del diseño inadecuado, algunas causas de su ocurrencia corresponden al fracaso en asegurar la efectividad de las interacciones entre persona-maquina, fracaso en la implementación de necesidades humanas en el diseño y asignación inapropiada de funciones a humanos.

Error de Inspección: Son el resultado de la imprecisión del personal de inspección, un error típico de inspección es aceptar y rechazar objetos fuera o dentro de la tolerancia especificada, respectivamente.

Error de Manejo: Ocurren debido al transporte o almacenaje inadecuado.

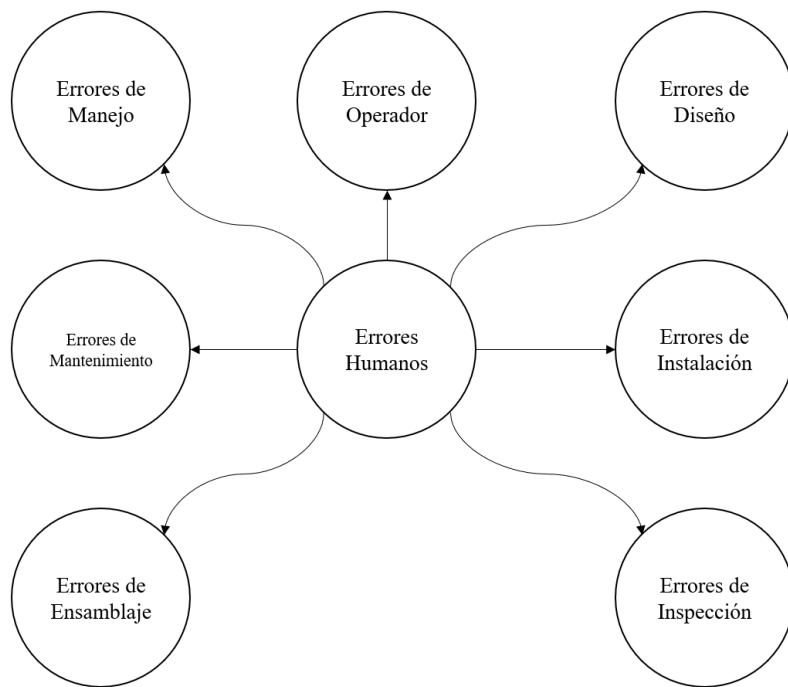


Figura 2: Diagrama de los tipos de errores humanos en el mantenimiento (Dhillon B. S., 2006).

Previamente se han mencionado los tipos de errores humanos presentes en el mantenimiento, el objeto de este trabajo es presentar una herramienta que contribuya a la reducción de estos tipos de errores, teniendo presente que el error humano no se puede erradicar, solamente reducir.

1.1.5 Antecedentes históricos del error humano.

El error humano siempre ha estado y va a estar presente en las actividades en las que participen los seres humanos, sin embargo, su gravedad y consecuencia dependerán del contexto y las distintas situaciones que se desarrollen, es por ello que se presentarán algunos casos emblemáticos en donde el error humano ha tenido como consecuencia pérdidas de vidas humanas y recursos monetarios importantes, con el fin de reforzar la idea de que el error humano, si no se controla, puede generar graves consecuencias.

1.1.5.1 Accidente del Transbordador Espacial Challenger:

El accidente del transbordador espacial Challenger se produjo el martes 28 de enero de 1986 a las 16:39:13 UTC, cuando el transbordador espacial Challenger (misión STS-51-L) se desintegró 73 segundos tras el lanzamiento, provocando la muerte de los siete miembros de la tripulación, Francis "Dick" Scobee, Michael J. Smith, Ronald McNair, Ellison Onizuka, Gregory Jarvis, Judith Resnik y Christa McAuliffe. La nave se desintegró sobre el océano Atlántico, frente a la costa del centro de Florida (Estados Unidos) a las 11:38 EST (16:38 UTC). Ha sido calificado como el accidente más grave en la conquista del espacio.

La desintegración del vehículo entero comenzó después de que una junta tórica de su cohete acelerador sólido (SRB) derecho fallara durante el despegue. El fallo de la junta tórica causó la apertura de una brecha, permitiendo que el gas caliente presurizado del interior del motor del cohete sólido saliera y contactara con la estructura adyacente de conexión con el SRB y el tanque externo de combustible. Esto provocó la separación de la conexión posterior del SRB derecho y el fallo estructural del depósito externo. Como consecuencia de esto, las fuerzas aerodinámicas destruyeron rápidamente el orbitador.

El compartimiento de la tripulación y otros fragmentos de la nave fueron finalmente recuperados del fondo del océano después de una larga operación de búsqueda y rescate. Aunque no se conoce el momento exacto en que murieron los miembros de la tripulación, se sabe que algunos sobrevivieron a la ruptura inicial de la nave. Sin embargo, el transbordador carecía de dispositivo de salida de emergencia y los astronautas no sobrevivieron al impacto del transbordador contra la superficie del océano.

El accidente produjo la paralización de los vuelos durante treinta y dos meses y la formación de la Comisión Rogers, una comisión especial nombrada por el presidente de los Estados Unidos, Ronald Reagan. La comisión determinó que la cultura organizacional de la NASA y el sistema de toma de decisiones habían contribuido sustancialmente al accidente. Desde 1977, los directores de la NASA tenían conocimiento de que el diseño de los cohetes aceleradores sólidos del contratista Morton Thiokol tenía un defecto potencialmente catastrófico en las juntas tóricas, pero no lo habían resuelto adecuadamente. También ignoraron las advertencias de los ingenieros sobre los peligros en el lanzamiento provocados por las frías temperaturas de aquella mañana y no habían informado adecuadamente a sus superiores de estas

preocupaciones. La Comisión Rogers hizo nueve recomendaciones a la NASA que debía poner en práctica antes de continuar con los vuelos de transbordadores.

Sin embargo, el Comité de Ciencia y Tecnología de la Cámara de Representantes de los Estados Unidos también llevó a cabo audiencias y, el 29 de octubre de 1986, publicó su propio informe sobre el accidente del Challenger. El comité revisó los hallazgos de la Comisión Rogers como parte de su investigación y estuvo de acuerdo con esta en cuanto a las causas técnicas del accidente. Se diferencia de la comisión en su evaluación de las causas que contribuyeron al accidente:

“El Comité considera que el problema subyacente que condujo al accidente del Challenger no fue la mala comunicación o los procedimientos subyacentes como implica la conclusión de la Comisión Rogers. Más bien, el problema fundamental fue la mala toma de decisiones técnicas durante un período de varios años por parte del personal superior de la NASA y de los contratistas, que no actuó de manera decisiva para resolver las anomalías cada vez más graves en la junta tórica de su cohete acelerador sólido.” (Wikipedia Contributors, 2021)

1.1.5.2 Reporte Médico de los E.E.U.U., To Err is Human:

El área médica no está exenta de este tipo de errores, To Err is Human: Building a Safer Health System, es un informe histórico publicado en noviembre de 1999 por el Instituto de Medicina de EE. UU. Que puede haber dado lugar a una mayor conciencia de los errores médicos de EE. UU. El informe se basó en el análisis de múltiples estudios realizados por una variedad de organizaciones y concluyó que entre 44.000 y 98.000 personas mueren cada año como resultado de errores médicos prevenibles. En comparación, menos de 50.000 personas murieron a causa de la enfermedad de Alzheimer y 17.000 murieron por el uso de drogas ilícitas en el mismo año.

El informe solicitó un esfuerzo integral por parte de los proveedores de atención médica, el gobierno, los consumidores y otros. Al afirmar que ya existían conocimientos sobre cómo prevenir estos errores, estableció una meta mínima de reducción del 50 por ciento en los errores durante los próximos cinco años. Sin embargo, en el 2007 aún no se cumplían los objetivos propuestos por la junta médica.

1.2 Confiabilidad Humana.

Antes de poder hablar de confiabilidad humana, tenemos que saber a qué nos referimos cuando hablamos de confiabilidad, el estudio de confiabilidad es el estudio de fallas de un equipo o componente en un periodo determinado de tiempo (Pistarelli A.J., 2017).

Se habla y se busca confiabilidad en los sistemas, debido a que existe una estrecha relación entre este y la disponibilidad, ya que, al tener una alta disponibilidad, tenemos mayor probabilidad de realizar una tarea de forma eficaz.

1.2.1 Definición.

La confiabilidad humana se define como la probabilidad en la cual los humanos cumplen con satisfacción tareas específicas, las tareas pueden estar relacionadas con reparación, operación de equipos o sistemas, acciones de seguridad, análisis y otro tipo de acciones humanas que influyen en el desempeño de un sistema. (Calixto E., 2016). Últimamente la confiabilidad humana ha tomado cada vez más relevancia cuando se habla de aumentar la confiabilidad en un proceso, específicamente cuando se habla de confiabilidad operacional.

La confiabilidad operacional se define como una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial (Amendola L. & Depool T., 2002). Dentro de los elementos que conforman la confiabilidad operacional se presenta la confiabilidad humana, por lo que resulta importante definir los elementos que conforman la componen, entre ellos están la capacitación, motivación, comunicación, pertenencia, ergonomía y desarrollo.

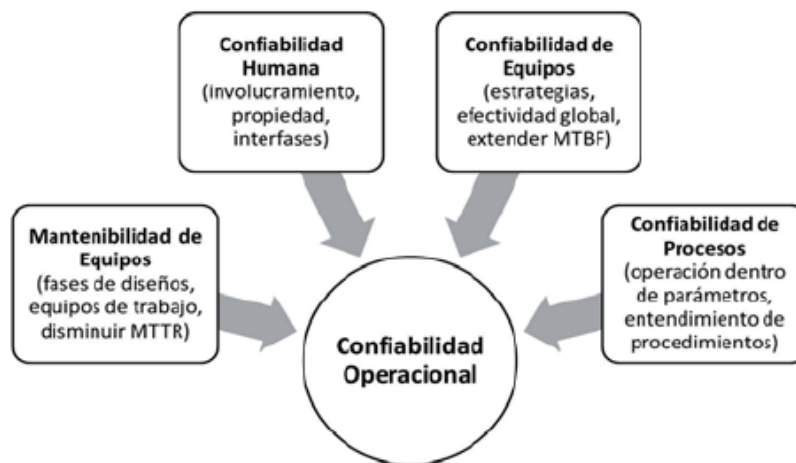


Figura 3: Modelo de confiabilidad Operacional y su relación con la confiabilidad humana (García O., 2006).

1.2.2 Estrategias de Confiabilidad Humana.

Actualmente las compañías pueden elegir en seguir un modelo de confiabilidad operacional con el fin de maximizar su productividad y rentabilidad para ser competitivas, siguen las siguientes estrategias a fin de maximizar la confiabilidad humana:

Gerencia del Conocimiento: Apunta a tener un proceso sistémico que suministra el recurso humano para ejercer las labores industriales y preservar el capital intelectual de la organización. La fuerza de trabajo como capital intelectual, es quien resuelve los problemas y provee las actividades que aseguran el éxito, pero requiere el compromiso de alta gerencia para liderar procesos de capacitación, motivación e incentivación de trabajadores.

Gestión por Competencias: Busca impulsar las competencias individuales, acorde con las necesidades operativas identificando las acciones necesarias para conseguirlo. Este estilo de gestión se diferencia de una capacitación, ya que cuenta con un sistema que incluye información, entrenamiento y experimentación.

Equipos de Trabajo: Es un conjunto de personas que trabajan juntas con el objetivo de potenciar la productividad, analizando problemas en búsqueda del logro de un objetivo común.

Gerencia del Desempeño: Tiene el objetivo de monitorear y evaluar la idoneidad del talento humano durante la implantación y desarrollo de las estrategias propuestas, con el objetivo de generar valor y tomar acciones correctivas de forma proactiva.



Figura 4: Diagrama de las estrategias de la confiabilidad humana (García O., 2006).

Sin embargo, a pesar de que se han planteado formas de potenciar la confiabilidad humana con el fin de potenciar la competitividad, son estrategias que de por sí son difíciles de medir ya que solamente se perciben en resultados finales y no en su desarrollo, es por esto y otras necesidades que se han creado formas de medir la confiabilidad humana, a esta ciencia se le ha llamado Análisis de Confiabilidad Humana o Human Reliability Analysis en inglés.

1.3 Estado del Arte del Análisis Confiabilidad Humana.

Con todo lo mencionado anteriormente, deberíamos tener una idea más clara de lo que es el error y la confiabilidad humanos, por lo que es natural que comencemos a hablar sobre el análisis de esta confiabilidad humana.

1.3.1 Definición Análisis Confiabilidad Humana.

El Análisis de la Confiabilidad Humana (ACH) apunta a identificar, modelar y cuantificar la probabilidad del error humano, La probabilidad del error humano es calculada a partir de las actividades del operador, por lo que para obtener un estimado cuantitativo de la probabilidad del error humano se han creado una serie de modelos de ACH.

El origen del ACH comienza alrededor de 1960, pero la mayoría de las técnicas del control del factor humano eran propensas a fallar, por lo que a mitades de 1980 se complejizo su desarrollo. Los acercamientos o técnicas del ACH se pueden dividir en 3 categorías, primera, segunda y tercera generación, esta última es una evolución de las generaciones anteriores.

1.3.2 Modelos de Primera Generación.

El análisis de confiabilidad humana de primera generación fue fuertemente influenciado a partir del punto de vista de la probabilidad de la evaluación de la seguridad, e identificaron al ser humano como un componente mecánico, por lo que pierde todos los aspectos dinámicos de la interacción con el ambiente de trabajo, tanto física como socialmente. En la mayoría de estos modelos, se trabaja a partir de la hipótesis de que el ser humano tiene deficiencias naturales, es decir, que los humanos lógicamente fallan al realizar tareas, tal como lo hacen los componentes mecánicos o eléctricos. Este tipo de modelos se centran en la cuantificación de las tareas, en términos de éxito o fracaso, y a partir de esto nace su análisis, por lo que las causas raíz y las razones del comportamiento humano, son un factor mínimo o no existente.

Las características principales de estos se pueden resumir como:

- Representaciones binarias de las acciones humanas (éxito o fracaso).
- Atención en la fenomenología de las acciones humanas.
- Baja atención las acciones cognitivas de los seres humanos (o ausencia de un modelo cognitivo).
- Dicotomía entre los tipos de errores.

Aunque son los tipos de análisis de confiabilidad humana más utilizados en la industria debido a su rápida y relativamente sencilla aplicación, estos modelos han mostrado empíricamente, con experiencia y uso, que no son capaces de suministrar suficiente información para la prevención, ya que miden acciones que han sucedido en el pasado, y como se mencionó anteriormente, no indagan en las causas raíz. Estos modelos son comúnmente criticados por no tener consideraciones en la forma de impacto de otros factores como el ambiente, organización, utilización de métodos adecuados de juicio, etc.

Modelos de Análisis de Confiabilidad humana		
Primera Generación		
Nombre		Objetivo
THERP	Technique for Human Error Rate Prediction	Evaluar el fracaso en la secuencia de tareas o acciones. Se aplica en mantenimiento, análisis operativo o de incidentes con representación gráfica compleja (1975).
OAT	Operator Action Trees	Evaluar el fracaso en la secuencia de tareas o acciones. Se aplica en mantenimiento, Análisis operativo o de incidentes con representación gráfica simple (1982).
SLIM	Success Likelihood Index Methology	Evaluar el fracaso en la secuencia de tareas o acciones. Se aplica en mantenimiento, análisis operativo o de incidentes y se refiere al desempeño de factores humanos basado en la opinión de un especialista (1984).
SHARP	Systematic Human Action Reliability Procedure	Evaluar el proceso cognitivo humano de falla (detección, compresión, decisión y acción), que se aplica en mantenimiento, operación o análisis de incidentes (1984).
STahr	Sociotechnical Assessment of Human Reliability	Evaluar fallas en la secuencia de tareas o acciones y se aplica en mantenimiento, análisis operativo o de incidentes y se refiere al desempeño de factores humanos basado en la opinión de un especialista (1983).

Tabla 1: Tabla extracto de modelos de primera generación de análisis de confiabilidad humana (Calixto E., 2016).

1.3.3 Modelos de Segunda Generación.

A inicios de la década de 1990, la necesidad de mejorar y desarrollar el ACH provocó que se realizaran un importante número de investigaciones y de desarrollos, mejorando las técnicas de primera generación y dando nacimiento a nuevos modelos, a estos nuevos modelos, que apuntaban al aspecto cognitivo de los seres humanos, es decir, a un aspecto más cualitativo, se les denominó modelos de segunda generación.

Estos tipos de modelos intentan explicar el comportamiento humano, por lo que naturalmente son modelos con conceptos principalmente teóricos más que prácticos, por lo que su aplicación es sumamente compleja. Entre estos, destacan los Performance Shaping Factors (PSFs) o Factores que Definen el Desempeño (FDD), que intentan dar una explicación de los distintos factores y elementos influyen en el comportamiento humano.

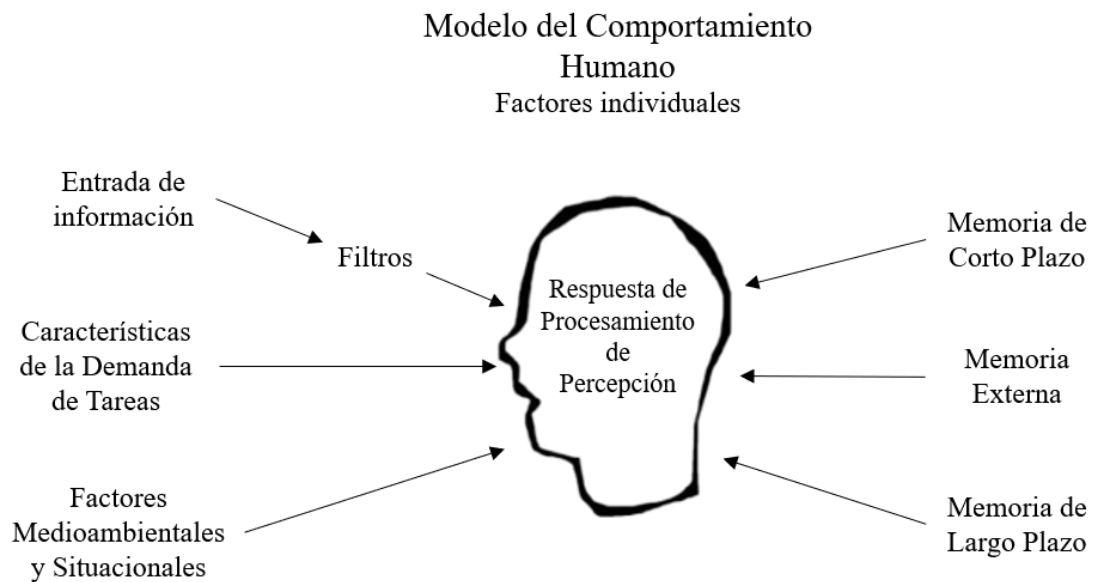


Figura 5: Modelo de rendimiento humano (Blackman H.S., Gertman D.I, Boring R.L., 2008).

Modelos de Análisis de Confiabilidad humana		
Segunda Generación		
Nombre		Objetivo
ATHEANA	A Technique for Human Error Analysis	Evaluar el proceso cognitivo humano de falla (detección, comprensión, decisión y acción), que se aplica en mantenimiento, análisis operativo o de incidentes (1996).
CREAM	Cognitive Reliability and Error Analysis Method	Evaluar el proceso cognitivo humano de falla (detección, comprensión, decisión y acción), que se aplica en mantenimiento, análisis operativo o de incidentes (1998).

Tabla 2: Tabla extracto de modelos de segunda generación de análisis de confiabilidad humana (Calixto E., 2016).

Principalmente existen cuatro deficiencias en los modelos vistos anteriormente, que se presentan a continuación:

- Ausencia de datos empíricos para un modelo de desarrollo y validación.
- Ausencia de la inclusión de un modelo cognitivo.
- Gran variabilidad en implementación.
- Se basan en el juicio de expertos para definir los factores del rendimiento humano.

1.3.4 Modelos de Tercera Generación.

Últimamente, debido a las limitaciones individuales de los modelos propuestos anteriormente, se han continuado desarrollando modelos o mejoras de los modelos preexistentes, si bien hay pocos modelos que se definen como de tercera generación estos son el NARA (Nuclear Action Realibility Assessment), una versión avanzada del modelo HEART para el campo nuclear y las Redes Bayesianas.

Entre el desarrollo de distintos estudios ha existido la limitante de ausencia de datos empíricos para el desarrollo y validación de modelos de ACH, por lo que se han construido base de datos para el análisis del error humano y repositorios (HERA y HFIS).

Los esfuerzos principales de los investigadores se han enfocado en definir los FDD, sin embargo, entre sus mayores limitantes está el cómo interaccionan los factores entre sí, y, por ende, como actúan juntos y por separado sobre el rendimiento humano (Calixto E., 2016).

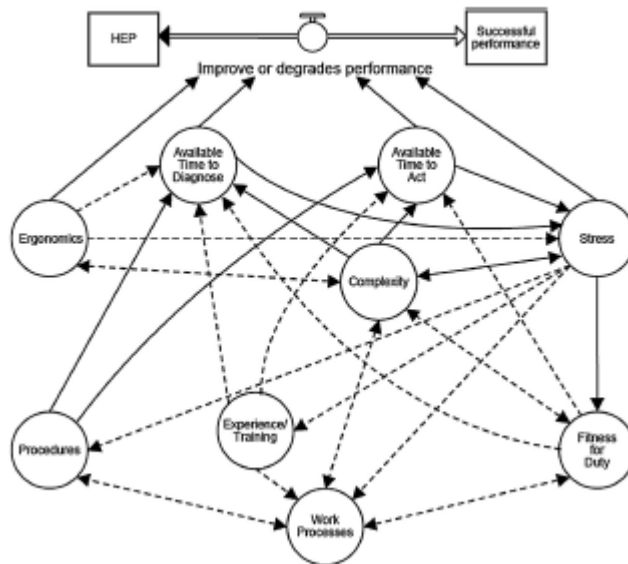


Figura 6: Diagrama referenciando las relaciones de los PSFs (Calixto E., 2016).

Redes Bayesianas

Las Redes Bayesianas corresponde a un modelo desarrollado a partir de la década de 1980 para realizar una predicción en el análisis de la inteligencia artificial y puede ser definido como símbolos gráficos que representan argumentos en dominios inciertos. Los nodos representan variables azarosas, las flechas indican la dependencia directa entre las variables y las direcciones representan la relación entre causa y efecto. En la representación de la red bayesiana, el nodo C, es una consecuencia de los nodos A y B.

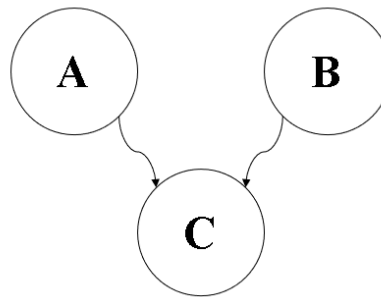


Figura 7: Ejemplo de una red bayesiana simple, elaboración propia.

En cada nodo hay probabilidades condicionales que representan los valores de las variables de un evento, la probabilidad es calculada a partir de la ecuación del Teorema de Bayes, para este ejemplo, la representación matemática es la siguiente (Calixto E., 2016):

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

En donde:

$P(A|B)$ = Probabilidad a posteriori de A cuando B es conocida.

$\frac{P(B|A)}{P(B)}$ = Máxima verosimilitud relacionada con B con ocurrencia de evidencia A.

$P(A)$ = Probabilidad a priori.

En este caso, la ecuación corresponde a una representación para dos eventos condicionales, pero en algunos casos, existen muchos eventos por lo que la red bayesiana es cada vez más difícil de calcular, por lo que se utilizan softwares para realizar estos cálculos cada vez que sea posible. En general, se puede representar matemáticamente de la siguiente manera:

$$P(U) = P(X_1, X_2, X_3 \dots X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i/Pf(X_i)) \quad (2)$$

En donde:

$P(U)$ = Probabilidad; $P(X_i/Pf(X_i))$ = Probabilidad condicional de X relacionada con su padre de red.

Las Redes Bayesianas otorgan gran flexibilidad ya que permiten una representación más realista de la dinámica del ser humano, pero además, la representación de sus relaciones entre los eventos y los FDD.

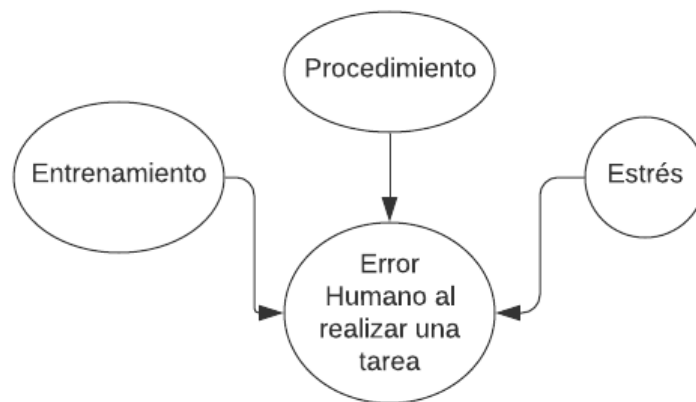


Figura 8: Ejemplo de Red Bayesiana para analizar el error humano en una tarea de mantenimiento, elaboración propia.

En general, las ventajas de las Redes Bayesianas son:

- Las relaciones entre los factores de forma del rendimiento y la probabilidad del error humano se pueden calcular con probabilidades condicionales.
- Si se utiliza un software para las redes bayesiana, el cálculo es más sencillo.
- Las redes bayesianas son fáciles de entender gráficamente cuando se aplican a problemas de confiabilidad humana.

Sus desventajas son:

- Hay dificultades en obtener datos de probabilidades condicionales en la base de datos.

- A mayor cantidad de FDD, es más difícil conseguir información confiable de especialistas.

Anteriormente se presentaron eventos históricos en los cuales los errores humanos han tenido consecuencias directas respecto a estructuras de organización, metodologías de trabajo y cultura, sin mencionar los aspectos negativos de estos tipos de errores, sin embargo, existen errores menores, que se cometen de forma diaria, que no se miden y que podrían tener consecuencias catastróficas a futuro. Es por esto, tanto para mitigar estas consecuencias o simplemente mitigar errores que podrían estar generando una pérdida en algún proceso, existe la confiabilidad humana y su análisis.

1.4 Cintas Transportadoras.

Anteriormente se entregaron las definiciones referentes al error humano, confiabilidad humana, análisis de confiabilidad humana además de entregar el estado del arte de estos. Por lo que, continuando con el desarrollo de nuestros objetivos específicos, comenzamos con el levantamiento de la estructura técnica de las correas o cintas transportadoras.

1.4.1 Definición.

Una cinta o correa transportadora es un sistema de transporte continuo formado básicamente por una cinta de caucho reforzado, que se mueve entre dos poleas. La correa es arrastrada por fricción por una o más poleas (motrices), que a su vez son accionadas por uno o más motores. Las otras poleas suelen girar libres, y la función de una de ellas (polea de cola) es la de servir de retorno de la correa transportadora. La correa es soportada por rodillos entre las poleas motrices y de cola.

La importancia de las correas transportadoras está directamente ligada a las ventajas que éstas poseen, ya que permiten el transporte de materiales a gran distancia a un costo considerablemente más bajo que otros medios de transporte, se adaptan a cualquier terreno,

tienen una gran capacidad de transporte, se pueden utilizar en una gran variedad de materiales, se pueden desplazar y no alteran el producto transportado (Tan Gómez, W.H., 2016).

1.4.2 Componentes Principales de las Cintas Transportadoras.

Las cintas transportadoras están compuestas por una variedad de componentes distintos, entre estos encontramos aquellos presentados en la figura a continuación:

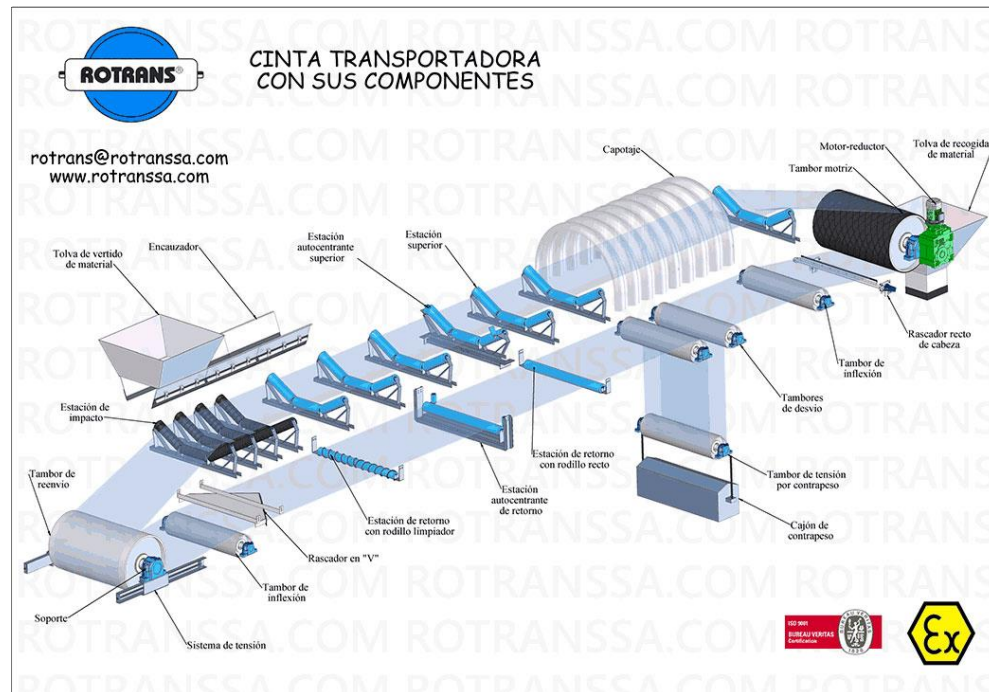


Figura 9: Componentes de una cinta transportadora (Tan Gómez, W.H., 2016).

Entre los componentes principales se encuentran:

Banda o Correa: Es el componente encargado de soportar y transportar el material, absorbiendo las tensiones de arranque y la energía de impacto en el punto de carga, se clasifican de acuerdo con su material de fabricación, la forma de su construcción y su superficie. (Tan Gómez, W.H., 2016) (Molina Valdovino D.S., 2018).



Figura 10: Ejemplo de una banda o correa transportadora.

Rodillos y Soportes: Son los componentes encargados de soportar la banda y permitir su movimiento a través de su giro, además contribuyen en el centrado de la banda. (Tan Gómez, W.H., 2016)



Figura 11: Ejemplo de rodillos.

Polines o Estaciones: Son los componentes conformados a partir de rodillos y una estructura base, se clasifican de acuerdo con la cantidad y arreglo de los rodillos junto con la función que se desea cumplir (Silva Sanhuesa S.E., 2017).



Figura 12: Ejemplo de polines o estaciones.

Tambores o Poleas: Es el componente responsable de transmitir las fuerzas producidas por el grupo motorreductor de la banda y/o encargados de realizar los cambios de trayectoria de esta. (Tan Gómez, W.H., 2016)



Figura 13: Ejemplo de tambor o polea.

Tensores de banda: Es el componente responsable de asegurar el contacto correcto entre la banda y el tambor motriz, y de esta forma transmitir de forma correcta y segura la fuerza de este último, también compensa las variaciones de longitud que la banda puede sufrir debido al caudal de material que transporta o debido a los procesos de inicio o frenado de movimiento de la banda (Tan Gómez, W.H., 2016).



Figura 14: Ejemplo de tensor de banda.

Motor Eléctrico: Componente encargado de otorgar el movimiento a la cinta transportadora, forma parte del grupo motriz.



Figura 15: Ejemplo motor eléctrico en banda transportadora.

1.4.3 Fallas Principales de Cintas Transportadoras.

Las cintas transportadoras, al ser conformadas por muchas partes y de alta complejidad de acuerdo con el tamaño de estas y con la función que se necesita realizar, es común que presenten fallas a lo largo de su vida útil, sin embargo, nos interesan las fallas principales de estas y como se relacionan con el error humano.

A continuación, se presentan una serie de tablas de datos empíricos respecto a las detenciones programadas y no programadas más comunes de cintas transportadoras, su elemento asociado y causa.

Detenciones de una cinta transportadora de cementos en Bío Bio:

DETENCIONES NO PROGRAMADAS DE LINEAS N° 1, 2 Y 3					
FALLAS	AÑO				
	2011	2012	2013	2014	2015
CORREA O BANDA	11	10	20	24	30
POLINES	32	36	36	40	48
ELEMENTOS TENSORES	3	4	6	4	2
TAMBOR MOTRIZ	4	8	6	4	8
TAMBOR RETORNO	2	4	4	8	2
LIMPIADORES	4,5	4,5	4	5	4
TOLVA	4,5	2	4	4	2
FALLAS ELECTRICAS	6,5	8	12	6	9
OTROS	5,5	6	4	5	6
TOTAL	73	82,5	96	100	111

Tabla 3: Tabla de detenciones en una planta de cemento, días de detención por año (Rojas Valdés F.A., 2018).

En cuanto al detalle de las causas de las detenciones de la *Tabla 3*, se presenta a continuación:

Correa o banda: “Esta presenta daño superficial por desgaste de uso, rajaduras a lo largo de sectores por carga desbalanceada, cortes laterales por mal estado de rodillos direccionales” (Rojas Valdés F.A., 2018).

Polines: “Debido al material particulado presente en la empresa estos rodillos se agripan con lo cual se traban y se produce el desgaste excesivo de una de las caras del polín, dejándolas planas e inservibles, otro suceso es el descarrilamiento de los polines por mala fijación.” (Rojas Valdés F.A., 2018).

“Polines con diferentes diámetros en la misma cinta transportadora, lo que genera desestabilización de la banda y descarrilamiento.” (Rojas Valdés F.A., 2018).

“Polines de impacto que no se encuentran en el lugar necesario, si no que fuera del área de descarga, y polines de carga que se encuentran en la zona donde deberían ir estos.” (Rojas Valdés F.A., 2018).

Elementos Tensores: “Se agripan y quedan estáticos, por lo que no aplica la tensión necesaria y provoca desadaptación frente a los cambios bruscos de carga que posee el tensor, por otra

parte, la errada configuración de la tensión puede producir un estiramiento excesivo de la banda transportadora, o detención, por falta de fricción.” (Rojas Valdés F.A., 2018).

Tambor Motriz y de Retorno: “El desalineamiento de estos tambores produce que la banda se desestabilice y cambie su posición, y se estrellen los bordes de la cinta con rodillos direccionales que en ocasiones no se encuentran.” (Rojas Valdés F.A., 2018).

Limpiadores: “Falta de limpiadores en líneas de cintas transportadoras, o limpiadores con elección equivocada, ya que son de material rígidos, lo que desgasta la cinta y en ocasiones rompe uniones, desmoronando toda la banda de la cinta transportadora. La falta de limpiadores produce la acumulación de material particulado en rodillos de retornos, con esto quedan trabados y desgastan la banda transportadora.” (Rojas Valdés F.A., 2018).

Tolva: “La tolva posee un enrejado el cual tiene el propósito de reducir la velocidad con la que cae el material a la cinta transportadora, estas varillas se encuentran sin seguros, en ocasiones se han desprendido y caído sobre la cinta, rajándola, que al estar en funcionamiento raja el 100% de la cinta, por lo que se debe cambiar por completo.” (Rojas Valdés F.A., 2018).

Fallas Electrónicas: “Usualmente, al estar en contacto con polvos corrosivos y alta humedad, se produce la sulfatación del conexionado.” (Rojas Valdés F.A., 2018).

Otras Fallas: Clima, debido a la ubicación de la empresa y “al encontrarse los equipos en lugares desprotegidos y bajo tierra, es común que los dispositivos eléctricos se humedezcan y que los equipos mecánicos se traben con fango”. (Rojas Valdés F.A., 2018).

Paro de emergencias inesperados, debido al sector que recorren las cintas transportadoras, “es transitado por gran cantidad de personal interno y externo de la planta, los sucesos ocurridos debido al tránsito de personal son: paradas de emergencia accidentales..., robos de elementos móviles por agentes externos a la planta...”.(Rojas Valdés F.A., 2018).

Detenciones de una cinta transportadora en una minera de cobre:

Causa	Duración [h]	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
Limpieza cinta	4,71	29,96%	29,96%
Desalineamiento cinta	4,32	27,50%	57,46%
Cambio de guardera	2,19	13,95%	71,41%
Cambio de polín	2,03	12,95%	84,36%
Activación Sensor Velocidad Cero	0,89	5,69%	90,05%
Tapado de correa	0,55	3,47%	93,52%
Cortocircuito	0,37	2,34%	95,86%
Falla rodamiento	0,26	1,63%	97,48%
Falla Pull Cord	0,22	1,42%	98,90%
Activación Pull Cord	0,09	0,56%	99,46%
Derrame de carga	0,04	0,28%	99,74%
Inspección cinta	0,03	0,16%	99,91%
Falla motor	0,01	0,09%	100%

Tabla 4: Detenciones para una cinta transportadora “CV-110” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).

En cuanto al detalle de las causas de las detenciones de la *Tabla 4* se presenta a continuación:

“Las detenciones de la correa CV-110, se deben principalmente a tres razones: el tiempo utilizado para limpiar la correa del material que se encuentre adherido a esta, el desalineamiento de la cinta y el cambio de guarderas. La limpieza de la cinta y el desalineamiento de esta misma, tienen relación directa entre sí, ya que uno de los motivos del desalineamiento, es la acumulación de mineral en algunas zonas de la cinta. Por otro lado, el cambio de guarderas, es una actividad de mantenimiento programada, en la que se reemplazan aquellas que se encuentren en condiciones de desgaste excesivo y las que se hayan caído. Analizando estas tres detenciones, la más crítica es el desalineamiento de la cinta, que puede provocar fallas operacionales y en consecuencia detenciones no programadas. Una de las causas raíz es la limpieza de la cinta, por lo que es aconsejable mejorar en este aspecto. Una de las posibles soluciones, es la instalación de un dispositivo de limpieza adicional a los que se encuentran actualmente instalados.” (Tan Gómez, W.H., 2016)

Causa	Duración [h]	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Tapado de correa	24,77	30,14%	30,14%
Cambio posición carro	23,66	28,79%	58,93%
Cambio de polín	10,37	12,62%	71,54%
Falla Pull Cord	8,70	10,59%	82,13%
Limpieza cinta	3,93	4,79%	86,92%
Desgarramiento de empalme	2,62	3,18%	90,10%
Atollo de mineral	2,34	2,84%	92,94%
Fusible de control quemado	2,09	2,54%	95,48%
Inspección cinta	1,19	1,45%	96,93%
Corte transversal en la cinta	0,85	1,04%	97,97%
Cortocircuito	0,78	0,95%	98,92%
Desalineamiento cinta	0,54	0,66%	99,57%
Falla multilin	0,34	0,42%	99,99%
Cambio de guardera	0,01	0,01%	100%

Tabla 5: Detenciones para una cinta transportadora “CV-111” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).

En cuanto al detalle de las causas de las detenciones de la *Tabla 5* se presenta a continuación:

“Las detenciones de la correa CV-111, se deben principalmente al tapado de la correa, el cambio de la posición del carro y los cambios de polines. El tapado de la correa consiste en la instalación de una base sobre la correa transportadora, para que puedan ubicarse sobre ella los encargados de hacer mantenimiento. Se utiliza cuando se hacen trabajos con la correa funcionando, con el fin de evitar que el trabajador caiga sobre esta. El cambio de la posición del carro se realiza cuando la correa regula su tensión, a través de la carrera que posee el contrapeso y la carrera del carro de la polea tensora. El cambio de polines es una actividad programada de mantenimiento, en la cual se retiran los polines que se encuentren dañados, se

reponen estaciones que estén caídas y se instalan los polines que se requieran, según la zona de la correa en que se ubiquen.” (Tan Gómez, W.H., 2016)

Causa	Duración [h]	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Limpieza cinta	5,99	18,40%	18,40%
Cambio Polín	5,65	17,36%	35,75%
Atollo de mineral	4,71	14,48%	50,23%
Vibración alta del motor	3,53	10,84%	61,07%
Cambio guardera	3,39	10,43%	71,50%
Falla en sensor	2,63	8,07%	79,57%
Desalineamiento cinta	2,03	6,24%	85,81%
Falla Pull Cord	1,44	4,43%	90,24%
Inspección cinta	1,18	3,61%	93,86%
Reparación buzón	1,04	3,19%	97,04%
Sobrecarga motor	0,88	2,70%	99,74%
Deslizamiento cinta	0,07	0,22%	99,95%
Derrame de carga	0,01	0,05%	100%

Tabla 6: Detenciones para una cinta transportadora “CV-112” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).

En cuanto al detalle de las causas de las detenciones de la *Tabla 6* se presenta a continuación:

“Las detenciones de la correa CV-112, se deben principalmente a: la limpieza de la cinta, el cambio de polines, atollo de mineral, vibración alta del motor y el cambio de guarderas. La limpieza de la cinta, el cambio de polines y guarderas, consisten en las mismas actividades explicadas en las correas anteriores. El atollo de mineral, se produce cuando existe material acumulado en los chutes de traspaso, creando un tapón, lo que detiene la alimentación de la correa, disminuyendo el nivel de producción. Otro problema que se genera es cuando el mineral acumulado se derrumba y cae de golpe en la correa, pudiendo generar daños en esta. La alta vibración del motor se genera cuando existe un desbalanceo del eje entre este y el reductor, o bien, un desbalanceo del voltaje de alimentación, provocando que el motor presente movimientos que no corresponden a su funcionamiento normal.” (Tan Gómez, W.H., 2016)

Causa	Duración [h]	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
Cambio de polín	12,09	30,28%	30,28%
Falla motor	9,26	23,20%	53,48%
Corte longitudinal cinta	4,82	12,07%	65,55%
Cambio guardera	4,48	11,22%	76,77%
Activación sensor velocidad cero	3,53	8,85%	85,62%
Falla de acoplamiento	1,82	4,57%	90,19%
Desprendimiento de grampas empalme	1,62	4,05%	94,24%
Limpieza cinta	1,42	3,54%	97,78%
Des alineamiento cinta	0,59	1,48%	99,26%
Derrame de carga	0,30	0,74%	100%

Tabla 7: Detenciones para una cinta transportadora “CV-113” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).

En cuanto al detalle de las causas de las detenciones de la *Tabla 7* se presenta a continuación:

“Las detenciones de la correa CV-113, se deben a: cambio de polines, fallas en el motor, corte longitudinal en la cinta y cambio de guarderas.

El cambio de polines y guarderas, consisten en las mismas actividades descritas en las correas anteriores. Las fallas en el motor provocan su detención inmediata y se producen cuando se activan los mecanismos de protección eléctrica, debido a alta temperatura en los rodamientos, alta temperatura en la bobina o alguna falla en el sistema de control del motor. Otros motivos por los que el motor se detiene son por sobrecarga de torque en el eje del motor, sobre corriente de alimentación y por cortocircuito. El corte longitudinal en la cinta corresponde, como su nombre lo indica, a un corte generado a lo largo de la correa transportadora.” (Tan Gómez, W.H., 2016)

Causa	Duración [h]	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Falla estructural	36,63	55,86%	55,86%
Activación sensor velocidad cero	6,51	9,93%	65,79%
Cambio de polín	5,10	7,78%	73,58%
Falla de PLC	4,36	6,65%	80,23%
Desalineamiento cinta	3,01	4,59%	84,82%
Falla de comunicación	2,41	3,68%	88,49%
Limpieza cinta	2,20	3,35%	91,85%
Cortocircuito	1,32	2,01%	93,85%
Atollo de mineral	1,03	1,57%	95,42%
Reparación buzón	0,82	1,25%	96,66%
Corte de energía	0,66	1,01%	97,67%
Falla Pull Cord	0,59	0,90%	98,58%
Falla de multilin	0,34	0,52%	99,10%
Derrame de carga	0,29	0,44%	99,54%
Inspección cinta	0,16	0,24%	99,78%
Activación Pull Cord	0,15	0,22%	100,00%

Tabla 8: Detenciones para una cinta transportadora “CV-114” en una minera de cobre desde enero 2015 a abril 2016 (Tan Gómez, W.H., 2016).

En cuanto al detalle de las causas de las detenciones de la *Tabla 8* se presenta a continuación:

“Las detenciones de la correa CV-114, se deben principalmente a: fallas estructurales, activación del sensor de velocidad cero, cambio de polines y fallas en el sistema PLC. Las fallas estructurales, hacen referencia al daño sufrido por las estructuras, principalmente por el entorno de trabajo en el que se encuentran, donde la variable crítica es la presencia del ácido sulfúrico y agua utilizados en el curado del mineral que circula a través de esta correa. La activación del sensor de velocidad cero, ocurre cuando existe una diferencia de velocidad entre la polea motriz y la polea de cola. Cuando existe dicha diferencia, la correa se detiene automáticamente. El cambio de polines consiste en la misma actividad descrita en las correas anteriores.

Las fallas en el sistema PLC, son problemas que afectan directamente la CPU que controla la correa transportadora. Cuando se da esta falla, la CPU no logra resolver la lógica de control, por lo que la correa transportadora se detiene.” (Tan Gómez, W.H., 2016)

Detenciones no programadas de una cinta transportadora en una minera andina:

FALLAS QUE PRODUCEN DETENCIONES NP	CANTIDAD DE NP	ACUMULADOS	% TOTAL
POLINES	35	34,31%	34,31%
GUARDERAS	19	52,94%	18,63%
PLANCHAS DE DESGASTE	15	67,65%	14,71%
BUZON DE TRASPASO CORREA 8D-8B	7	74,51%	6,86%
BUZON DE TRASPASO CORREA 8B-8E	6	80,39%	5,88%
ENGRAMPE MECANICO	6	86,27%	5,88%
RASPADORES	5	91,18%	4,90%
CORREAS DE TRANSMISION	2	93,14%	1,96%
EMPALME MECANICO	1	94,12%	0,98%
RODAMIENTO POLEA TENSOR	1	95,10%	0,98%
RODAMIENTOS POLEA AUXILIAR	1	96,08%	0,98%
RODAMIENTOS POLEA AXILIAR SUPERIOR	1	97,06%	0,98%
RODAMIENTOS POLEA COLA	1	98,04%	0,98%
RODAMIENTOS POLEA DOBLES	1	99,02%	0,98%
RODAMIENTOS POLEA MOTRIZ	1	100,00%	0,98%
TOTAL	102		100,00%

Tabla 9: Detenciones no programadas para una cinta transportadora en una minera andina para el año 2014 (Silva Sanhuesa S.E., 2017).

En cuanto al detalle de las causas de las detenciones de la *Tabla 9* se presenta a continuación:

Respecto a los polines, “al finalizar el estudio los principales factores que provocan el daño en los polines pasan a ser un tema de aseo industrial y de diseño de los elementos de la correa que fueron diseñados para 1800 ton/hrs.” (Silva Sanhuesa S.E., 2017)

Respecto a las Guarderas y planchas de desgaste, “al terminar el estudio nos arroja que el principal factor, que las planchas de desgaste no retienen el mineral granulado, provocando que este sea expulsado al exterior, recibéndolo la guardera que no es la encargada de esta labor.” (Silva Sanhuesa S.E., 2017). Por otro lado, se indica que las planchas no son reemplazadas terminadas su vida útil debido a que “se produce una inspección ineficiente y se realizan las modificaciones a la falla”. (Silva Sanhuesa S.E., 2017)

Respecto a los chutes de traspasos, “la principal causa de que los chutes se deterioren o se rompan, es que, se transporte una mayor cantidad de mineral, de la cual fue diseñado, 2000 ton/h en vez de 1800 ton/h. Cuando se reacondiciono la correa, para poder transportar más

mineral, los chutes de traspaso fueron los únicos que no se modifican quedando de la misma manera que fueron diseñados.” (Silva Sanhuesa S.E., 2017)

2. Desarrollo del Trabajo.

Con la información que hemos levantado hasta ahora, hemos completado nuestro primer objetivo específico, además de tener la información suficiente para completar nuestro segundo objetivo específico, por lo que continuando con nuestro tercer objetivo, debemos establecer la relación entre el error humano y las fallas en las cintas transportadoras, de esta forma, podremos evidenciar las fallas más comunes en el mantenimiento de cintas transportadoras debido a error humano.

2.1 Relación entre el Error humano y las Fallas en Cintas Transportadoras.

Anteriormente se presentaron las definiciones, causas, clasificaciones y consecuencias del error humano, todo esto para poder contextualizar su importancia y su presencia en distintos procesos, es por esto que en distintas disciplinas se han en trabajado conjunto con psicólogos y sociólogos para poder reducirlo dentro de sus campos, tarea que debiese realizarse en todas las áreas en donde la acción humana tenga consecuencias directas o indirectas en zonas de interés para una organización como es la energía nuclear, aeronáutica, medicina, petrolera, etc. Es por esto que, el fin de este trabajo, es contribuir con el estudio de esta metodología y su integración en el área de mantenimiento de las cintas transportadoras.

A partir de los análisis de las causas de las fallas en las cintas transportadoras y sus componentes previamente mencionados, es posible identificar que, en el momento que se evalúan las causas raíces de las fallas, solamente se consideran componentes mecánicos y las soluciones de los problemas giran en torno a propuestas en mantenimientos preventivos o reemplazo de componentes mecánicos a otros más adecuados, sin embargo, las razones de fondo de algunos de los problemas de mantenimiento provienen directa o indirectamente de errores humanos, como se evidencia en los siguientes diagramas de Ishikawa, que muestra la relación entre las fallas en las cintas transportadoras presentadas anteriormente y su causa raíz asociada al error humano en el mantenimiento presentado en la Figura 2.

Primeramente, se analizarán analizando las causas descritas de las detenciones para la cinta transportadora correspondiente a la Tabla 3, y de forma consecutiva para el resto de las cintas transportadoras mencionadas anteriormente.

- Banda o Correa, Tabla 3:

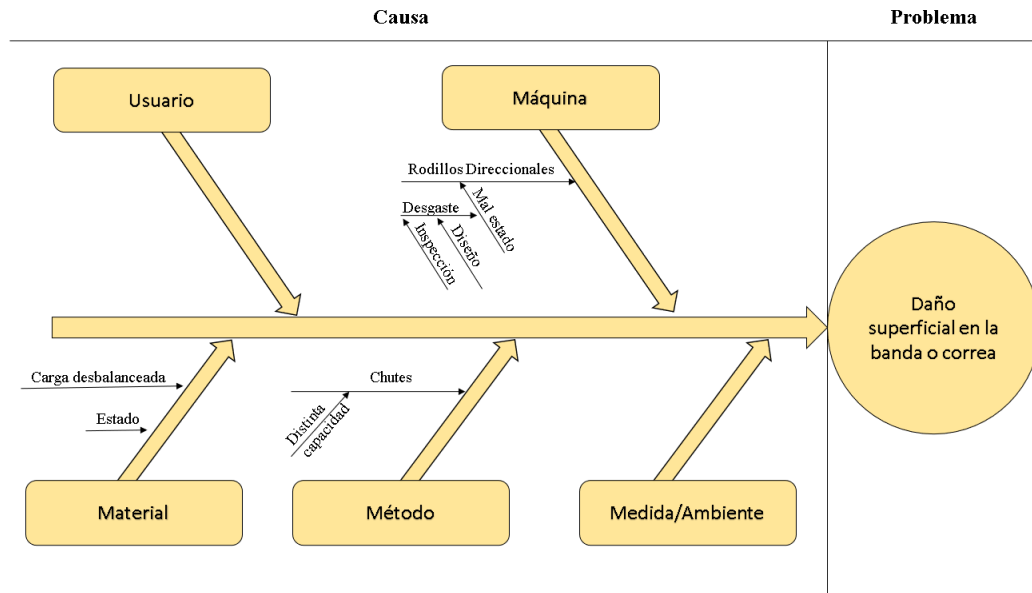


Figura 16: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de la banda o correa de la Tabla 3, elaboración propia.

Como se puede apreciar, las causas raíz de los daños superficiales de la banda, provienen de la carga desbalanceada, esta se produce ya que los chutes utilizados no corresponden a la capacidad necesaria, haciendo que se acumule material y comienza el desbalanceo, por otro lado, los rodillos direccionales que están en mal estado contribuyen a este hecho, ya que éstos se encuentran en mal estado debido a que los rodillos que se utilizan no son los más indicados para la tarea, además, una vez ya en mal estado, ya sea porque los rodillos no son los indicados o se desgastan naturalmente, no hay una inspección oportuna que prevenga el daño superficial en la banda o correa. Por otro lado, si correlacionamos estas fallas a los errores presentes en el mantenimiento según lo indicado anteriormente, se aprecia que las causas raíz de parte de los daños superficiales en la banda se atribuyen a errores de inspección y errores de diseño.

- Polines, Tabla 3:

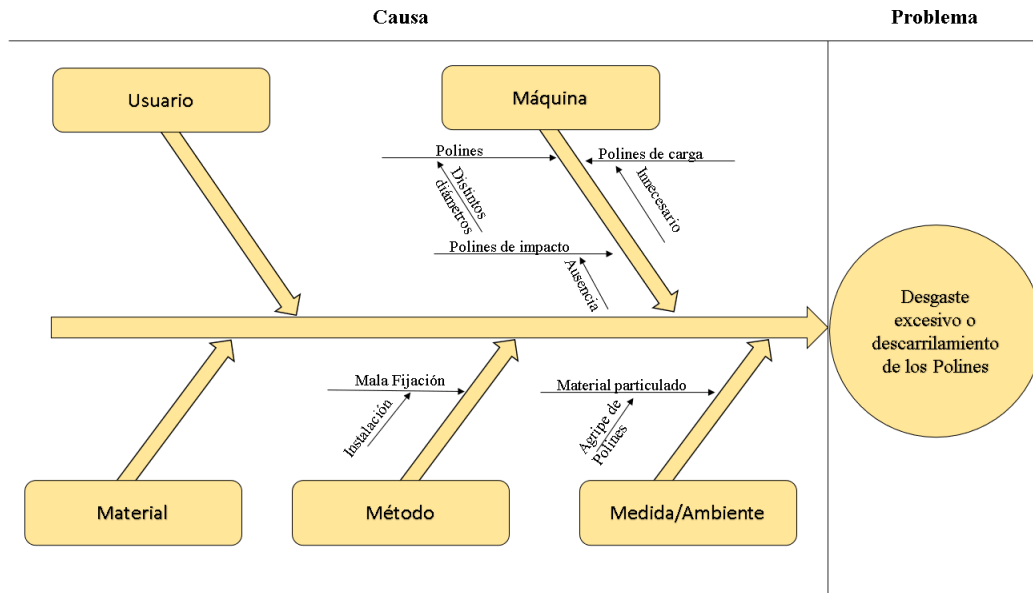


Figura 17: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de los polines de la Tabla 3, elaboración propia.

En esta caso, al analizar porqué se desgastan excesivamente los polines o se descarrilan, se aprecia que hay causas correspondiente en el método, específicamente debido a que a la hora de instalar los polines, esta no se realiza de forma correcta, presentándose errores de instalación, también se debe a las condiciones ambientales, debido a que el material particulado presente interactúa con los polines, haciendo que estos se agripen; y finalmente, hay causas provenientes en los polines en sí, ya que existen diferencias en los diámetros de los polines, haciendo que se descarrilen y existiendo además un error en los tipos de polines utilizados y ausencia de los polines necesarios, apreciándose un error de diseño.

- Elementos Tensores, Tabla 3:

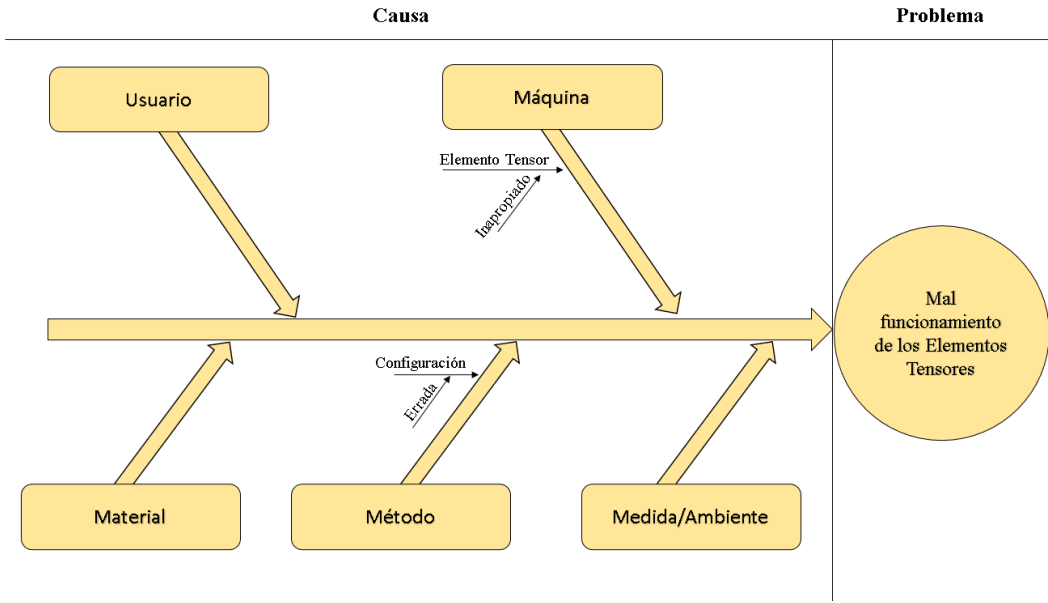


Figura 18: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de los elementos tensores de la Tabla 3, elaboración propia.

Analizando el porqué, el mal funcionamiento de los elementos tensores, se debe principalmente a que el sistema en sí no es el más apropiado para las tareas a desarrollar, además de que existe una configuración errada del sistema actual de tensión, evidenciándose errores de mantenimiento de tipo de error de diseño y error en el mantenimiento.

- Limpiadores, Tabla 3:

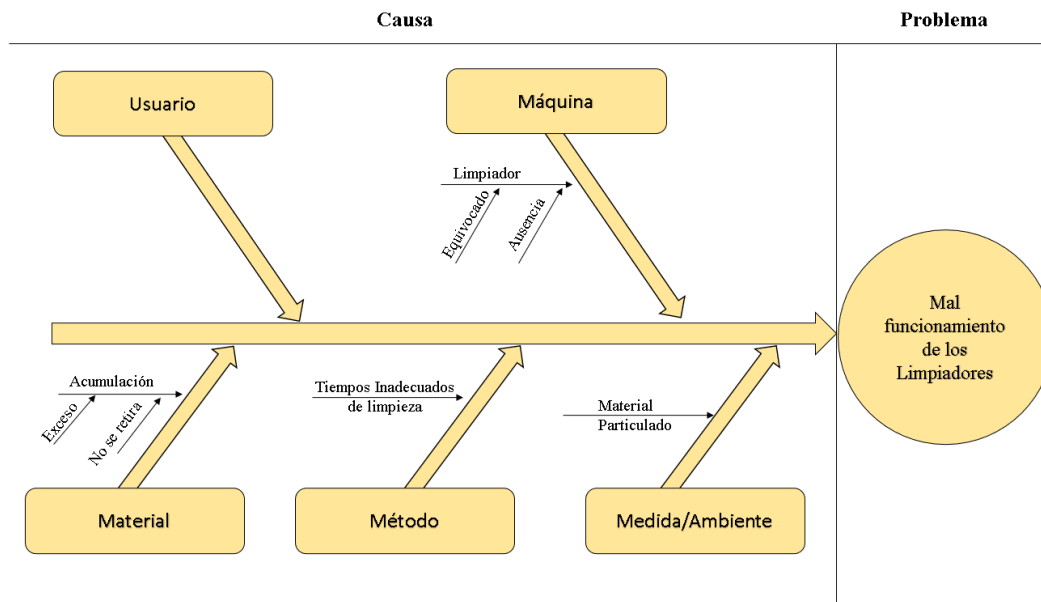


Figura 19: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de los limpiadores de la Tabla 3, elaboración propia.

Al analizar el porqué se producen las fallas de los limpiadores, estas se deben a diversas razones, entre estas asociadas al material de trabajo, en este caso debido a que existe exceso o no se retira apropiadamente, el porqué de esto se puede atribuir a distintas razones, entre las que se encuentran: una ausencia de limpiadores o se utilizan los limpiadores equivocados, aquí se puede apreciar un error de diseño, o bien no se están realizando trabajos de limpieza en los tiempos adecuados, lo que correspondería a un error de mantenimiento.

- Tolva, Tabla 3:

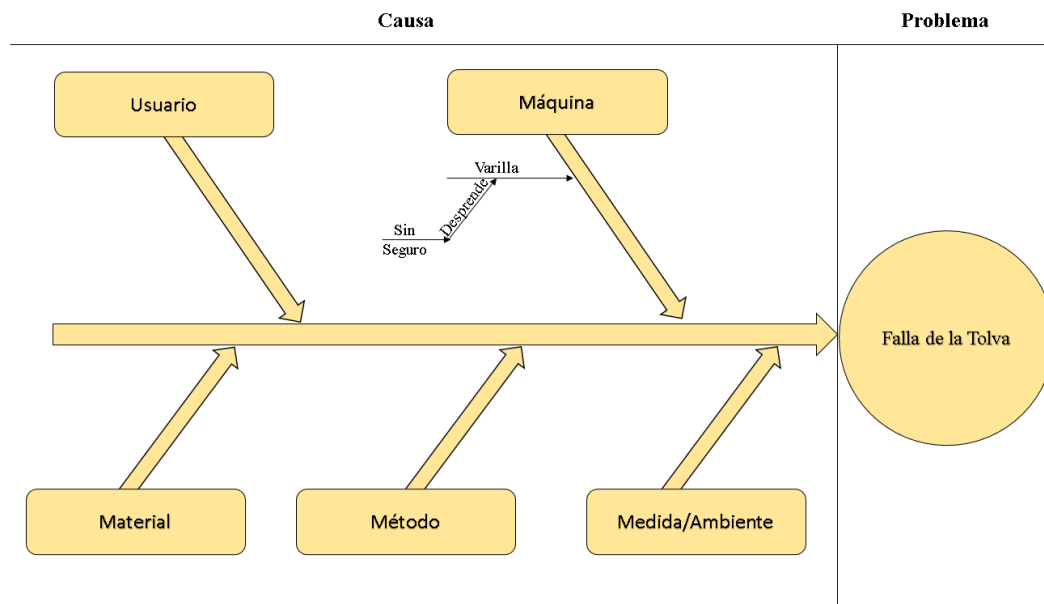


Figura 20: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de la tolva de la Tabla 3, elaboración propia.

Las fallas asociadas en la tolva están atribuidas a que las varillas presentes que retienen en parte al material de trabajo se desprenden, esto debido a que están sin seguro, lo que se asocia a un error de operador o de diseño debido a que existe un fracaso en la interacción entre el ser humano y la máquina.

- Otras Fallas, Tabla 3:

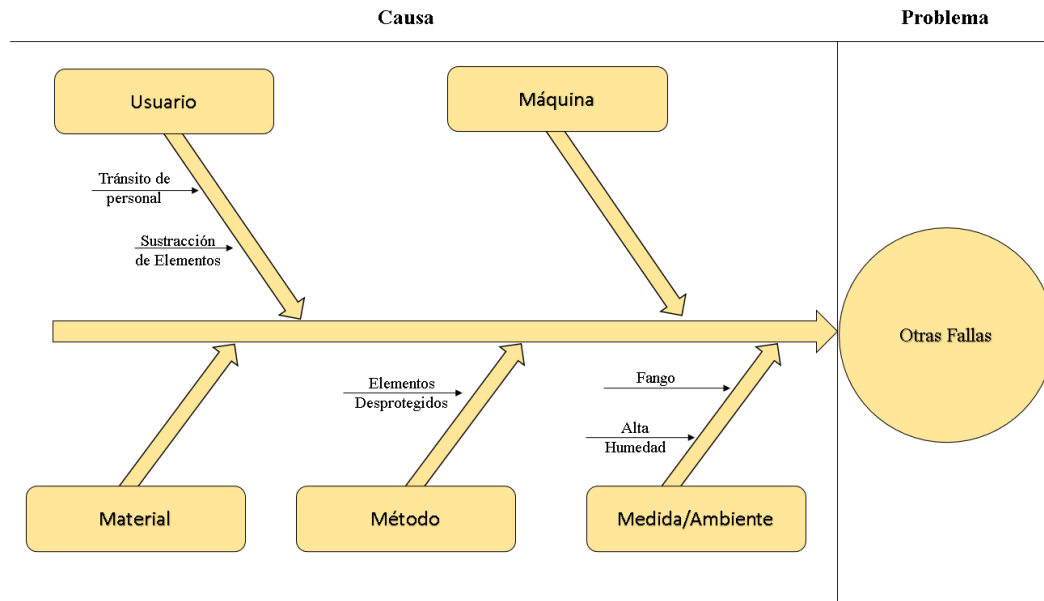


Figura 21: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de otras fallas de la Tabla 3, elaboración propia.

Este tipo de fallas están asociadas directamente a causas en los usuarios internos y externos, ya que el tránsito de estos en espacios no habilitados genera las detenciones no programadas de la cinta transportadora, además de que no se han tomado medidas para las condiciones ambientales como el fango presente y la humedad que afectan el correcto funcionamiento, por lo que los errores atribuidos son errores de diseño y errores de operador.

- Cinta CV-110, Tabla 4:

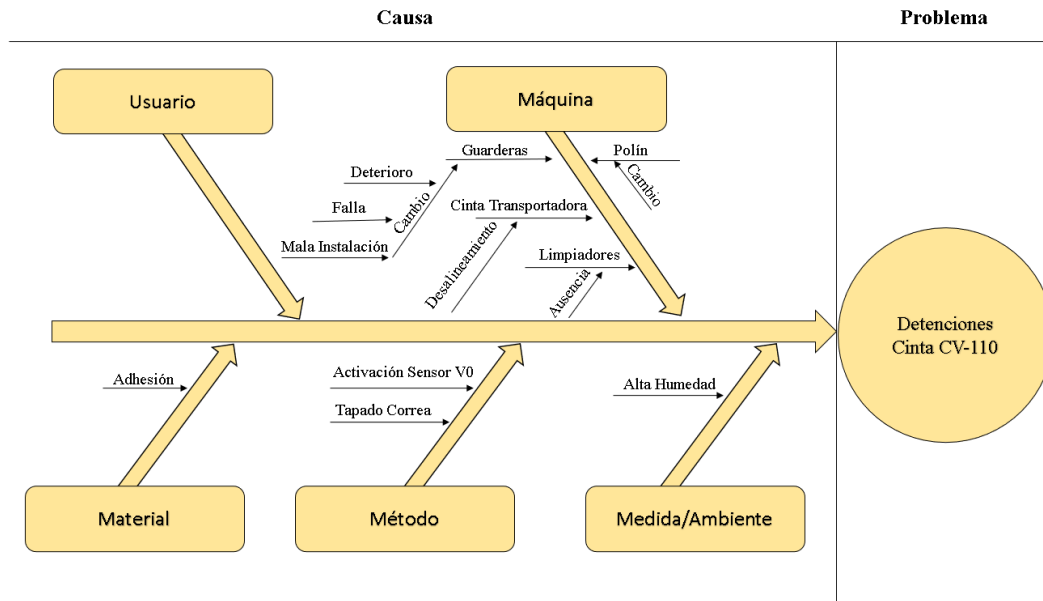


Figura 22: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-110 de la Tabla 4, elaboración propia.

A la hora de analizar las razones de las detenciones de la cinta de la tabla 4, se percatan que existen dos situaciones, detenciones programadas y no programadas, por el lado de las detenciones no programadas, se deben a la limpieza de la cinta y el desalineamiento de la cinta transportadora, el porqué de estas detenciones se debe a la acumulación de material presente ya sea por la ausencia de limpiadores o que los limpiadores seleccionados no cumplen con la tarea satisfactoriamente.

Respecto a los tipos de errores humanos que se pueden apreciar en estas detenciones se presentan errores de diseño, ya que los limpiadores no cumplen su función de forma efectiva.

- Cinta CV-111, Tabla 5:

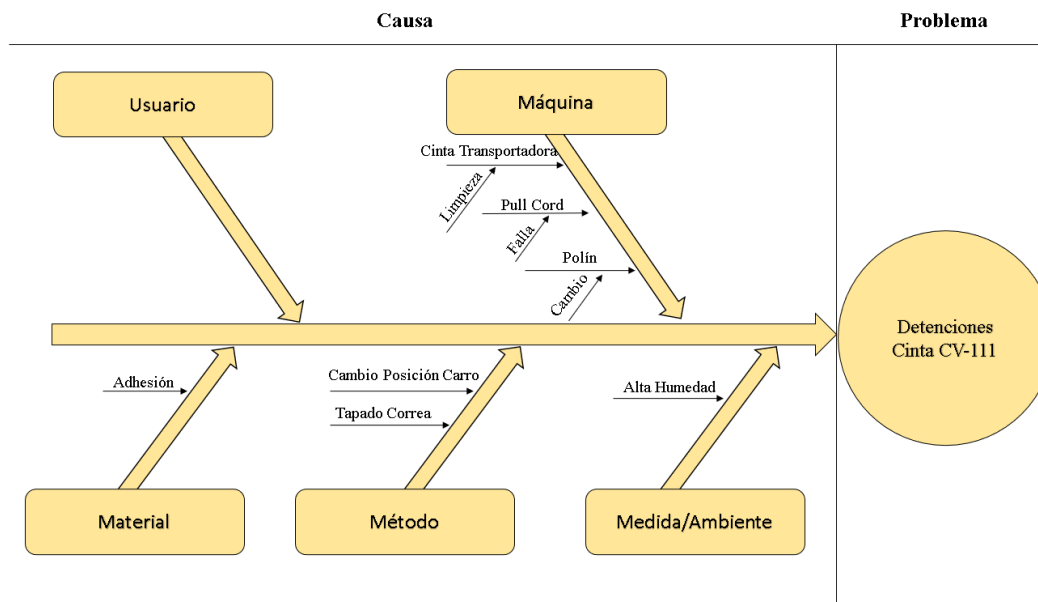


Figura 23: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-111 de la Tabla 5, elaboración propia.

Al analizar la causa de las detenciones de la cinta CV-111, asociadas a la Tabla 5, se aprecia que estas están principalmente asociadas a la maquinaria, entre estas estaría el cambio programado de polines, fallas en el pull cord y limpieza en la cinta transportadora, en este último se aprecia un error de diseño, ya que los limpiadores no están cumpliendo su tarea de forma efectiva, por otro lado existen detenciones debido a la metodología de trabajo, ya que se deben generar detenciones en la cinta para realizar trabajos específicos, por lo que se pueden asociar a errores de diseño.

- Cinta CV-112, Tabla 6:

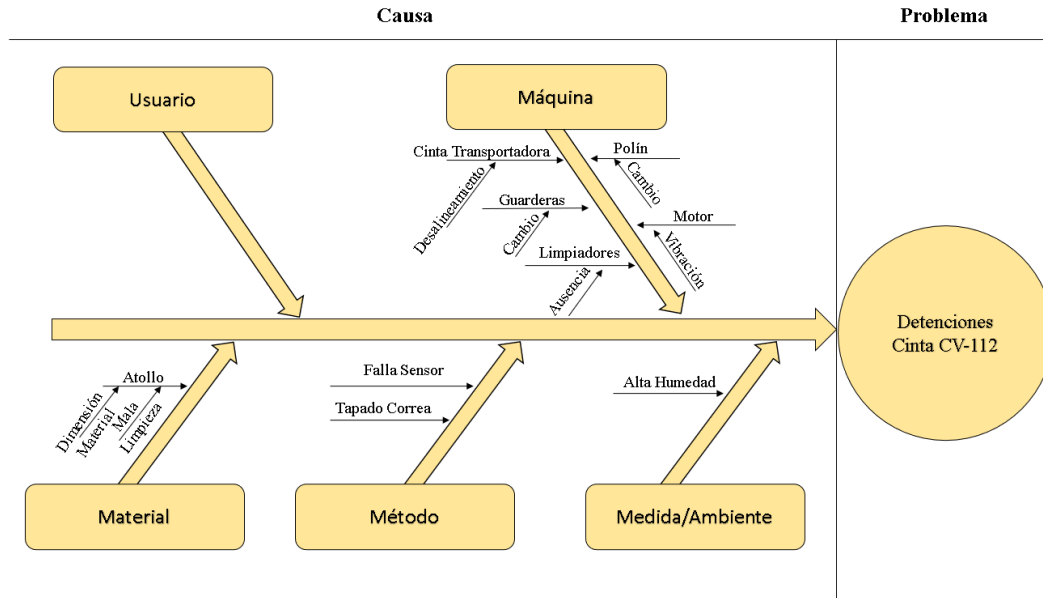


Figura 24: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-112 de la Tabla 6, elaboración propia.

Al analizar la causa de las detenciones de la cinta CV-112, se aprecia que las causas se deben a la maquinaria, medio ambiente, al material y al método de trabajo, nuevamente una de las causas de la detención de la cinta es debido al desalineamiento de esta, que se debe al atollo de material, este producido por los limpiadores, ya que no cumplen su tarea de forma efectiva debido a que su selección fue inapropiada o a que no se poseen los suficientes limpiadores, presentándose errores asociados al diseño, por otro lado, se presentan detenciones debido a las vibraciones del motor utilizado, estas producidas por una mala selección del motor para el trabajo, nuevamente un error asociado al diseño.

- Cinta CV-113, Tabla 7:

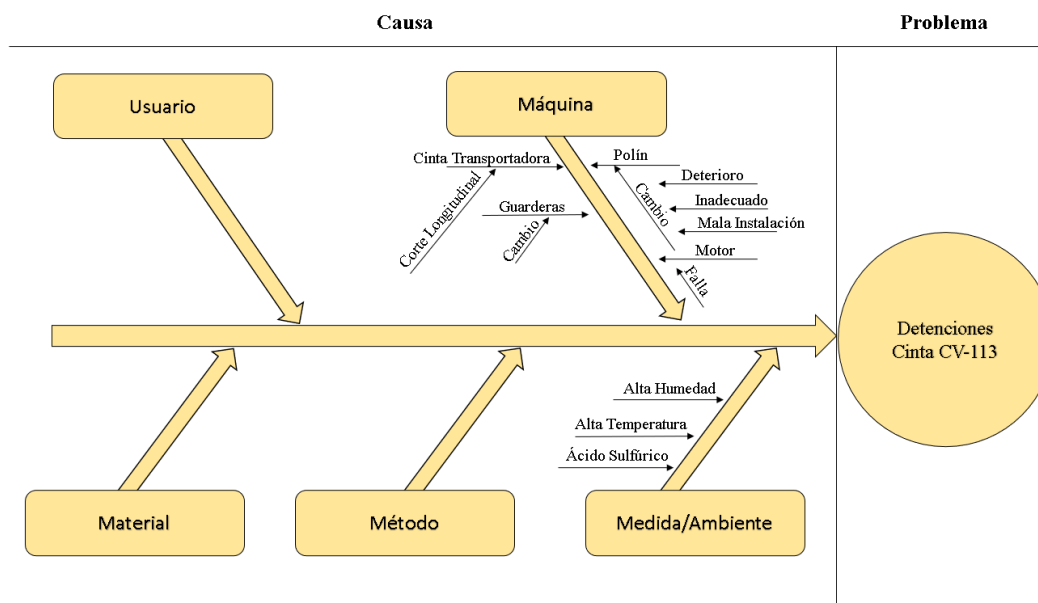


Figura 25: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-113 de la Tabla 7, elaboración propia.

Al analizar las causas de detención se aprecia que éstas se deben principalmente a los polines y al cambio de estos, y dicho cambio se debe realizar ya que existe un deterioro de forma natural, se han instalado inadecuadamente, o simplemente la selección del polín a utilizar fue errónea, presentándose errores asociados al diseño e instalación, por otro lado, no se consideraron las condiciones ambientales, que afectan específicamente al motor y a los polines.

- Cinta CV-114, Tabla 8:

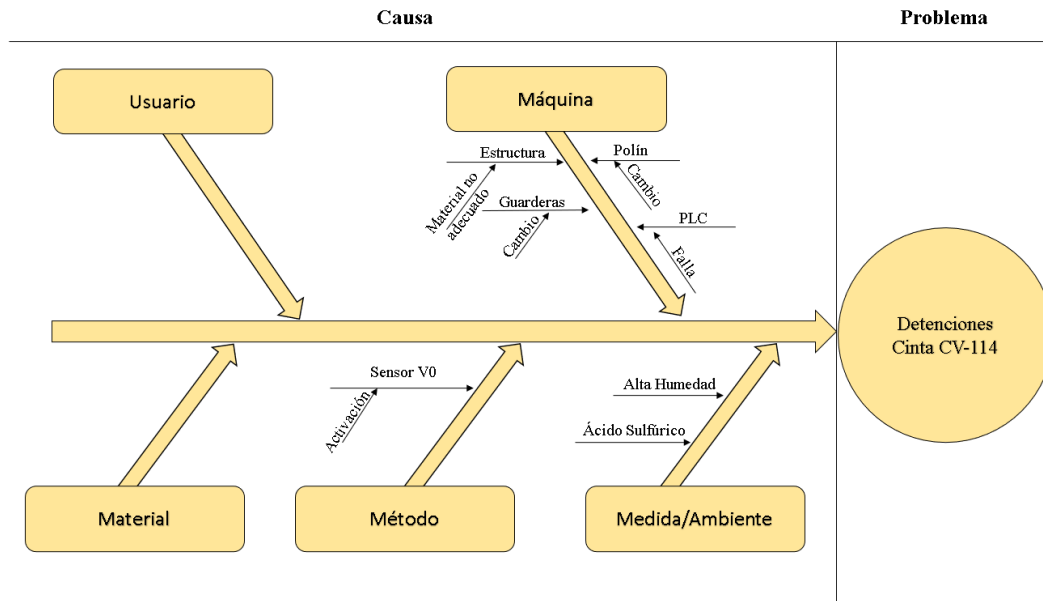


Figura 26: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de Cinta CV-114 de la Tabla 8, elaboración propia.

Al analizar las causas de las detenciones, se aprecia que existe un error de ensamblaje a la hora de construir la estructura, ya que el material seleccionado no es el adecuado para las condiciones ambientales en las que se trabajan, generando fallas en esta. Por otro lado, esta misma ausencia de consideración de las condiciones ambientales genera fallas en los sistemas eléctricos de la cinta.

- Cinta Andina, Tabla 9:

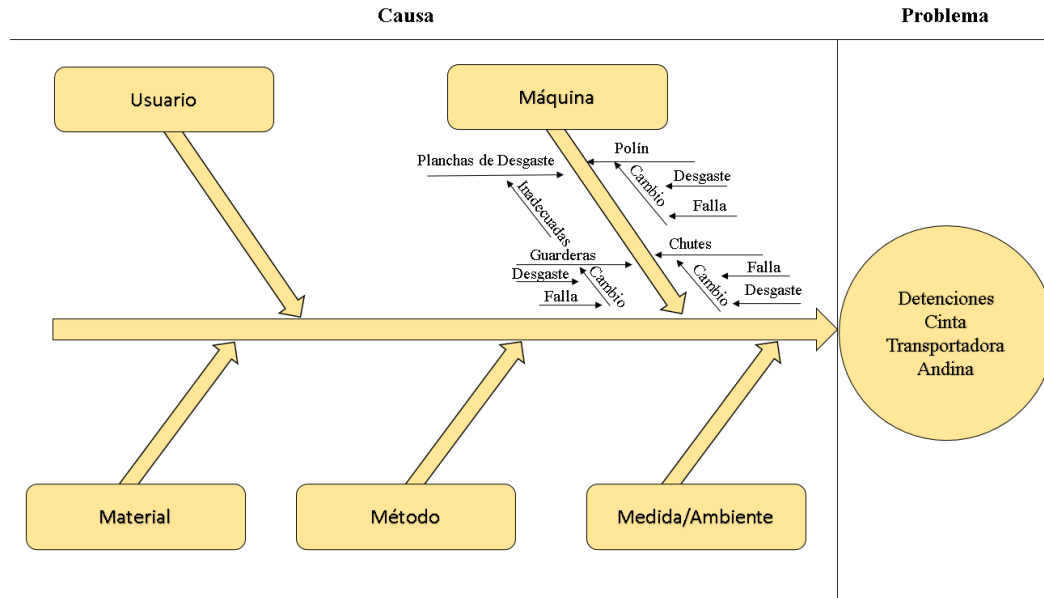


Figura 27: Diagrama de Ishikawa para los efectos de falla de la Cinta de la Tabla 9, elaboración propia.

Al analizar las causas de las detenciones de la cinta transportadora, se aprecia que se debe a diversas razones, entre ellas: los polines, las planchas de desgaste, las guarderas y los chutes de traspaso. Respecto al primero de estos, se deben realizar cambios debido a que no se genera una limpieza efectiva, además, se utilizan polines inadecuados para el trabajo, evidenciando que existen errores asociados al diseño; por otro lado, las planchas de desgaste no cumplen su función, evidenciando una errónea selección de elementos de trabajo y un error de diseño, de forma continua a la hora de inspeccionar los elementos mecánicos, esta tarea se realiza de forma ineficiente, evidenciando errores de inspección. Finalmente, los chutes de traspaso se deben cambiar debido al desgaste y a medida que fallan debido a puede existir un error de diseño y/o errores de inspección.

Como se puede apreciar, la mayoría de las principales causas raíz de detenciones se debe, en esencia, a un error humano. En el caso de cintas transportadoras, los efectos de fallas más frecuentes son los errores de diseño, instalación y de mantenimiento, cabe mencionar que las causas de las detenciones que no están atribuidas a un error humano, es porque se atribuyen a otras causas (detenciones programadas, mantenimientos preventivos, etc.)

Por lo que con esta información completamos parte de nuestro objetivo específico de averiguar cuáles son las fallas más comunes en correas transportadoras debido a la confiabilidad humana, si bien, identificamos exitosamente las fallas más comunes, no existe un registro cuantificable en la información levantada en este trabajo, esto debido a que en los trabajos de mantenimiento en los cuales se levantó la información no se planteaba la confiabilidad humana. A pesar de que las soluciones planteadas en los trabajos anteriormente citados cubren satisfactoriamente las detenciones, no son soluciones para la totalidad del problema, por lo que es probable que la falla o error cometido se presente nuevamente o se manifiesten de otra forma o en otro elemento.

Dado lo anterior, resulta necesaria una herramienta que mida y refleje los errores atribuidos a las personas, para utilizarse de forma complementaria a las herramientas que se poseen actualmente, de esta forma, se puede concentrar los esfuerzos y obtener mejores soluciones a las fallas de equipos y su causa raíz.

Por lo que continuaremos con nuestro siguiente objetivo de identificar los factores que definen el desempeño humano en el mantenimiento de correas transportadoras, esto nos permitirá identificar los modos de falla de las detenciones asociadas a error humano, además de otorgar parte de el esqueleto de nuestro modelo.

2.2 Definición de Factores que Definen el Desempeño (Performance Shaping Factors).

Como se mencionó anteriormente, existen distintos modelos que miden la confiabilidad humana, entre los que destacan los modelos de tercera generación, que tienen la ventaja de

prever la probabilidad de los errores humanos de los modelos de segunda generación, pero siendo aplicables de forma práctica como los modelos de primera generación.

A partir de esto se escogió el modelo de redes bayesianas debido a las ventajas que se presentaron anteriormente.

Para comenzar a construir el modelo propuesto a realizar es necesario definir los FDD (Factores que Definen el Desempeño), para esto, distintos psicólogos, sociólogos y profesionales han propuestos como base los siguientes conceptos a considerar, separándolos en factores internos y factores externos (Calixto E., 2016):

Factores Psicológicos: Principalmente factores relacionados a problemas emocionales como el estrés, agotamiento mental, depresión, desmotivación y falta de concentración.

Factores Fisiológicos: Principalmente relacionado a problemas físicos de las personas como condiciones de salud y enfermedades.

Factores Tecnológicos: Principalmente relacionado con condiciones de trabajo, herramientas y tecnología., como la ergonomía, procedimientos y equipamiento.

Factores Sociales: Principalmente relacionado con problemas sociales dentro y fuera del ambiente de trabajo, como deficientes habilidades sociales y ausencia de aceptación social en un grupo.

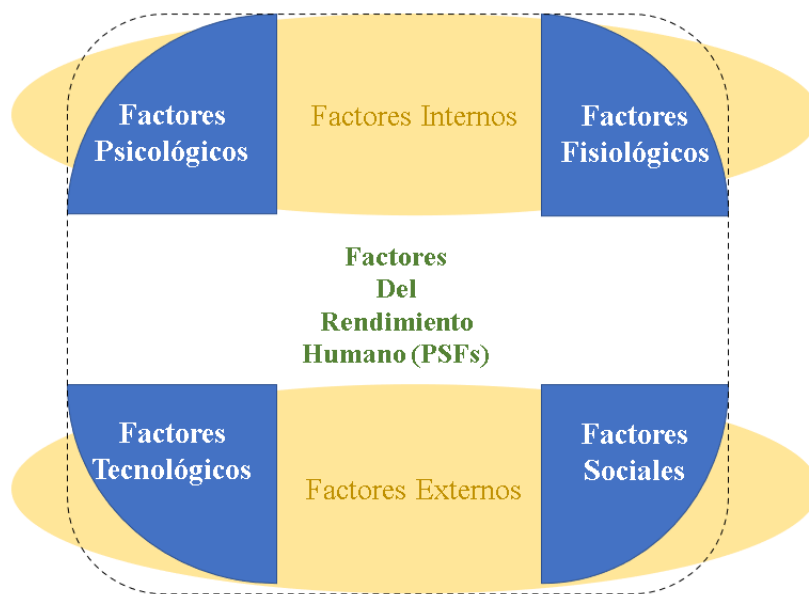


Figura 28: Diagrama de los factores del rendimiento humano, elaboración propia.

Dentro del estudio de la ACH, se han descubierto y estudiado muchos FDD, 15 como es el caso de la Comisión Reguladora Nuclear de los E.E.U.U., 8 en el caso del método SPAR-H y sin límites, como es en el caso del modelo ATHEANA sin embargo, no se tiene un consenso del alcance y la precisión de estos en los modelos de ACH (Boring R.L., 2010). A continuación, se presenta una tabla comparativa de distintos FDD de distintos modelos de ACH.

Modelos de Buenas Prácticas de la Comisión Reguladora Nuclear de los E.E.U.U.	SPAR-H	CREAM	Modelo de 9 Factores
Entrenamiento y Experiencia	Experiencia/Entrenamiento	Entrenamiento y Preparación Adecuada	Entrenamiento y Conocimiento
Procedimientos y Controles Administrativos	Procedimientos	Disponibilidad de Procedimientos/Planes	Recursos

Instrumentación	Ergonomía	Ergonomía y Soporte Operacional Adecuada	Máquina
Tiempo Disponible	Tiempo Disponible	Tiempo Disponible	Carga/Percepción
Complejidad	Complejidad	Cantidad de Objetivos Simultáneos	Complejidad
Carga de Trabajo/Presión de Tiempo/Estrés	Estrés/Estresantes	Cantidad de Objetivos Simultáneos	Carga/Percepción
Equipo/Dinámica de Equipo	Procedimiento de Trabajo	Calidad de Colaboración de Equipo	Equipo
Personal Disponible	Procedimiento de Trabajo	Organización Adecuada	Recursos
Interfaz Humano-Sistema	Ergonomía	Ergonomía y Soporte Operacional Adecuada	Máquina
Ambiente	Estrés/Estresantes	Condiciones Laborales	Complejidad
Accesibilidad/Operabilidad de Máquinas	Ergonomía	Ergonomía y Soporte Operacional Adecuada	Máquina
Necesidad de Herramientas Especiales	Ergonomía	Ergonomía y Soporte Operacional Adecuada	Recursos

Comunicaciones	Procedimiento de Trabajo	Calidad de Colaboración de Equipo	Equipo
Necesidades Físicas Especiales (Instrumentos)	Ergonomía	Ergonomía y Soporte Operacional Adecuada	Recursos
Consideraciones Realistas de Secuencias de Accidentes de Distracciones y Deviaciones	-	-	-
-	Estado Físico para la Tarea	Hora del Día	-
-	Procedimiento de Trabajo	Organización Adecuada	Cultura Organizacional
-	-	-	Actitud

Tabla 10: Tabla de comparación de distintos FDD respecto a cuatro modelos distintos de ACH (Boring R.L., 2010).

En esta construcción de modelo, se utilizarán 8 FDD, debido a que es una primera adaptación de ACH para el mantenimiento de cintas transportadoras. El utilizar un modelo más simplificado respecto a otros, que contienen una mayor cantidad de FDD, nos permitirá la flexibilidad de realizar un modelo que no presente muchas dificultades iniciales y que puede ser trabajado en el futuro. Los FDD que se utilizarán corresponden a:

- Tiempo disponible para realizar la tarea.
- Estrés.
- Complejidad de la tarea.
- Experiencia o entrenamiento.
- Procedimiento.
- Ergonomía.
- Estado físico para la tarea.
- Supervisión.

Es decir, si realizamos un diagrama del modelo bayesiano que se desea construir, tomando en consideración los FDD que se mencionaron anteriormente, sería el que se presenta a continuación:

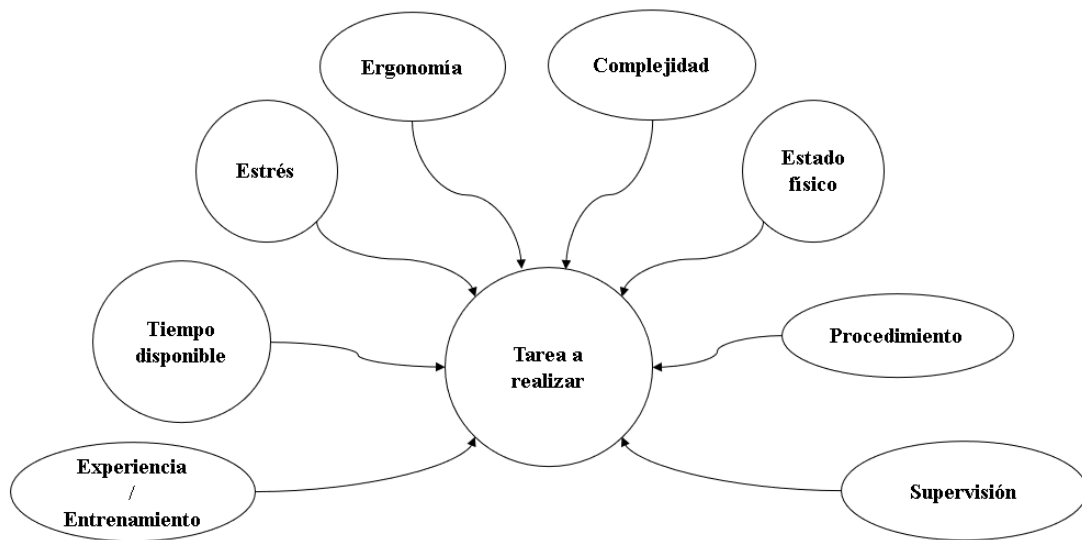


Figura 29: Analogía de los FDD considerados para un modelo bayesiano como se presenta en la Figura 7, elaboración propia.

Además de haber definido los FDD en la creación de un modelo para el mantenimiento de las correas transportadoras, esta definición también funciona como una codificación de los modos de falla del mantenimiento de cintas transportadoras, asociado a confiabilidad humana, este concepto se presenta en la figura a continuación.



Figura 30: Diagrama de flujo de causa-efecto, incluyendo modos de falla, efecto de falla y la evidencia de la falla asociado a la confiabilidad humana, elaboración propia.

Por lo que, con esto último, exitosamente se completa nuestro cuarto objetivo específico, por lo que continuaremos con nuestro último objetivo de desarrollar nuestro modelo.

2.3 Propuesta de Modelo de Confiabilidad Humana.

Para este trabajo, se desea proponer un modelo de confiabilidad humana en base a un modelo de tercera generación, específicamente de redes bayesianas que sea aplicable en el mantenimiento de cintas transportadoras, para esto, era necesario poseer los FDD que se desean utilizar, presentados en la sección anterior.

Por lo que el paso siguiente corresponde a la construcción del modelo a partir de los datos que se tengan disponibles, por lo que se pueden presentar dos situaciones: la primera situación es aquella en la cual no se posee una base de datos de las detenciones y su causa asociada, pero si se posee un grupo de personas que están familiarizadas con las tareas a evaluar; y la segunda, es que si se posee una base de datos de las cuales se puedan trabajar, por lo que se indicará como construir el modelo a partir de ambas situaciones.

2.3.1 Caso N°1 para la Construcción del Modelo de Confiabilidad Humana.

Para la primera situación, en el caso que solamente se posea un panel de expertos para las tareas a evaluar, el primer paso para construir la red bayesiana es asignarle un valor a los FDD de forma individual, además de como interactúa con los otros FDD, para asignar un peso a cada uno de estos valores, y continuamente, es necesario realizar un cuestionario que evalúe lo mencionado anteriormente, como se muestra en la siguiente simulación:

- Tareas relacionadas con el Diseño:

FDD	Peso Atribuido
	0-10

Tiempo Disponible	9
Estrés	6
Complejidad	5
Experiencia / Entrenamiento	5
Procedimiento	7
Ergonomía	3
Estado Físico	3
Supervisión	5

Tabla 11: Tabla de pesos atribuidos a los FDD en relación con las tareas de Diseño, elaboración propia.

Por lo que los FDD a evaluar son el tiempo disponible para realizar la tarea, el estrés mientras esta se realiza y el procedimiento de esta.

- Tareas relacionadas con Inspecciones de Rutina:

FDD	Peso Atribuido 0-10
Tiempo Disponible	8
Estrés	5
Complejidad	3
Experiencia / Entrenamiento	7
Procedimiento	9
Ergonomía	2
Estado Físico	6

Supervisión	3
-------------	---

Tabla 12: Tabla de pesos atribuidos a los FDD en relación con las tareas de Inspecciones de Rutina, elaboración propia.

Por lo que los FDD a evaluar son el tiempo disponible para realizar la tarea, la experiencia o entrenamiento que se tiene para esta y el procedimiento de esta.

- Tareas relacionadas con el Mantenimiento

FDD	Peso Atribuido 0-10
Tiempo Disponible	5
Estrés	3
Complejidad	6
Experiencia / Entrenamiento	7
Procedimiento	9
Ergonomía	3
Estado Físico	4
Supervisión	5

Tabla 13: Tabla de pesos atribuidos a los FDD en relación con las tareas de Mantenimiento, elaboración propia.

Por lo que los FDD a evaluar son la complejidad de la tarea, la experiencia o entrenamiento que se tiene para esta y el procedimiento de esta.

- Tareas relacionadas con la Instalación

FDD	Peso Atribuido
-----	----------------

	0-10
Tiempo Disponible	3
Estrés	2
Complejidad	6
Experiencia / Entrenamiento	5
Procedimiento	9
Ergonomía	3
Estado Físico	5
Supervisión	8

Tabla 14: Tabla de pesos atribuidos a los FDD en relación con las tareas de Instalación, elaboración propia.

Por lo que los FDD a evaluar son la complejidad de la tarea, el procedimiento de esta y la supervisión de esta.

Una vez atribuido los pesos a partir del trabajo de los expertos, se procede a calcular la Probabilidad del Error Humano o Human Error Probability (PEH) según indica la ecuación 2 para cada tarea a evaluar, sin embargo, el cálculo de cada tarea siguiendo esta metodología es largo y tedioso, teniendo como consecuencia una mayor probabilidad de error a la hora de calcular el PEH, siendo a la vez, poco práctico, ya que existen un total de 263 preguntas debido a todas las posibles combinaciones posibles de los estados de los FDD, como se evidencia en el Ejemplo N°1 (Véase Anexo), por lo que se propone solamente elegir 3 FDD que tengan la mayor influencia en la tarea a analizar, debido a que de esta forma se simplifica la tarea de evaluar los pesos de los FDD, con lo que se obtiene el Cuestionario N°1, que se debe adaptar para cada tarea a analizar, el cual se presenta en la sección de anexos.

A continuación, se presenta el cálculo de acuerdo con la tarea a analizar, en concordancia con lo presentado anteriormente, además se presentará la representación gráfica de la Red Bayesiana.

- Tareas relacionadas con el Diseño:

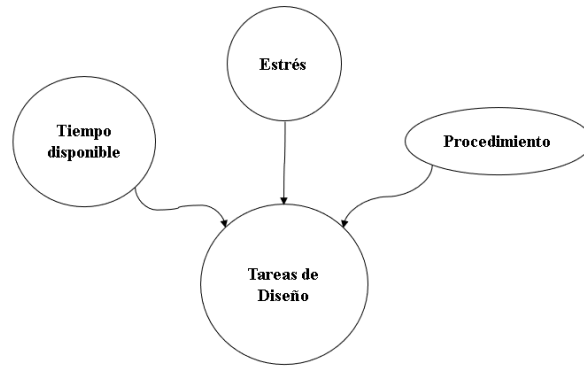


Figura 31: Representación gráfica de la aplicación del modelo de confiabilidad humana para las tareas de mantenimiento relacionadas con el diseño, elaboración propia.

De acuerdo a la Ecuación 2, donde la probabilidad del error humano se definirá por PEH , la variable T_1 representa al tiempo disponible, donde $T_1 = 1$ representa una condición favorable y $T_1 = 0$ representa una condición desfavorable, la variable E_1 representa el estrés, la variable Pr_1 representa el procedimiento y la variable R representa el rendimiento humano, donde de forma análoga a lo anterior los valores 0 y 1 representan las condiciones favorables y desfavorables.

$$PEH = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 P(T_1 = i) \times P(E_1 = j) \times P(Pr_1 = k) \times (R = 1 | T_1 = i, E_1 = j, Pr_1 = k) \quad (3)$$

Además, $\bar{R}$ representa presencia de error humano, es decir $R = 1$, T representa un estado favorable para el tiempo disponible, es decir, $T = 0$ y $\bar{T} = 1$ un estado desfavorable, y de forma análoga para $E, \bar{E}, Pr$ y $\bar{Pr}$, por lo que se obtiene que:

$$\begin{aligned} PEH = & P(\bar{R}|\bar{T}, \bar{E}, \bar{Pr}) \times P(\bar{T}) \times P(\bar{E}) \times P(\bar{Pr}) + P(\bar{R}|T, \bar{E}, \bar{Pr}) \times P(T) \times P(\bar{E}) \times P(\bar{Pr}) + \\ & P(\bar{R}|\bar{T}, E, \bar{Pr}) \times P(\bar{T}) \times P(E) \times P(\bar{Pr}) + P(\bar{R}|T, \bar{E}, Pr) \times P(T) \times P(\bar{E}) \times P(Pr) + \\ & P(\bar{R}|T, E, \bar{Pr}) \times P(T) \times P(E) \times P(\bar{Pr}) + P(\bar{R}|T, \bar{E}, Pr) \times P(T) \times P(\bar{E}) \times P(Pr) + \\ & P(\bar{R}|\bar{T}, E, Pr) \times P(\bar{T}) \times P(E) \times P(Pr) + P(\bar{R}|T, E, Pr) \times P(T) \times P(E) \times P(Pr) \end{aligned} \quad (4)$$

Reemplazando los valores a partir del cuestionario se tendrán dos valores de PEH , un caso optimista y otro pesimista, por lo que se tendrá que:

$$\begin{aligned}
PEH_{Diseño_{pesimista}} = & 0,9 \times 0,4 \times 0,2 \times 0,3 + 0,8 \times 0,6 \times 0,2 \times 0,3 + 0,6 \times 0,4 \times 0,8 \times \\
& 0,3 + 0,7 \times 0,4 \times 0,2 \times 0,7 + 0,4 \times 0,6 \times 0,8 \times 0,3 + 0,55 \times 0,3 \times 0,2 \times 0,7 + 0,5 \times 0,4 \times \\
& 0,8 \times 0,7 + 0,2 \times 0,6 \times 0,8 \times 0,7
\end{aligned} \tag{5}$$

$$PEH_{Diseño_{pesimista}} = 38,04 \%$$

Y para el caso optimista se tendrá que:

$$\begin{aligned}
PEH_{Diseño_{optimista}} = & 0,4 \times 0,2 \times 0,1 \times 0,15 + 0,4 \times 0,8 \times 0,1 \times 0,15 + 0,35 \times 0,2 \times 0,9 \times \\
& 0,15 + 0,4 \times 0,2 \times 0,1 \times 0,85 + 0,3 \times 0,8 \times 0,9 \times 0,15 + 0,25 \times 0,8 \times 0,1 \times 0,85 + 0,3 \times \\
& 0,2 \times 0,9 \times 0,85 + 0,1 \times 0,8 \times 0,9 \times 0,85
\end{aligned} \tag{6}$$

$$PEH_{Diseño_{optimista}} = 17,28 \%$$

- Tareas relacionadas con Inspecciones de Rutina

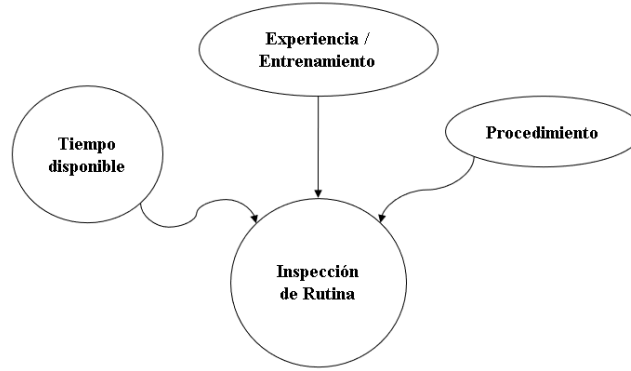


Figura 32: Representación gráfica de la aplicación del modelo de confiabilidad humana para las tareas de mantenimiento relacionadas con las Inspecciones de Rutina, elaboración propia.

De forma análoga a lo anterior, la PEH estará dada a partir de la ecuación 2, adaptado a los FDD seleccionados para las Inspecciones de Rutina de acuerdo con la Tabla 18, donde la variable $\bar{R}$ representa presencia de error humano, es decir $R = 1$, T representa un estado favorable para el tiempo disponible, es decir, $T = 0$ y $\bar{T} = 1$ un estado desfavorable, y de forma análoga para $Exp, \bar{Exp}, Pr$ y $\bar{Pr}$, representando la experiencia o entrenamiento y el procedimiento respectivamente, por lo que se obtiene que la ecuación para el PEH será:

$$\begin{aligned}
 PEH = & P(\bar{R}|\bar{T}, \bar{Exp}, \bar{Pr}) \times P(\bar{T}) \times P(\bar{Exp}) \times P(\bar{Pr}) + P(\bar{R}|T, \bar{Exp}, \bar{Pr}) \times P(T) \times \\
 & P(\bar{Exp}) \times P(\bar{Pr}) + P(\bar{R}|\bar{T}, Exp, \bar{Pr}) \times P(\bar{T}) \times P(Exp) \times P(\bar{Pr}) + P(\bar{R}|T, \bar{Exp}, Pr) \times \\
 & P(T) \times P(\bar{Exp}) \times P(Pr) + P(\bar{R}|T, Exp, \bar{Pr}) \times P(T) \times P(Exp) \times P(\bar{Pr}) + \\
 & P(\bar{R}|T, \bar{Exp}, Pr) \times P(T) \times P(\bar{Exp}) \times P(Pr) + P(\bar{R}|\bar{T}, Exp, Pr) \times P(\bar{T}) \times P(Exp) \times \\
 & P(Pr) + P(\bar{R}|T, Exp, Pr) \times P(T) \times P(Exp) \times P(Pr)
 \end{aligned} \quad (7)$$

Por lo que para el caso pesimista se tendrá:

$$\begin{aligned}
 PEH_{Inspección_{pesimista}} = & 0,9 \times 0,35 \times 0,3 \times 0,5 + 0,75 \times 0,65 \times 0,3 \times 0,5 + 0,65 \times 0,35 \times \\
 & 0,7 \times 0,5 + 0,6 \times 0,35 \times 0,3 \times 0,5 + 0,7 \times 0,65 \times 0,7 \times 0,5 + 0,35 \times 0,65 \times 0,3 \times 0,5 + \\
 & 0,4 \times 0,35 \times 0,7 \times 0,5 + 0,2 \times 0,65 \times 0,7 \times 0,5
 \end{aligned} \quad (8)$$

$$PEH_{Inspección_{pesimista}} = 40,25 \%$$

Y para el caso optimista se tendrá que:

$$\begin{aligned}
 PEH_{Inspección_{optimista}} = & P(\bar{R}|\bar{T}, \bar{E}, \bar{Pr}) \times 0,2 \times 0,15 \times 0,3 + P(\bar{R}|T, \bar{E}, \bar{Pr}) \times 0,8 \times 0,15 \times \\
 & 0,3 + P(\bar{R}|\bar{T}, E, \bar{Pr}) \times 0,2 \times 0,85 \times 0,3 + P(\bar{R}|\bar{T}, \bar{E}, Pr) \times 0,2 \times 0,15 \times 0,7 + \\
 & P(\bar{R}|T, E, \bar{Pr}) \times 0,8 \times 0,85 \times 0,3 + P(\bar{R}|T, \bar{E}, Pr) \times 0,8 \times 0,15 \times 0,7 + P(\bar{R}|\bar{T}, E, Pr) \times \\
 & 0,2 \times 0,85 \times 0,7 + P(\bar{R}|T, E, Pr) \times 0,8 \times 0,85 \times 0,7
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$PEH_{Inspección_{optimista}} = 22,39 \%$$

- Tareas relacionadas con el Mantenimiento

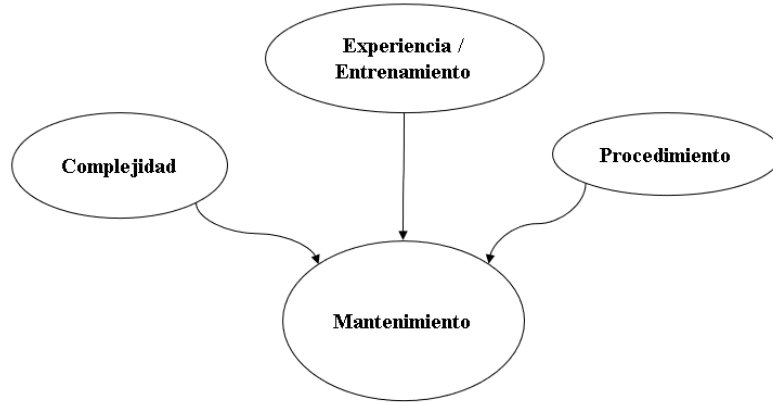


Figura 33: Representación gráfica de la aplicación del modelo de confiabilidad humana para las tareas de mantenimiento relacionadas con las tareas de Mantenimiento, elaboración propia.

De forma equivalente a lo anterior, la PEH estará dada a partir de la ecuación 2, adaptado a los FDD seleccionados para las tareas de Mantenimiento de acuerdo con la Tabla 19, donde la variable $\bar{R}$ representa presencia de error humano, es decir $R = 1$, C representa un estado favorable para la complejidad de la tarea, es decir, $C = 0$ y $\bar{C} = 1$ un estado desfavorable, y de forma análoga para $Exp, \bar{Exp}, Pr$ y $\bar{Pr}$, representando la experiencia o entrenamiento y el procedimiento respectivamente, por lo que se obtiene que la ecuación para el PEH será:

$$\begin{aligned}
 PEH = & P(\bar{R}|\bar{C}, \bar{E}, \bar{Pr}) \times P(\bar{C}) \times P(\bar{E}) \times P(\bar{Pr}) + P(\bar{R}|C, \bar{E}, \bar{Pr}) \times P(C) \times P(\bar{E}) \times P(\bar{Pr}) + \\
 & P(\bar{R}|\bar{C}, E, \bar{Pr}) \times P(\bar{C}) \times P(E) \times P(\bar{Pr}) + P(\bar{R}|\bar{C}, \bar{E}, Pr) \times P(\bar{C}) \times P(\bar{E}) \times P(Pr) + \\
 & P(\bar{R}|C, E, \bar{Pr}) \times P(C) \times P(E) \times P(\bar{Pr}) + P(\bar{R}|C, \bar{E}, Pr) \times P(C) \times P(\bar{E}) \times P(Pr) + \\
 & P(\bar{R}|\bar{C}, E, Pr) \times P(\bar{C}) \times P(E) \times P(Pr) + P(\bar{R}|C, E, Pr) \times P(C) \times P(E) \times P(Pr)
 \end{aligned} \quad (10)$$

Por lo que para el caso pesimista se tendrá:

$$\begin{aligned}
 PEH_{Mantenimiento_{pesimista}} = & 0,9 \times 0,2 \times 0,35 \times 0,5 + 0,85 \times 0,8 \times 0,35 \times 0,5 + 0,8 \times \\
 & 0,2 \times 0,65 \times 0,5 + 0,7 \times 0,2 \times 0,35 \times 0,5 + 0,5 \times 0,8 \times 0,65 \times 0,5 + 0,4 \times 0,8 \times 0,35 \times \\
 & 0,5 + 0,3 \times 0,2 \times 0,65 \times 0,5 + 0,2 \times 0,8 \times 0,65 \times 0,5
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$PEH_{Mantenimiento_{pesimista}} = 33,77 \%$$

Y para el caso optimista se tendrá que:

$$\begin{aligned} PEH_{Mantenimiento_{optimista}} = & 0,5 \times 0,1 \times 0,2 \times 0,3 + 0,45 \times 0,9 \times 0,2 \times 0,3 + 0,4 \times 0,1 \times \\ & 0,8 \times 0,3 + 0,3 \times 0,1 \times 0,2 \times 0,7 + 0,35 \times 0,9 \times 0,8 \times 0,3 + 0,2 \times 0,9 \times 0,2 \times 0,7 + \\ & 0,15 \times 0,1 \times 0,8 \times 0,7 + 0,1 \times 0,9 \times 0,8 \times 0,7 \end{aligned} \quad (12)$$

$$PEH_{Mantenimiento_{optimista}} = 17,35 \%$$

- Tareas relacionadas con la Instalación

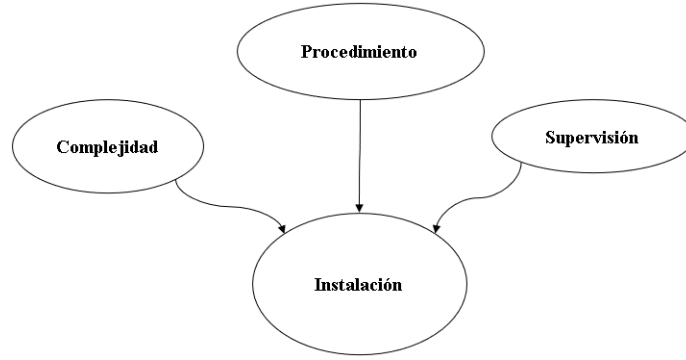


Figura 34: Representación gráfica de la aplicación del modelo de confiabilidad humana para las tareas de mantenimiento relacionadas con las tareas de Mantenimiento, elaboración propia.

De forma similar a lo anterior, la PEH estará dada a partir de la ecuación 2, adaptado a los FDD seleccionados para las tareas de Mantenimiento de acuerdo con la Tabla 20, donde la variable $\bar{R}$ representa presencia de error humano, es decir $R = 1$, C representa un estado favorable para la complejidad de la tarea, es decir, $C = 0$ y $\bar{C} = 1$ un estado desfavorable, y de forma análoga para $Pr, \bar{Pr}, S$ y $\bar{S}$, representando el procedimiento y la supervisión respectivamente, por lo que se obtiene que la ecuación para el PEH será:

$$\begin{aligned}
 PEH = & P(\bar{R}|\bar{C}, \bar{Pr}, \bar{S}) \times P(\bar{C}) \times P(\bar{Pr}) \times P(\bar{S}) + P(\bar{R}|C, \bar{Pr}, \bar{S}) \times P(C) \times P(\bar{Pr}) \times P(\bar{S}) + \\
 & P(\bar{R}|\bar{C}, Pr, \bar{S}) \times P(\bar{C}) \times P(Pr) \times P(\bar{S}) + P(\bar{R}|\bar{C}, \bar{Pr}, S) \times P(\bar{C}) \times P(\bar{Pr}) \times P(S) + \\
 & P(\bar{R}|C, Pr, \bar{S}) \times P(C) \times P(Pr) \times P(\bar{S}) + P(\bar{R}|C, \bar{Pr}, S) \times P(C) \times P(\bar{Pr}) \times P(S) + \\
 & P(\bar{R}|\bar{C}, Pr, S) \times P(\bar{C}) \times P(Pr) \times P(S) + P(R|C, Pr, S) \times P(C) \times P(Pr) \times P(S)
 \end{aligned} \quad (13)$$

Por lo que para el caso pesimista se tendrá:

$$\begin{aligned}
 PEH_{Instalación_{pesimista}} = & 0,9 \times 0,3 \times 0,5 \times 0,4 + 0,8 \times 0,7 \times 0,5 \times 0,4 + 0,6 \times 0,3 \times 0,5 \times \\
 & 0,4 + 0,7 \times 0,3 \times 0,5 \times 0,6 + 0,4 \times 0,7 \times 0,5 \times 0,4 + 0,5 \times 0,7 \times 0,5 \times 0,6 + 0,3 \times 0,3 \times \\
 & 0,5 \times 0,6 + 0,2 \times 0,7 \times 0,5 \times 0,6
 \end{aligned} \quad (14)$$

$$PEH_{Instalación_{pesimista}} = 33,50 \%$$

Y para el caso optimista se tendrá que:

$$\begin{aligned}
 PEH_{Instalaci3n_{optimista}} = & 0,6 \times 0,1 \times 0,3 \times 0,2 + 0,5 \times 0,9 \times 0,3 \times 0,2 + 0,3 \times 0,1 \times 0,7 \times \\
 & 0,2 + 0,4 \times 0,1 \times 0,3 \times 0,8 + 0,2 \times 0,9 \times 0,7 \times 0,2 + 0,3 \times 0,9 \times 0,3 \times 0,8 + 0,1 \times 0,1 \times \\
 & 0,7 \times 0,8 + 0,1 \times 0,9 \times 0,7 \times 0,8
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$PEH_{Instalaci3n_{optimista}} = 15,99 \%$$

2.3.2 Caso N°2 para la Construcción del Modelo de Confiabilidad Humana.

Para la segunda situación, en el caso que, si se posea una base de datos histórica de las detenciones y su causa, es posible hacer uso de softwares de dominio público para la construcción de Redes Bayesianas como Elvira, Netica, entre otros; para especificar manualmente la estructura gráfica. La utilidad de construir un modelo de esta forma es que se puede utilizar en plenitud las ventajas que ofrecen las redes bayesianas, ya que, a pesar de que ofrecen resultados a partir de información a priori, también ofrecen resultados entregando información a posteriori.

Para este caso, para la simulación de la construcción de la Red Bayesiana, se utilizará el Software Netica, entregando como base de datos el 70% de un consolidado de las detenciones de las distintas cintas transportadoras presentadas anteriormente, redefiniendo las fallas de esta, como se muestra en la tabla a continuación, donde cada hora de detención será equivalente a un caso de detención, de esta forma el resto de la información se entregará a posteriori y se procederá a validar la Red Bayesiana.

Falla	Horas
Polín	838,24
Cinta	461,68
Fallas Eléctricas	175,58
Tambor Motriz	120
Limpiadores	88
Tambor Retorno	80
Elementos Tensores	76
Tolva	66
Estructura	36,63
Guardera	29,07
Carro	23,66
Planchas de Desgaste	15
Buzón	14,86
Motor	13,68
Pull Cord	11,19
Sensor Velocidad Cero	10,93
Rodamiento	6,26
Raspadores	5
Sensor	2,63
Correas de Transmisión	2
Acoplamiento	1,82
Multilín	0,68
Carga	0,64

Tabla 15: Consolidado de fallas en cintas transportadoras de acuerdo con las Tablas 5,6,7,8 y 9 en horas.

Sin embargo, a la hora de realizar la base de datos para la conformación de la Red Bayesiana, se enfrenta la situación de que no existe una norma de registros de detenciones que informen de forma particular en cada caso, el elemento que falló, tiempo de detención, el tipo de detención, su causa con detalle correspondiente y el FDD principal asociado, solamente se encontraron registros que indican posibles causas de forma general.

Por lo tanto, para clasificar la causa de cada elemento que falló, se utilizarán las causas que se presentaron de acuerdo con los análisis de causa raíz, por ejemplo, al realizar el ejercicio con los Polines, se observa que las causas de detención atribuidas a los polines de deben principalmente a detenciones programadas y a detenciones no programadas asociadas a errores de diseño y errores de instalación, por lo que de los 838 casos asociados a fallas de los polines, se deben distribuir en las causas mencionadas anteriormente, además de atribuir un FDD principal asociado esta, que será uno de los tres que tienen mayor peso respectivamente.

Por lo que nuestra base de datos para la construcción del modelo será la que se presenta en la bibliografía N°31, sin embargo, esta se presenta como resumen en el anexo N°5.8.

A continuación, se presenta el diagrama de la Red Bayesiana propuesta, este es nuestro planteamiento teórico de cómo se relacionará cada nodo de nuestra red bayesiana, conceptos que definimos anteriormente.

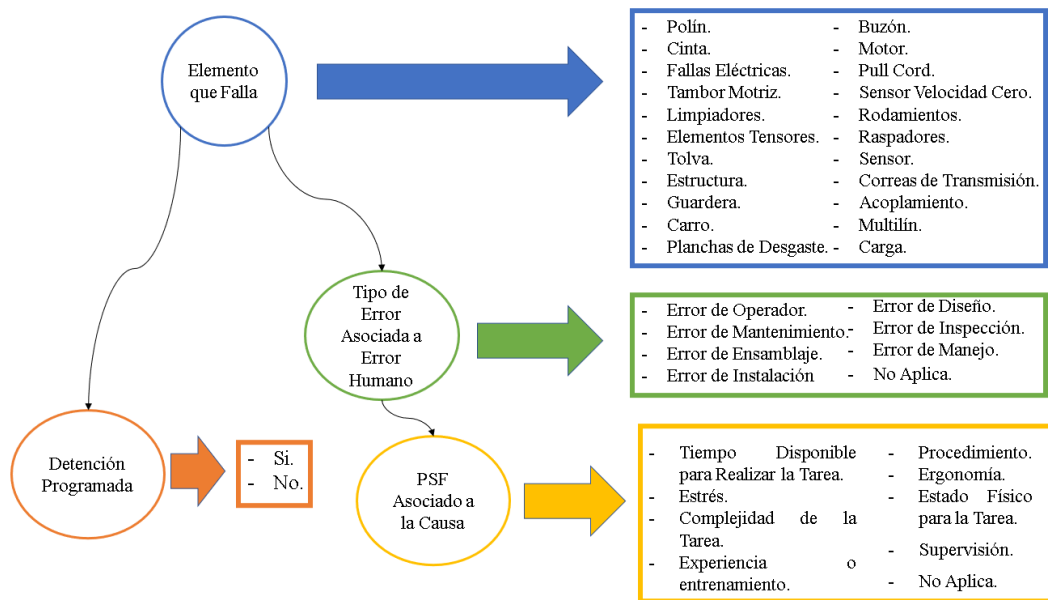


Figura 35: Diagrama de la Red Bayesiana propuesta para la estimación del Error Humano en el Mantenimiento de Cintas Transportadoras, elaboración propia.

Por lo que se procede a utilizar el Software Netica para crear la Red Bayesiana.

Netica es un software que permite la fabricación de redes bayesianas, este es bastante intuitivo, sin embargo, se adjunta en la bibliografía N°29 una guía para la construcción de estas, además el mismo software posee una guía interna disponible para todos los usuarios, sin embargo, de modo de resumen, se presentarán figuras que indiquen el cómo se construyó la red, con el fin de facilitar la comprensión.

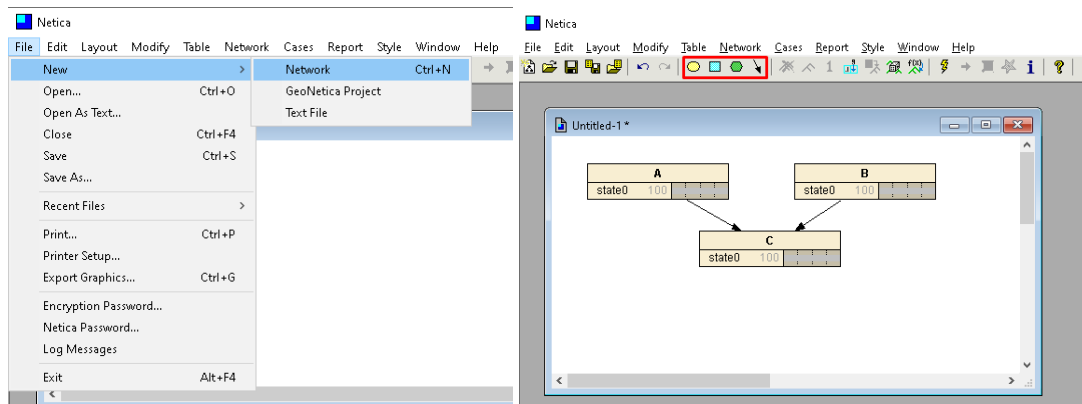


Figura 36: Imágenes del software Netica para la construcción de la Red Bayesiana, elaboración propia.

En la figura 36, se aprecia algunos de los comandos disponibles en el software Netica, entre ellos, el cómo comenzar la construcción de una red bayesiana, y las herramientas que permite la creación de nodos, y las relaciones entre ellos, respectivamente. Cada nodo se puede editar con el fin de puede agregar y dar formato a la información, de esta forma el programa es capaz de interpretarla y realizar cálculos con ella.

Dentro de una de las facilidades que posee Netica, es agregar base de datos, ya sean estén fabricadas como un documento de texto (.txt) o como tablas de Excel (.xlsx), como se aprecia en la siguiente figura.

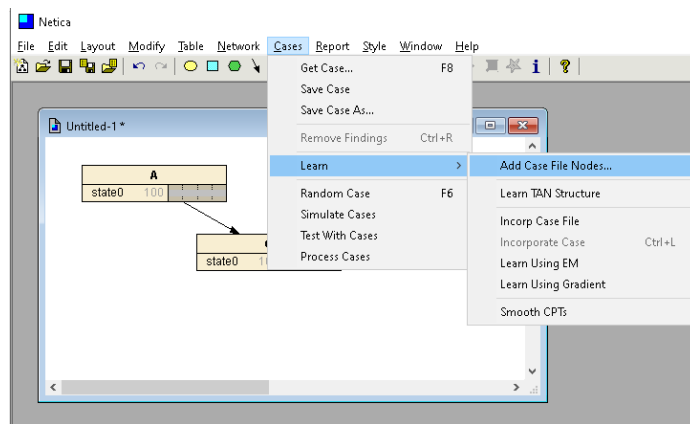


Figura 37: Extracto de imagen del software Netica para la importación de datos a utilizar en la construcción de la red bayesiana, elaboración propia.

Cabe mencionar que la finalidad de este trabajo es otorgar un modelo que sirva como herramienta para el mantenimiento de cintas transportadoras, por lo que se invita al lector a revisar la bibliografía y descargar el programa, en caso de que se desee más información en cómo funciona el programa. Una vez importada la información de la base de datos de la bibliografía N°31, solamente se utiliza un 70% de esta información, con el fin de que posteriormente se pueda validar con el 30% restante, por lo que a continuación se presenta la red resultante:

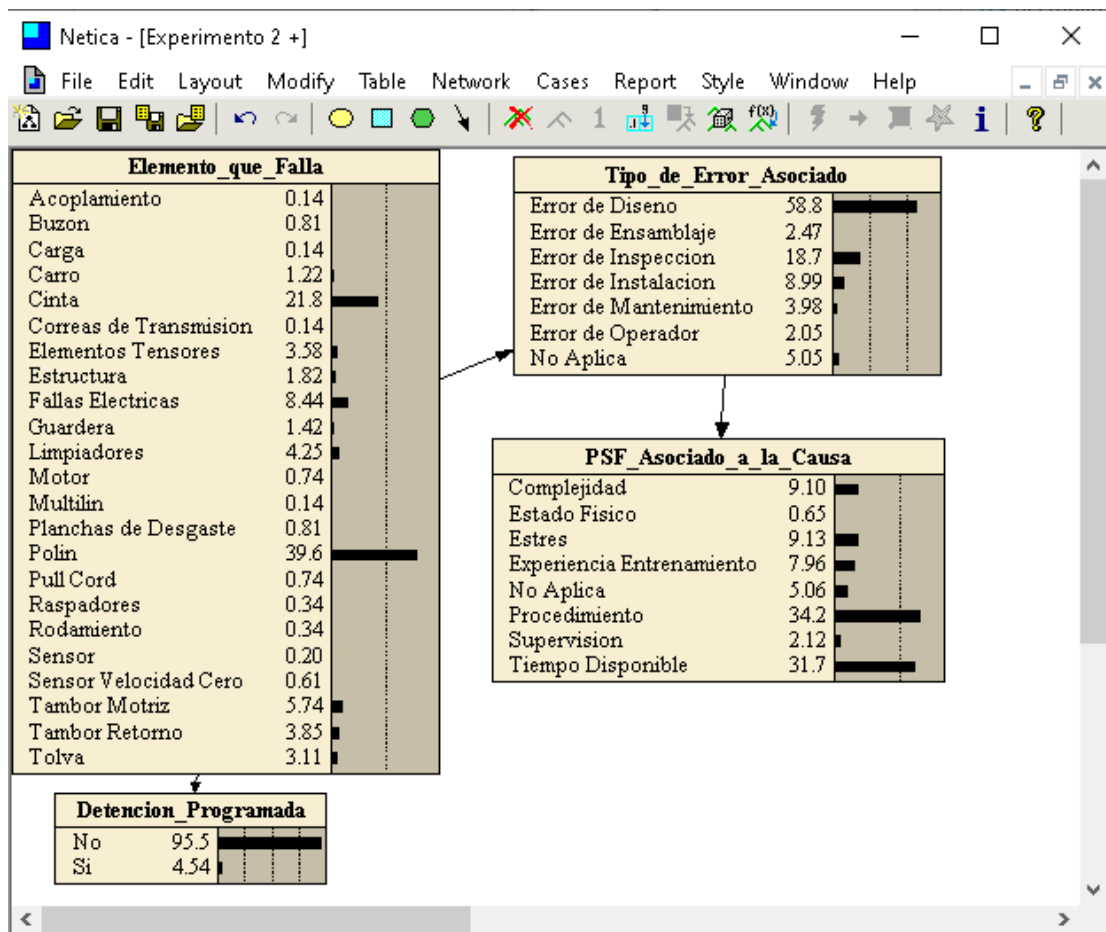


Figura 38: Red Bayesiana construida a partir del Software Netica, elaboración propia.

Por lo que se procede a realizar la validación para cada nodo de la Red Bayesiana, es decir, a los nodos llamados: “Elemento_que_Falla”, “Tipo_de_Error_Asociado”, “Detención_Programada” y “PSF_Asociado_a_la_Causa”, con el 30% restante de la base de datos y se obtienen los siguientes resultados:

Nodo Correspondiente a la Validación	Pérdida Logarítmica	Pérdida Cuadrática	Compensación Esférica	Tasa de Error
Elemento_que_Falla	1,287	0,5196	0,6635	36,6%
Tipo_de_Error_Asociado	0,2527	0,152	0,9152	11,24%
Detención_Programada	0,09272	0,042	0,9784	2,247%
PSF_Asociado_a_la_Causa	1,056	0,5936	0,6319	51,69%

Tabla 16: Tabla resumen del resultado de validación de la Red Bayesiana a través del Software Netica.

2.4 Discusión y Plan de Acción

La validación de un nodo funciona a través de la predicción del resultado del nodo en cuestión a través del aprendizaje de la base de datos entregados anteriormente y parte de la base de datos con la que se valida, por ejemplo, una vez entregado los valores de “Tipo_de_Error_Asociado”, “Detención_Programada” y “PSF_Asociado_a_la_Causa”, la Red Bayesiana predice un valor para el “Elemento_que_Falla”, y este lo compara con el valor real.

Como se presentó en la Tabla 16, se obtuvieron distintos resultados de validación, entre ellos los que destacan es la tasa de error, si analizamos estos resultados, para el primer caso se tiene una tasa de 36,6%, esto es un valor relativamente alto, sin embargo, esto se explica mediante a través de la explicación de cómo funciona la validación de un nodo, ya que se está respondiendo a la pregunta: De acuerdo con estos síntomas ¿Cuál es el elemento que falla?, respuesta que carece de sentido ya que le estaríamos preguntando a la Red Bayesiana cual fue el elemento que fallo, cuando se puede evidenciar directamente.

Por otro lado, se obtienen resultados interesantes cuando se validaron los nodos correspondientes a “Tipo_de_Error_Asociado” con una tasa de error de 11,24%, es decir, que la Red Bayesiana responde con un error menor al 12% en los nuevos casos presentados a la pregunta: ¿A qué error humano se atribuye a la falla del elemento “X” en particular? Por lo que se puede rápidamente enfocar los esfuerzos en buscar soluciones para los errores presentes.

Por lo que, dentro de las ventajas y desventajas, de la construcción del modelo, comenzando con el primer método, tiene como ventaja de que se puede aplicar sin tener una base de datos histórica de las fallas de los componentes, sin embargo, al depender de un panel de expertos, depende directamente de un grupo de personas, propensas a cometer errores, también a mayor cantidad de FDD o nodos, más se complejizará el cálculo y no se podrá utilizar todo el potencial que ofrece una red bayesiana.

Por otro lado, si se opta por usar una base de datos, se puede utilizar un software para la construcción de la red bayesiana, que también realizará todos los cálculos de todos los nodos según como se construya la red, sin embargo, posee como desventaja que, al depender de una base de datos, esta deberá ser construida de forma cautelosa.

La gran ventaja de construir el modelo de esta forma es que se puede utilizar el potencial de las redes bayesianas si utilizamos un software, ya que, si le entregamos información a este, dependiendo si está completa o incompleta, la red se va a actualizar, o, la red me va a entregar el resto de la información, es decir, funciona como una herramienta predictiva.

Por lo que el plan de acción para la reducción del error humano es comenzando con elegir una metodología para la implementación de la Red Bayesiana para el ACH, ya sea a través de un panel de expertos que sea capaz de evaluar de forma exitosa las causas asociadas de errores humanos para las fallas en el mantenimiento de las cintas transportadoras o utilizando la ficha presentada en Anexo N°5.7, de forma complementaria a las formas de registro de fallas de equipos que se utilizan actualmente, de ésta forma, realizar un levantamiento de información y generar una base de datos para la fabricación de la Red Bayesiana. Independientemente de la forma de trabajo que se escoja, éste debe ser llevado a cabo por los trabajadores en conjunto con el personal a cargo de mantenimiento para validar de forma correcta la información, de esta forma también se pueden generar retroalimentaciones para la planificación y fabricación de la Red Bayesiana con el fin de que se adapte de mejor forma al elemento de estudio.

Con esto completamos satisfactoriamente nuestro quinto objetivo específico de desarrollar un modelo de confiabilidad humana aplicada en el mantenimiento de correas transportador, ya que se ofrecen y se desarrollan dos alternativas para conseguir este resultado.

3 Conclusiones

El objetivo de este trabajo radica en proponer un modelo de análisis de confiabilidad humana bajo enfoque bayesiano centrado en el mantenimiento de correas transportadoras y sus modos de fallas, con el fin de evidenciar que el error humano está presente en muchas áreas, poder medirlo cuantitativamente y disminuirlo en el ámbito de lo posible. Para lograr este objetivo, se plantearon las distintas definiciones del error humano, la ciencia del ACH y, además, grandes incidentes debidos a errores humanos con el fin de evidenciar la importancia de esta ciencia.

Debido a que las consecuencias del error humano pueden tener distintas magnitudes en distintas áreas (ya sea en la medicina, aeronáutica, la industria nuclear y petrolera), es importante que en la industria de la ingeniería mecánica se comience a implementar la ciencia de la confiabilidad humana en los distintos procesos y tener, de esta forma, un registro y control respecto al error humano. De este modo, y en base a la evidencia que se muestra en este trabajo respecto a las fallas más comunes debidas al error humano en correas transportadoras, se hace una invitación a que dicha ciencia se implemente análogamente en otros ámbitos de la ingeniería mecánica.

Este trabajo concluye con un plan de acción para la generación de un modelo de ACH utilizando un modelo de tercera generación de redes bayesianas que permite cuantificar y evidenciar el error humano, en primera instancia, para poder disminuirlo. Hay que recordar que el error humano no se puede erradicar, solamente disminuir, sin embargo, en esta reducción, se pueden conseguir diversos beneficios, ya sea de forma económica con una mejor concentración de recursos para la solución de problemas o evitando que estos ocurran; como otorgando beneficios en la cultura de trabajo, ya que, al trabajar en evitar errores humanos se impulsan las buenas prácticas.

Por otro lado, cabe mencionar que este trabajo es una guía para la generación de un modelo de ACH y debe ser adaptado a la maquinaria en la que se quiera aplicar, ya que éste se elaboró a partir de información de distintos equipos que fueron consolidados como uno solo. Es debido a esto que un tema de interés, que permite la continuación de esta tesis, es la aplicación de este

modelo de forma exclusiva a una cinta transportadora o a otro equipo mecánico que se desee evaluar, con el fin de evidenciar y cuantificar el error humano para comenzar la implementación de forma sistemática de esta ciencia en la ingeniería mecánica. Del mismo modo, se pueden proponer otros modelos de nodos para la Red Bayesiana, adaptar y plantear nuevos coeficientes del rendimiento humano o realizar una propuesta de otro modelo de ACH con el fin de compararlos; con el propósito final de generar y ofrecer más herramientas para el área de mantenimiento en la ingeniería mecánica.

4 Bibliografía

1. Chiavenato, I. (2009). *GESTION DEL TALENTO HUMANO (Spanish Edition)* (3.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
2. Hollnagel, E. (1998). *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)* (1st ed.). Elsevier Science.
3. Dhillon, B. S. (2009). *Human Reliability, Error, and Human Factors in Engineering Maintenance: with Reference to Aviation and Power Generation* (1.^a ed.). CRC Press.
4. Hollnagel, E., Woods, D. D., & Leveson, N. (2006). *Resilience Engineering*. Ashgate.
5. Gertman, D. I. G., Blackman, H. S., Marble, J. I., Byers, J. C., & Smith, C. L. (2004, septiembre). *The SPAR-H Human Reliability Analysis Method*. Idaho National Laboratory.
6. Institute of Medicine, Committee on Quality of Health Care in America, Medicine, I., America, C. Q. H. C., Donaldson, M. S., Corrigan, J. M., & Kohn, L. T. (2000). *To Err Is Human*. Amsterdam University Press.
7. Calixto, E. (2016). *Gas and Oil Reliability Engineering*. Elsevier Gezondheidszorg.
8. Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers* (1.^a ed.). CRC Press.
9. Pistarelli, A. J. (2017). *Manual de Mantenimiento. Ingeniería, Gestión y Organización*. Alejandro J. Pistarelli.
10. Matías Andrés Espinoza Urzúa. (2018). Desarrollo Exploratorio de Modelos de Conceptos Analíticos De Confiabilidad Humana (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
11. María Jose Arteaga Salazar (2017). Creación de un Modelo de Gestión de Activos Centrado en la Confiabilidad Humana (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
12. Amendola, L., & Depool, T. (2005). *MODELO DE CONFIABILIDAD HUMANA EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS* [Diapositivas]. aec.

- https://www.aec.es/c/document_library/get_file?p_l_id=64199&folderId=220556&name=DLFE-6509.pdf
13. García O. (2006). R. (s. f.). *Gestión Integral de Mantenimiento Basada en Confiabilidad*. Reliabilityweb: A Culture of Reliability. <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/gestion-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/>
 14. Assoc, B. (2008). *APPLICATION OF RELIABILITY CENTRED MAINTENANCE TO*. BERNAN ASSOC.
 15. Amendola, L., & Depool, T. (2002). Modelo de Confiabilidad Humana en la Gestión de Activos. Universidad Politécnica de Valencia, España Asociación Española de Mantenimiento.
 16. Garcia, O. (2006, agosto). *La Confiabilidad Humana en la Gestión del Mantenimiento* [Diapositivas]. verriveritatis. <http://www.verriveritatis.com.br/Toro/outubro2010/Confiabilidad-Humana.pdf>
 17. Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge University Press.
 18. Senders, J. W., & Moray, N. P. (2019). *Human Error: Cause, Prediction, and Reduction*. CRC Press.
 19. Violation - SKYbrary Aviation Safety. (s. f.). SKYbrary. <https://www.skybrary.aero/index.php/Violation#:~:text=Routine%20violations%20tend%20to%20occur,to%20get%20the%20job%20done>.
 20. Health and Safety Executive. (s. f.). *Tipos de Error Humano* [Diagrama de flujo]. Understanding Human Failure. <https://www.hse.gov.uk/construction/lwit/assets/downloads/human-failure.pdf>
 21. Blackman, H.S., Gertman, D.I., Boring, R.L.: Human error quantification using performance shaping factors in the SPAR-H method. In: 52nd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (2008).
 22. Francisco Alonso Rojas Valdés (2018). Plan de Mantenimiento Preventivo para Cintas Transportadoras en Cementos Bío Bío (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.

23. We-Siang Hugo Tan Gómez (2016). Mejora en Sistema de Tensado en Correas de la Línea Crítica en Gran Empresa Minera del Cobre (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
24. Sergio Esteban Silva Sanhuesa (2017). Plan de Mantenimiento para Correa Transportadora Crítica en Planta de Chancado en Minería Andina (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
25. Denis Solange Molina Valdovino (2018). Análisis Técnico de Correas Transportadoras en Planta de Proceso de Salmónidos (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
26. Máximo Rodrigo Gómez Hidalgo (2013). Análisis de Fallas en Maquinaria Minera (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Chile.
27. *Cintas Transportadoras Rotrans*. (s. f.). Rotrans S.A. Recuperado 23 de marzo de 2021, de <https://rotranssa.com/cintas-transportadoras>.
28. Wikipedia contributors. (2021, 6 mayo). *Space Shuttle Challenger disaster*. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Space_Shuttle_Challenger_disaster#Investigation
29. López Puga, J. (2012). *Cómo Construir y Validar Redes Bayesianas con Netica*. Universidad de Almería.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4107401.pdf>
30. Ronald L. Boring (2010). *How Many Performance Shaping Factors are Necessary for Human Reliability Analysis?* Idaho National Laboratory.
31. Burgos H., Á. (2021). *Base de Datos para Netica*. Google Drive.
<https://docs.google.com/document/d/1iuPooYQAR9tmDXYx2VulEVkmi200TEqR/edit?usp=sharing&ouid=109559868586433660753&rtpof=true&sd=true>.

5. Anexos

5.1 Ejemplo N°1

ENCUESTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD DE ERROR HUMANO											
Tarea Por Evaluar:											
Nombre Evaluador:											
En cada una de las preguntas siguientes, estime la probabilidad de la ocurrencia de error humano entre 0% y 100%, donde 0% implica que no existe error humano y 100% implica que va a haber error humano en un caso optimista y en un caso pesimista, el símbolo "X" indica que la condición es desfavorable, "0" indica que la condición es favorable y el símbolo "-" indica que el factor no se toma en consideración.											
N° de Pregunta	Factor del Rendimiento Humano									Porcentaje Probabilidad de Error Humano	
	TIEMPO	ESTRÉS	COMPLEJIDAD	EXPERIENCIA/ ENTRENAMIENTO	PROCEDIMIENTO	ERGONOMÍA	ESTADO FÍSICO	SUPERVISIÓN	Optimista	Pesimista	
1	X	-	-	-	-	-	-	-			
2	-	X	-	-	-	-	-	-			
3	-	-	X	-	-	-	-	-			
4	-	-	-	X	-	-	-	-			
5	-	-	-	-	X	-	-	-			
6	-	-	-	-	-	X	-	-			
7	-	-	-	-	-	-	X	-			
8	-	-	-	-	-	-	-	X			
9	X	X	X	X	X	X	X	X			
10	X	X	X	X	X	X	X	0			
11	X	X	X	X	X	X	0	X			
12	X	X	X	X	X	0	X	X			
13	X	X	X	X	0	X	X	X			
14	X	X	X	0	X	X	X	X			
15	X	X	0	X	X	X	X	X			
16	X	0	X	X	X	X	X	X			
17	0	X	X	X	X	X	X	X			
18	X	X	X	X	X	X	0	0			
19	X	X	X	X	X	0	X	0			
20	X	X	X	X	0	X	X	0			
21	X	X	X	0	X	X	X	0			
22	X	X	0	X	X	X	X	0			
23	X	0	X	X	X	X	X	0			
24	0	X	X	X	X	X	X	0			
25	X	X	X	X	X	0	0	X			
26	X	X	X	X	0	X	0	X			
27	X	X	X	0	X	X	0	X			
28	X	X	0	X	X	X	0	X			
29	X	0	X	X	X	X	0	X			
30	0	X	X	X	X	X	0	X			
...											
261	0	X	0	0	0	0	0	0			
262	X	0	0	0	0	0	0	0			
263	0	0	0	0	0	0	0	0			

Figura 39: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano de acuerdo con los FDD seleccionados, elaboración propia.

5.2 Cuestionario N°1

ENCUESTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD DE ERROR HUMANO										
Tarea Por Evaluar:										
Nombre Evaluador:										
- En cada una de las preguntas siguientes, se debe estimar la probabilidad de la ocurrencia de error humano entre 0% y 100%, donde 0% implica que no existe error humano y 100% implica que va a haber error humano en un caso optimista y en un caso pesimista. - Se debe responder a la pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de que haya error humano si es que el/la/s factor/es a considerar son favorables/desfavorables? - El símbolo "X" indica que la condición es desfavorable, "0" indica que la condición es favorable y el símbolo "-" indica que el factor no se toma en consideración.										
N.º de Pregunta	Factor del Rendimiento Humano (Seleccionar Solamente 3 Factores)								Porcentaje Probabilidad de Error Humano	
	TIEMPO	ESTRÉS	COMPLEJIDAD	EXPERIENCIA/ENTRENAMIENTO	PROCEDIMIENTO	ERGONOMÍA	ESTADO FÍSICO	SUPERVISIÓN	Optimista	Pesimista
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										

Figura 40: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia.

5.3 Cuestionario Tareas Relacionadas con el Diseño

ENCUESTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD DE ERROR HUMANO										
Tarea Por Evaluar: TAREAS DE DISEÑO										
Nombre Evaluador: ALVARO BURGOS										
- En cada una de las preguntas siguientes, se debe estimar la probabilidad de la ocurrencia de error humano entre 0% y 100%, donde 0% implica que no existe error humano y 100% implica que va a haber error humano en un caso optimista y en un caso pesimista. - Se debe responder a la pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de que haya error humano si es que el/la/s factor/es a considerar son favorables/desfavorables? - El símbolo "X" indica que la condición es desfavorable, "0" indica que la condición es favorable y el símbolo "-" indica que el factor no se toma en consideración.										
N.º de Pregunta	Factor del Rendimiento Humano (Seleccionar Solamente 3 Factores)								Porcentaje Probabilidad de Error Humano	
	TIEMPO	ESTRÉS	COMPLEJIDAD	EXPERIENCIA/ENTRENAMIENTO	PROCEDIMIENTO	ERGONOMÍA	ESTADO FÍSICO	SUPERVISIÓN	Optimista	Pesimista
1	X	-	-	-	-	-	-	-	20%	40%
2	-	X	-	-	-	-	-	-	10%	20%
3	-	-	-	-	X	-	-	-	15%	30%
4	X	X	-	-	X	-	-	-	40%	90%
5	0	X	-	-	X	-	-	-	40%	80%
6	X	0	-	-	X	-	-	-	35%	60%
7	X	X	-	-	0	-	-	-	40%	70%
8	0	0	-	-	X	-	-	-	30%	40%
9	0	X	-	-	0	-	-	-	25%	55%
10	X	0	-	-	0	-	-	-	30%	50%
11	0	0	-	-	0	-	-	-	10%	20%

Figura 41: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano para el diseño de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia.

5.4 Cuestionario Tareas Relacionadas con Inspecciones de Rutina

ENCUESTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD DE ERROR HUMANO										
Tarea Por Evaluar: Inspección de Rutina										
Nombre Evaluador: Álvaro Burgos										
- En cada una de las preguntas siguientes, se debe estimar la probabilidad de la ocurrencia de error humano entre 0% y 100%, donde 0% implica que no existe error humano y 100% implica que va a haber error humano en un caso optimista y en un caso pesimista - Se debe responder a la pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de que haya error humano si es que el/la factor/es a considerar son favorables/desfavorables? - El símbolo "X" indica que la condición es desfavorable, "O" indica que la condición es favorable y el símbolo "-" indica que el factor no se toma en consideración.										
N.º de Pregunta	Factor del Rendimiento Humano (Seleccionar Solamente 3 Factores)								Porcentaje Probabilidad de Error Humano	
	TIEMPO	ESTRÉS	COMPLEJIDAD	EXPERIENCIA/ENTRENAMIENTO	PROCEDIMIENTO	ERGONOMÍA	ESTADO FÍSICO	SUPERVISIÓN	Optimista	Pesimista
1	X	-	-	-	-	-	-	-	20	35
2	-	-	-	X	-	-	-	-	15	30
3	-	-	-	-	X	-	-	-	20	50
4	X	-	-	X	X	-	-	-	50	90
5	O	-	-	X	X	-	-	-	40	75
6	X	-	-	O	X	-	-	-	40	65
7	X	-	-	X	O	-	-	-	35	60
8	O	-	-	O	X	-	-	-	40	70
9	O	-	-	X	O	-	-	-	30	35
10	X	-	-	-	-	-	-	-	35	40
11	O	-	-	O	O	-	-	-	10	20

Figura 42: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano para la inspección de rutina de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia

5.5 Cuestionario Tareas Relacionadas con el Mantenimiento

ENCUESTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD DE ERROR HUMANO										
Tarea Por Evaluar: Mantenimiento										
Nombre Evaluador: Álvaro Burgos										
- En cada una de las preguntas siguientes, se debe estimar la probabilidad de la ocurrencia de error humano entre 0% y 100%, donde 0% implica que no existe error humano y 100% implica que va a haber error humano en un caso optimista y en un caso pesimista - Se debe responder a la pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de que haya error humano si es que el/la factor/es a considerar son favorables/desfavorables? - El símbolo "X" indica que la condición es desfavorable, "O" indica que la condición es favorable y el símbolo "-" indica que el factor no se toma en consideración.										
N.º de Pregunta	Factor del Rendimiento Humano (Seleccionar Solamente 3 Factores)								Porcentaje Probabilidad de Error Humano	
	TIEMPO	ESTRÉS	COMPLEJIDAD	EXPERIENCIA/ENTRENAMIENTO	PROCEDIMIENTO	ERGONOMÍA	ESTADO FÍSICO	SUPERVISIÓN	Optimista	Pesimista
1	-	-	X	-	-	-	-	-	10%	20%
2	-	-	-	X	-	-	-	-	20%	35%
3	-	-	-	-	X	-	-	-	30%	50%
4	-	-	X	X	X	-	-	-	50%	90%
5	-	-	O	X	X	-	-	-	45%	85%
6	-	-	X	O	X	-	-	-	40%	80%
7	-	-	X	X	O	-	-	-	30%	70%
8	-	-	O	O	X	-	-	-	35%	50%
9	-	-	O	X	O	-	-	-	20%	40%
10	-	-	X	O	O	-	-	-	15%	30%
11	-	-	O	O	O	-	-	-	10%	20%

Figura 43: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano para las tareas de mantenimiento de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia.

5.6 Cuestionario Tareas Relacionadas con la Instalación

ENCUESTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD DE ERROR HUMANO											
Tarea Por Evaluar: Instalación											
Nombre Evaluador: Álvaro Burgos											
- En cada una de las preguntas siguientes, se debe estimar la probabilidad de la ocurrencia de error humano entre 0% y 100%, donde 0% implica que no existe error humano y 100% implica que va a haber error humano en un caso optimista y en un caso pesimista - Se debe responder a la pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de que haya error humano si es que el/la/los factor/es a considerar son favorables/desfavorables? - El símbolo "X" indica que la condición es desfavorable, "O" indica que la condición es favorable y el símbolo "-" indica que el factor no se toma en consideración.											
N.º de Pregunta	Factor del Rendimiento Humano (Seleccionar Solamente 3 Factores)									Porcentaje Probabilidad de Error Humano	
	TIEMPO	ESTRÉS	COMPLEJIDAD	EXPERIENCIA/ENTRENAMIENTO	PROCEDIMIENTO	ERGONOMÍA	ESTADO FÍSICO	SUPERVISIÓN	Optimista	Pesimista	
1	-	-	X	-	-	-	-	-	10%	30%	
2	-	-	-	-	X	-	-	-	30%	50%	
3	-	-	-	-	-	-	-	X	20%	40%	
4	-	-	X	-	X	-	-	X	60%	90%	
5	-	-	O	-	X	-	-	X	50%	80%	
6	-	-	X	-	O	-	-	X	30%	60%	
7	-	-	X	-	X	-	-	O	40%	70%	
8	-	-	O	-	O	-	-	X	20%	40%	
9	-	-	O	-	X	-	-	O	30%	50%	
10	-	-	X	-	O	-	-	O	10%	30%	
11	-	-	O	-	O	-	-	O	10%	20%	

Figura 44: Encuesta de estimación de probabilidad del error humano para las tareas de instalación de acuerdo con los FDD seleccionados, adaptado para la selección de 3 FDD, elaboración propia.

5.7 Ficha para el Registro de Datos para la Construcción de una Red Bayesiana.

FICHA DE REGISTRO DE DATOS PARA FABRICACIÓN DE RED BAYESIANA.



- La ficha que se presenta a continuación debe ser completada en conjunto por el equipo de mantenimiento para todo tipo de detenciones de maquinaria.
- Se recomienda que los elementos marcados con gato (#), se completen después de completar los otros campos.
- En la segunda hoja se especifica en detalle los ítems marcados con asterisco (*)

Fecha	Detención Programada*	Elemento en Inspección*	Modo de Falla#*	Efecto de Falla#*	Tiempo Detención [HH:MM]	Detalle, Observación*

Detención Programada: Corresponde a la pregunta si la detención que se estudia fue una detención programada, responder con Sí/No.

Elemento en Inspección: Corresponde al elemento que se detuvo de forma programada o no.

Modo de Falla: Se refiere a la causa principal con que se asocia a la causa raíz de la detención, éstas se clasifican en:

- **Tiempo disponible para realizar la tarea.**
- **Estrés.**
- **Complejidad de la tarea.**
- **Experiencia o entrenamiento.**
- **Procedimiento.**
- **Ergonomía.**
- **Estado físico para la tarea.**
- **Supervisión.**
- **No aplica:** Las clasificaciones anteriores no se aplican al elemento en estudio, esto puede ser el caso de una detención programada o causas que se escapan, como accidentes naturales, etc.

Efecto de Falla: Corresponde a la clasificación de los efectos de falla, ya sea evidentes o no, ésta se complementa con las observaciones o detalle de la falla.

- **Error de Operador:** Son el resultado del error del operador y entre las fuentes de su manifestación están las tareas complejas, un mal ambiente de trabajo, la ausencia de procedimientos correctos, descuido del operador, pobre capacitación y mala selección de personal.
- **Error de Mantenimiento:** Ocurren en el campo de trabajo por descuidos del personal de mantenimiento, algunos ejemplos son la reparación incorrecta de un artefacto, la incorrecta calibración de equipos, aplicar el lubricante incorrecto en puntos apropiados de los equipos, etc.
- **Error de Ensamblaje:** Son el resultado de errores humanos durante el ensamble de un producto, algunas causas de este error son la poca iluminación, baja calidad de los planos, materiales inadecuados, mal diseño del plan de trabajo e ineficiente comunicación de información.
- **Error de Instalación:** Ocurren debido a múltiples razones, incluyendo, la mala instalación de equipos, utilizar materiales distintos a la especificación del fabricante, usar instrucciones de instalación incorrectas o utilizar planos de instalación incorrectos.
- **Errores de Diseño:** Proviene del diseño inadecuado, algunas causas de su ocurrencia son el fracaso de asegurar la efectividad de las interacciones entre persona-máquina, fracaso en implementar necesidades humanas en el diseño y asignar inapropiadamente funciones a humanos.
- **Error de Inspección:** Son el resultado de la imprecisión del personal de inspección, un error típico de inspección es aceptar y rechazar objetos fuera o dentro de la tolerancia especificada, respectivamente.
- **Error de Manejo:** Ocurren debido al transporte o almacenaje inadecuado.
- **No Aplica:** Las clasificaciones anteriores no se aplican al elemento en estudio, esto puede ser el caso de una detención programada o causas que se escapan, como accidentes naturales, etc.

Detalle, Observación: En esta sección se debe completar con toda la información relevante a la detención del elemento en análisis, estado en el cual fue descubierta, estado actual y consecuencias, todo esto con el fin de que, a partir de esta información, inferir la causa raíz de detención.

Figura 45: Encuesta del registro de las detenciones de los elementos de una cinta transportadora para la fabricación de un modelo de ACH con Redes Bayesianas, elaboración propia.

5.8 Extracto de Base de Datos Consolidada para la generación de la Red Bayesiana

A continuación, se presenta una serie de figuras de modo de resumen de la base de datos utilizada en la generación de la Red Bayesiana utilizada anteriormente, la información completa se encuentra en la bibliografía N°31.

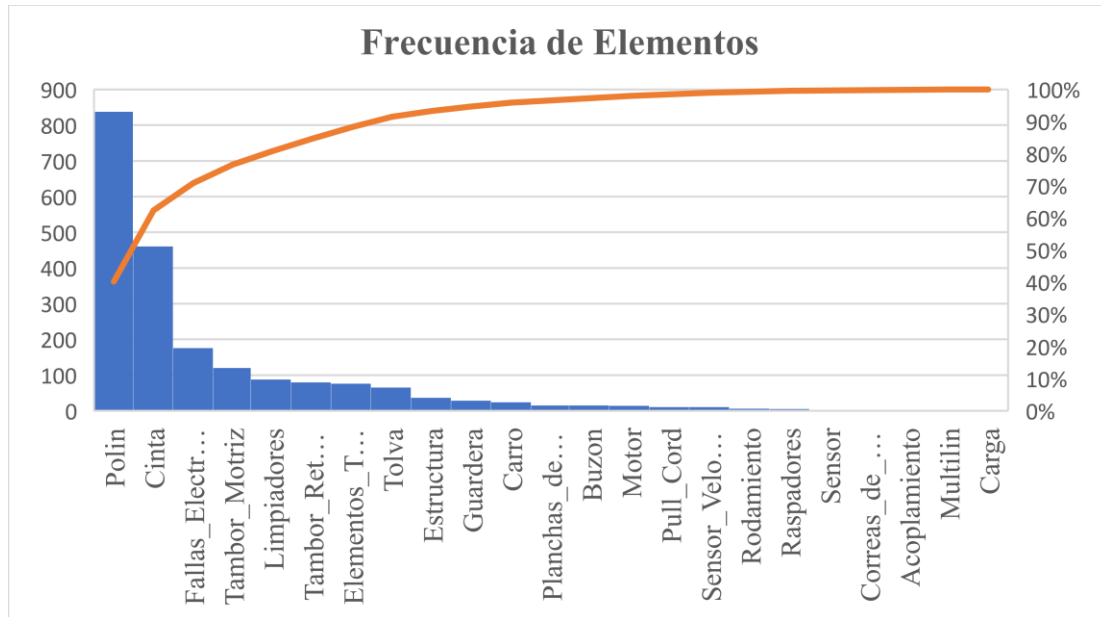


Figura 46: Resumen de Tabla de base de datos para la generación de la Red Bayesiana utilizando un total de 2080 casos, datos disponibles en la bibliografía N°31.

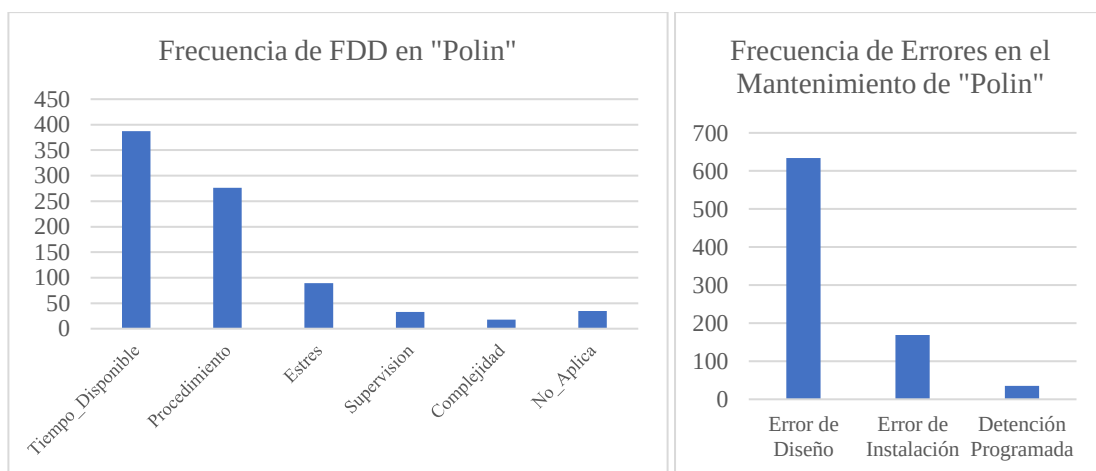


Figura 47: Resumen de las frecuencias de los modos y efectos de falla para el elemento "Polín" en la base de datos para la generación de la Red Bayesiana, respectivamente.

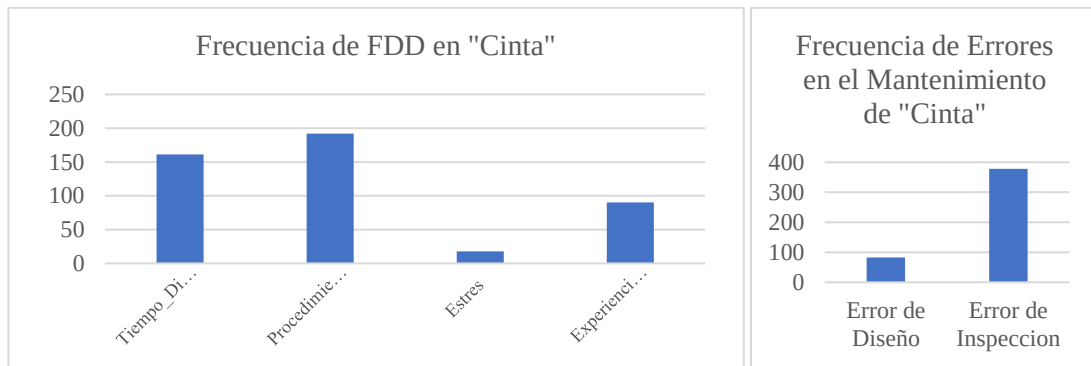


Figura 48: Resumen de las frecuencias de los modos y efectos de falla para el elemento "Cinta" en la base de datos para la generación de la Red Bayesiana, respectivamente.

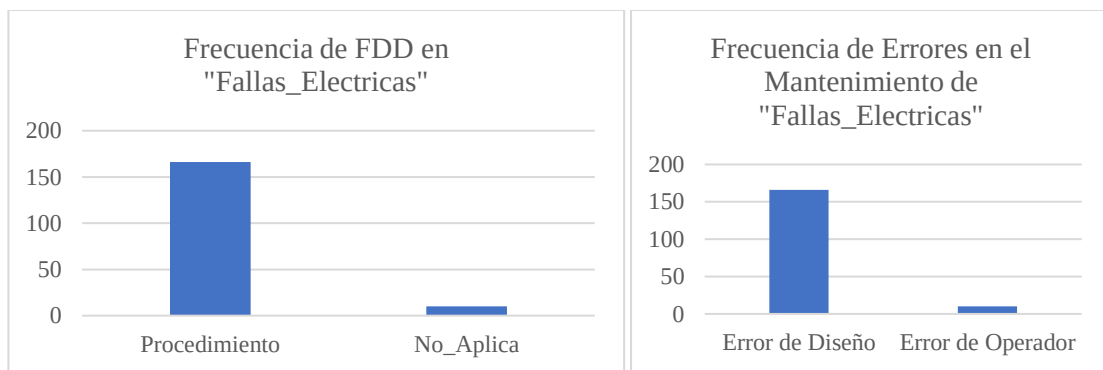


Figura 49: Resumen de las frecuencias de los modos y efectos de falla para el elemento "Fallas_Electricas" en la base de datos para la generación de la Red Bayesiana, respectivamente.

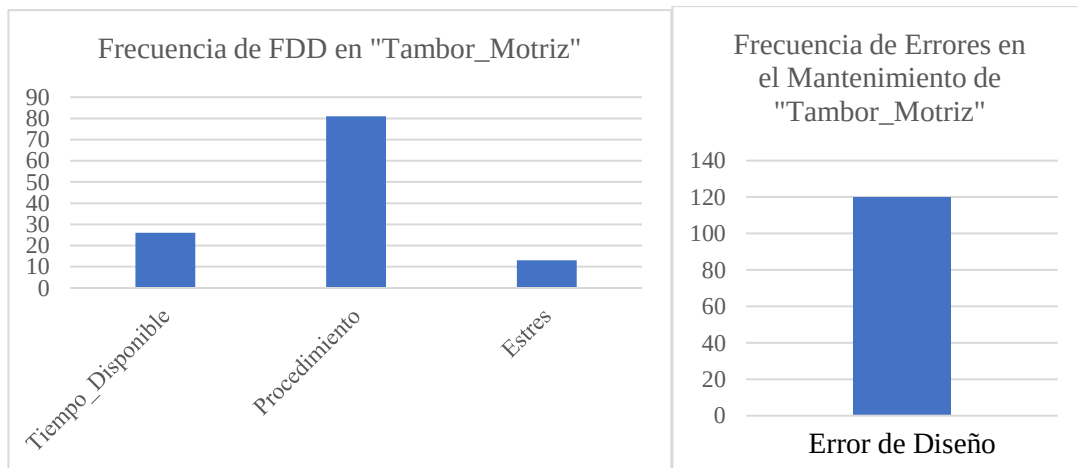


Figura 50: Resumen de las frecuencias de los modos y efectos de falla para el elemento "Tambor_Motriz" en la base de datos para la generación de la Red Bayesiana, respectivamente.