



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

MODELO DE CONFIABILIDAD HUMANA PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL MANTENIMIENTO MINERO UTILIZANDO BN-SLIM (BAYESIAN NETWORK - SUCCESS LIKELIHOOD INDEX METHOD)

CATALINA BELÉN CORNEJO MORA

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
EDUARDO CÓRDOVA VERGARA

Santiago de Chile, Mayo, 2021.

© 2021, Catalina Cornejo Mora.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

MODELO DE CONFIABILIDAD HUMANA PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL MANTENIMIENTO MINERO UTILIZANDO BN-SLIM (BAYESIAN NETWORK - SUCCESS LIKELIHOOD INDEX METHOD)

CATALINA BELÉN CORNEJO MORA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

EDUARDO CÓRDOVA VERGARA 

ANGELINA ANANI 

LUIS GUZMÁN BONET 

MARCOS SEPÚLVEDA FERNÁNDEZ 

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Mayo, 2021.

Porque detrás de enormes camiones
y cerros seguirán existiendo
extraordinarias personas.

AGRADECIMIENTOS

Culminar una carrera universitaria es tanto la entrada a un mundo nuevo, como el dejar atrás un camino de aprendizaje, oportunidades, luchas y esfuerzo. Camino que dejo con la convicción de que si he visto lejos es porque estoy sentada sobre hombros de gigantes.

Sobre los hombros de mi familia, a quienes agradezco por ser quien soy, por guiarme en este y todos los procesos, apoyando mis decisiones y dándome la confianza de que puedo lograr todo aquello que me proponga. Son ellos quienes inculcaron en mi la importancia de las personas en todo ámbito y lugar, visión que presta su espíritu a la presente investigación.

Los hombros de mis amigas y amigos, para apoyar mi cabeza en largas noches de trabajo y mi balance en largas noches de distensión. Son los lazos que la vida y universidad me han llevado a formar con increíbles personas, los que me inspiran a ser más, y los que me permiten ver lo bueno y malo de la vida que con ellos comparto.

Agradezco también a mis profesores, por ser maestros, tutores y -cuando fuese necesario- amigos. Por la confianza depositada en mí y la voluntad de enseñarme más allá de los libros. Finalmente, a las valientes mujeres que se han atrevido a hacer carrera en minería y mantenimiento, visionarias transgresoras, que superando prejuicios han ido -y aún siguen- abriendo el paso para que hoy mis compañeras y yo estemos acá.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
 1. INTRODUCCIÓN	 1
2. TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	5
2.1. Hipótesis.....	5
2.2. Objetivos	5
2.3. Metodología	5
 3. MARCO TEÓRICO	 7
3.1. Gestión de Activos y Mantenimiento.....	7
3.1.1. Gestión de Activos.....	7
3.1.2. Mantenimiento	8
3.1.3. Proceso de Mantenimiento.....	11
3.1.4. Estrategias de Mantenimiento.....	14
3.2. Confiabilidad Operacional	18
3.3. Confiabilidad Humana	21
3.3.1. Definiciones y Lineamientos Base	21
3.3.2. Error Humano	24
3.3.3. Cultura de la Confiabilidad Humana	33
3.4. Políticas y Estrategias de Confiabilidad Humana	35
3.4.1. Gestión del Conocimiento	36
3.4.2. Trabajo en Equipos Naturales.....	40
3.4.3. Gerencia del Desempeño	41

3.4.4. Formación por Competencias	44
3.5. Métodos de Análisis de Confiabilidad Humana.....	45
3.5.1. Análisis de Confiabilidad Humana	45
3.5.2. Métodos de Primera Generación.....	48
3.5.3. Métodos de Segunda Generación.....	53
3.5.4. Métodos de Tercera Generación	59
4. Diagnóstico: Capital humano en el mantenimiento minero.....	63
4.1. Caracterización del Mantenimiento Minero.....	63
4.2. Tendencias Actuales.....	66
4.2.1. Transición hacia un mantenimiento proactivo.....	67
4.2.2. Mantenimiento Inteligente 4.0	69
4.3. Problemáticas Asociadas al Capital Humano.....	71
4.3.1. Búsqueda de Calidad de Ejecución.....	71
4.3.2. Integración y Alcances en la Gestión Humana	72
4.3.3. Consideración del Error Humano	74
4.3.4. Brechas en Competencias	75
4.4. Oportunidad de Desarrollo	79
5. Modelo de confiabilidad humana para el mantenimiento minero	82
5.1. Objetivo del Modelo.....	82
5.2. Diseño del Modelo	83
5.2.1. Categorías de Actividades	83
5.2.2. Factores Determinantes del Desempeño (PSFs)	88
5.2.3. Modelo Cuantitativo Referencial	98
5.2.4. Traducción en Indicadores Estratégicos	103
5.2.5. Estructura BN-SLIM Aplicado	106
5.3. Aplicación Teórica del Modelo.....	108
5.3.1. Metodología	108
5.3.2. Parámetros	109
5.3.3. Resultados.....	114
5.4. Implementación	122
6. Conclusiones.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	130

ANEXO A: Unidades de competencia laboral en mantenimiento mecánico.....	141
ANEXO B: Consideraciones prácticas asociadas a los <i>Performance Shaping Factors</i>	143
ANEXO C: Evaluación de eficacia de una acción formativa	150

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3-1. Criterios analíticos de comparación entre métodos HRA.....	47
Tabla 3-2. Comparativa métodos de primera generación.	49
Tabla 3-3. Comparativa métodos de segunda generación.....	54
Tabla 4-1. Principales procesos y equipos en mantenimiento minero.	63
Tabla 4-2. Resumen personal de mantenimiento.	66
Tabla 4-3. Indicadores de capacitación en la minería chilena.	76
Tabla 5-1. Errores humanos en categorías de actividad.....	87
Tabla 5-2. Medición de PSFs.....	96
Tabla 5-3. Causas de falla en la Etapa Madura de la vida útil de un equipo minero.....	106
Tabla 5-4. Posibles estados de PSFs.	109
Tabla 5-5. Parejas referenciales de HEP y SLI.	110
Tabla 5-6. Ponderadores por categoría.....	111
Tabla 5-7. Ponderadores por PSF.....	112
Tabla 5-8. Modelo gradual de mejora de factores.....	113
Tabla 5-9. Resultados Caso 1.....	115
Tabla 5-10. Resultados Caso 2.....	117
Tabla 5-11. Resultados Caso 3.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1. Diez mejores prácticas en el mantenimiento.....	2
Figura 3-1. Modelo Input-Output de Mantenimiento.	9
Figura 3-2. Cadena de valor del mantenimiento.	11
Figura 3-3. Proceso de Mantenimiento	12
Figura 3-4. Estrategias de Mantenimiento.	15
Figura 3-5. Pirámide Tecnológica.....	20
Figura 3-6. Capital Humano.....	21
Figura 3-7. Antecedentes históricos confiabilidad humana.	23
Figura 3-8. Limitaciones Humanas.	25
Figura 3-9. Modelo SCM.	29
Figura 3-10. Modelo de la Rueda de la Desgracia.	30
Figura 3-11. Modelo HFACS.....	32
Figura 3-12. Pirámide de necesidades de Abraham Maslow	34
Figura 3-13. Estrategias de Confiabilidad Humana.	36
Figura 3-14. Modelo de Gestión del Conocimiento.....	39
Figura 3-15. Mejoramiento del Desempeño.....	42
Figura 3-16. Índices de Desempeño en Mantenimiento	43
Figura 3-17. Modelo SKR de Rasmussen	48
Figura 3-18. Modelo de comportamiento humano en SPAR-H.....	57
Figura 3-19. Simulación en HRA.	60
Figura 3-20. Simulador PROCOS.....	61
Figura 3-21. Flujo cognitivo en modelo IDAC.....	62
Figura 4-1. Actividades y perfiles en mantenimiento minero.....	65
Figura 4-2. Lineamientos de Agenda 2020.	68
Figura 4-3 . Dimensiones estrategicas en mantenimiento proactivo.....	69
Figura 4-4. Impacto de la tecnología por proceso.....	77
Figura 4-5. Las 10 mejores habilidades.	79

Figura 5-1. Clasificación de actividades en mantenimiento	85
Figura 5-2. Clasificación de actividades en mantenimiento mecánico.	86
Figura 5-3. Estructura de <i>Performance Shaping Factors</i>	91
Figura 5-4. Ejemplo estructura BN-SLIM.	103
Figura 5-5. <i>Mean Time Between Failure</i>	104
Figura 5-6. Etapas en la vida de un equipo.	105
Figura 5-7. Estructura modelo BN-SLIM aplicado.....	107
Figura 5-8. Modelo gradual de mejora de factores.	113
Figura 5-9. Resultados Caso 1	115
Figura 5-10. Resultados Caso 2.	117
Figura 5-11. Resultados Caso 3.	119

RESUMEN

Una de las principales problemáticas del mantenimiento en minería es la búsqueda de la calidad de ejecución de las actividades. Ante esto, la presente investigación plantea como hipótesis que un modelo de confiabilidad humana mejoraría la calidad de ejecución, por medio de la reducción en la probabilidad de error humano.

Tomando como referencia un modelo de gestión humana para el manejo de riesgos de la industria nuclear -pionera en el desarrollo de estos- se propone un modelo para el mantenimiento minero, cuyo objetivo es integrar los diferentes factores que condicionan el desempeño de las personas, comprender su influencia en la probabilidad de falla humana y sus consecuencias en indicadores estratégicos. De este modo, se pretende contribuir al aumento de la confiabilidad humana, mejorando la calidad de ejecución de actividades al gestionar sistemáticamente los factores desde la perspectiva organizacional.

En particular, se diseñó un modelo basado en la categorización de actividades: rutinarias/no rutinarias y cognitivas/manuales, y en la asignación de ocho factores determinantes del desempeño, cada uno con sus consideraciones y métricas: Requerimientos de la Tarea, Recursos, Gestión del Conocimiento, Trabajo en Equipos Naturales, Gestión del Desempeño, Formación por Competencias, Condiciones Ambientales y Condiciones del Sistema. Las categorías y factores se relacionaron cuantitativamente mediante el modelo *Success Likelihood Index Methodology* y Redes Bayesianas, obteniendo como resultado una probabilidad total de error humano, basada en escenarios definidos, que luego se traduce en un diferencial del tiempo medio entre fallas (MTBF) del sistema, respecto a un caso base.

Lo anterior constituye una metodología versátil, flexible, y escalable mediante data, con resultados cuantificables en un índice estratégico para toda la cadena de valor.

De la aplicación teórica del modelo, basada en simulaciones, se concluye que, aplicando una metodología que asocie los factores determinantes del desempeño en las actividades de mantenimiento minero, existe un potencial de aumentar el MTBF de un sistema independiente de la etapa de madurez de la organización.

Palabras Claves: Mantenimiento minero, Calidad, Confiabilidad Humana, Red Bayesiana.

ABSTRACT

One of the main concerns for maintenance in mining is striving for high quality performance of maintenance activities. Given this, the following research poses the hypothesis that a human reliability model would improve execution quality, by means of reducing the likelihood of human error.

Taking as a reference a human reliability model for risk management in the nuclear industry -pioneer in their development- a model for maintenance in mining is proposed. The proposal's objective is to integrate the different factors which condition people's performance, understand their influence in the likelihood of human error, and the consequences in key performance indicators (KPIs). Thus, an increase in human reliability is intended, improving quality in maintenance activities by systematically managing factors from an organizational perspective.

In particular, a model based on activity categorization was design: rutinary/non-rutinary and cognitive/manual, and in the assignment of eight performance determining factor, each with its own considerations and metrics: Task requirements, Resources, Knowledge Management, Teamwork, Performance Management, Skills Management, Environmental Conditions and System Conditions. Categories and factors are quantitatively related through a Success Likelihood Index Methodology model and Bayesian Networks, to obtain a total human error likelihood, based on predefined scenarios, which in turn translates to a difference in the system's Mean Time Between Failure (MTBF), compared to a base.

The former constitutes a flexible, versatile, and scalable through data methodology, with quantifiable KPIs for the entire value chain.

From simulation-based applications of the model, it is concluded that by implementing a methodology which correlates performance determining factors in mining maintenance activities, a potential increase of the MTBF exists, which is independent of the organization's maturity level.

Keywords: Mining Maintenance, Quality, Human Reliability, Bayesian Network.

1. INTRODUCCIÓN

La minería del cobre constituye una actividad estratégica para Chile, dada su participación de un 8.4% en el producto interno bruto nacional, de un 48% en las exportaciones, y la generación de aproximadamente 240,000 empleos directos (Banco Central de Chile, 2020). Por este motivo, resulta esencial dar estabilidad y crecimiento a la industria, la cual se ve afectada por la incertidumbre propia del mercado, por variables geológicas, y por el envejecimiento natural de los yacimientos que aumenta los costos para obtener la misma cantidad de cobre fino.

Las estrategias de las compañías mineras para ganar competitividad se asocian al control de costos y aumento de la productividad, sin descuidar la seguridad de su dotación y el desempeño en ámbitos socioambientales. En este contexto, el mantenimiento de activos físicos se vuelve un factor estratégico por tres principales motivos: (Quispe, 2018)

- Seguridad y productividad: el 35% a 45% de la dotación de una compañía minera se desempeña en el área de mantenimiento, ejecutando actividades con un alto nivel de exposición a accidentes.
- Variabilidad y rendimiento: el cumplimiento de planes de producción requiere que una gran cantidad de equipos se encuentren disponibles y con un alto nivel de confiabilidad. El mantenimiento incide directamente en la disponibilidad y funcionalidad de los equipos, siendo responsable de las pérdidas de producción ocasionadas por detenciones, y de disminuciones en calidad en caso de un mal funcionamiento.
- Costos: el 30% a 40% de los costos operacionales corresponden a mantenimiento.

Como consecuencia de lo anterior, la función de mantenimiento se ha sometido a importantes transformaciones a nivel tecnológico, económico y organizacional, cambiando la visión de una actividad generadora de costos, a una creadora de capacidad productiva y beneficios. Diversas estrategias se han generado a través del tiempo, las que según García (2013) impactan en cuatro áreas fundamentales:

- Capacidad de producción: por mejora en la productividad de la planta y aumento de la capacidad de los equipos.
- Costos: por reducción en tiempos de mantenimiento y tiempos de detención.
- Seguridad industrial: por reducción de fallas críticas y catastróficas, y un aumento en la seguridad del personal.
- Satisfacción de los clientes: por cumplimiento de entregas y alta calidad en los productos.

A su vez, el autor declara que las prácticas que se consideran más exitosas por la industria en el logro de los distintos objetivos son:

Trabajo en equipo	Contratistas orientados a la productividad	Integración con proveedores de materiales y servicios	Apoyo y visión gerencial	Planificación y programación proactiva
Mejoramiento continuo	Gestión disciplinada de materiales	Integración de los sistemas	Gerencia de paradas de planta	Producción basada en confiabilidad

Figura 1-1. Diez mejores prácticas en el mantenimiento.
(Adaptado de García, 2013)

Actualmente, y según lo presentado en el 16° Congreso Internacional del Mantenimiento Minero (Estupiñan & Atibiche, 2019), realizado en Santiago de Chile, el mantenimiento en la minería chilena se caracteriza por una tendencia a la aplicación de estrategias correctivas y predictivas, por la alta innovación en el rediseño de equipos, y la incorporación de nuevas tecnologías a los procesos. Por otro lado, los expositores señalaron la existencia de un bajo interés en estudios sobre confiabilidad humana, aspecto crucial definido por García (2013) como “la capacidad de desempeño eficiente y eficaz de todas las personas en todos los procesos, sin cometer errores derivados del actuar y del conocimiento individual, durante su competencia laboral, en un entorno organizacional específico”. Tal como el autor Richard J. Skinner lo plantea:

Si bien es cierto que existe la necesidad de contar con precisión en la obtención y manejo de datos como fundamento para la confiabilidad, no podemos relegar al sujeto a un segundo plano y reducirlo a un simple elemento dentro de un todo. Es él quien tiene preponderancia y hacia él debe converger todo lo existente dentro de una estructura. Eso incluye el aspecto de priorizar calidad sobre cantidad. (Skinner, 2015)

A pesar del desarrollo de la función de mantenimiento, aún es posible identificar una serie de problemáticas y/o oportunidades de mejora, en las cuales el personal cumple un rol fundamental para generar estrategias efectivas y sostenibles en el tiempo. Una de ellas es la búsqueda de calidad en la ejecución de las tareas de mantenimiento, directamente asociada a la continuidad operacional, a la reducción del mantenimiento no planificado, y al control de costos. El uso de nuevas tecnologías en la gestión de activos físicos implica, también, nuevos desafíos; tecnologías como la automatización e inteligencia artificial amenazan con prescindir de las personas, sin embargo, la realidad es que requieren un cambio cultural que brinde especial importancia a la formación de los trabajadores, justificando así un nuevo enfoque en la gestión del capital humano.

La constante evolución de la industria requiere modelos organizacionales flexibles y un capital humano con formación integral, ya que una importante fuente de competitividad industrial es el empoderamiento y compromiso de personas que trabajen en equipo para alcanzar los objetivos estratégicos de la organización. Industrias como la nuclear y la aeronáutica, en las cuales el capital humano también juega un rol protagónico respecto a la confiabilidad del proceso, han abordado este tema desde la confiabilidad humana.

En la minería, por otro lado, siguen existiendo brechas en el desempeño humano que deben ser integradas a la gestión de activos, por lo que el presente trabajo de investigación propone la adaptación de un modelo de confiabilidad humana, con origen en el análisis de riesgos de la industria nuclear, para mejorar la calidad del mantenimiento de la industria minera. La metodología asociada al modelo es versátil y flexible en cuanto a *inputs*, aplicable a la pequeña y gran minería, y con resultados cuantificables en índices estratégicos para toda la cadena de gestión de activos. Adicionalmente, constituye una base para enriquecer y escalar con datos, mostrando el potencial de recopilar y analizar información del factor humano en mantenimiento.

El trabajo de investigación se estructura comenzando con un marco teórico, en el cual se caracterizan los conceptos de gestión de activos, mantenimiento, confiabilidad operacional y humana, y se profundiza respecto a las diferentes políticas, estrategias y métodos de análisis existentes en la confiabilidad humana. Luego, se presenta un diagnóstico sobre las tendencias y problemáticas en torno al capital humano en mantenimiento minero, realizado en base a entrevistas con expertos. Finalmente, y como punto central, se presenta el diseño del modelo de confiabilidad humana y su aplicación teórica, destacando la metodología sobre los resultados, ya que estos últimos se basan en supuestos y simulaciones. La investigación culmina con los beneficios, limitaciones y consideraciones asociadas a la implementación del modelo generado.

2. TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

2.1. Hipótesis

El desempeño de capital humano impacta los resultados del mantenimiento en minería, por lo tanto, el diseño de un modelo de gestión de la confiabilidad humana permitirá mejorar la calidad de ejecución de las actividades.

2.2. Objetivos

El objetivo general de estudio es diseñar un modelo multivariable que integre los factores que condicionan el desempeño humano en el mantenimiento de minería, y determinar su impacto en un indicador operacional estratégico.

Los objetivos específicos se enuncian a continuación:

- Investigar sobre el rol del capital humano y los aspectos que condicionan su actuar en las actividades de mantenimiento en minería.
- Diseñar una estrategia de gestión del capital humano, basada en modelos de confiabilidad humana, aplicable al mantenimiento minero.
- Determinar el impacto cuantitativo de aplicar un modelo de confiabilidad humana en los resultados de la operación, y los aspectos claves que deben ser considerados para su efectiva implementación.

2.3. Metodología

El trabajo de investigación inicia con la definición de la problemática y el planteamiento de la hipótesis, de modo de acotar el tema de estudio. Una vez definido, se desarrolla el marco teórico de la investigación, basado en revisión bibliográfica, con el objetivo de caracterizar el proceso del mantenimiento de equipos mineros, y abordar el concepto de confiabilidad humana desde la teoría. Considerando los principales lineamientos de la gestión y confiabilidad humana, se realiza un diagnóstico de la situación actual en la industria minera respecto al desempeño del capital humano en mantenimiento, y las estrategias para su

desarrollo, a través de investigación y la interacción directa en entrevistas con profesionales afines.

A continuación, se realiza una revisión de los principales modelos utilizados en otras industrias para el análisis y desarrollo la confiabilidad humana, de modo de identificar aquellos extrapolables, basado en los componentes determinados como más relevantes y gestionables en el diagnóstico. Con estas referencias, se diseña un modelo multivariable de gestión de la confiabilidad humana aplicable al mantenimiento minero, con resultados cuantitativos en indicadores determinados como estratégicos durante la etapa de diagnóstico.

A través de simulaciones computacionales, se estudia el efecto de implementar el modelo diseñado, midiendo la variación de índices de desempeño. Se analizan y presentan los resultados obtenidos, y finalmente se realizan recomendaciones para una efectiva implementación del modelo.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Gestión de Activos y Mantenimiento

3.1.1. Gestión de Activos

Arata y Furlanetto (2005) distinguen cinco funciones que participan y se interrelacionan en un sistema productivo:

- a) Gestión de la Producción
- b) Gestión de la Calidad
- c) Gestión de Recursos Humanos
- d) Gestión Medioambiental
- e) Gestión de Activos

Los autores definen la Gestión de Activos como la “gestión integral de la infraestructura industrial durante toda su vida útil”, lo cual implica los procesos de inversión y renovación de equipos, su operación, mantenimiento, y el manejo de los recursos asociados. Una definición más completa corresponde a:

Juego de disciplinas, procedimientos y herramientas esenciales para optimizar el impacto total de los costos, exposición al riesgo y desempeño humano en la vida del negocio, asociado con la confiabilidad, disponibilidad, usabilidad, mantenibilidad, longevidad, eficiencia y regulaciones de cumplimiento de la seguridad y el medio ambiente, de los activos totales de la compañía. (Amendola, 2016)

Se considera a la gestión de activos una función integradora de todas las actividades de un sistema productivo, y sus resultados son determinantes de la producción, calidad, residuos, seguridad y requerimientos de recursos humanos de una operación.

Algunas de las herramientas más utilizadas para generar estrategias de mejora en la gestión de activos son (García, s.f.):

- Análisis de Criticidad (CA): permite jerarquizar instalaciones, sistemas y equipos, en función de su impacto global, para facilitar la toma de decisiones.

- **Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA):** permite determinar los modos de falla de cada componente en un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan.
- **Análisis Causa Raíz (RCFA):** permite precisar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición, con el objetivo de mitigarlas o eliminarlas.
- **Análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCC):** permite elegir entre opciones de inversión, en equipos nuevos o acciones de mejora, basado en su efecto en el costo total del ciclo de vida del activo.

3.1.2. Mantenimiento

El mantenimiento corresponde a una actividad que forma parte de la gestión de activos, sin embargo, Arata y Furlanetto (2005) reconocen su importancia al incorporarla como una función más del sistema productivo, cuyo fin es “conservar el patrimonio de maquinarias e instalaciones durante toda su vida útil, garantizando su capacidad de producir bienes y servicios según las condiciones establecidas”.

Para Cárcel (2016), el objetivo básico de un programa de mantenimiento es conseguir la disponibilidad efectiva de un sistema, lo cual requiere:

- Alcanzar la disponibilidad requerida en equipos e instalaciones.
- Hacerlo al menor costo posible.
- Incorporar otros objetivos como el tiempo de actuación o calidad del trabajo.

En el proceso de alcanzar estos objetivos, se deben conseguir otros más específicos como:

- Evaluar requerimientos y capacidades técnicas de los equipos e instalaciones, lo cual influye en su selección, diseño y determinación de las condiciones de operación.
- Identificar factores o causas que impiden al sistema alcanzar los niveles de disponibilidad especificados, tales como los insuficientes niveles de confiabilidad de diseño, operativos o de mantenibilidad.

- Proponer acciones eficientes para alcanzar niveles de disponibilidad objetivo.
- Determinar y evaluar tecnologías y técnicas de detección, diagnóstico, verificación y prueba, y de restauración de las condiciones iniciales, incluyendo los correspondientes procedimientos.
- Seguir y controlar la aplicación correcta de técnicas y procedimientos, y de la actividad de mantenimiento en general.
- Recomendar acciones de mejora continua de la disponibilidad y de sus factores causales.
- Integrar el mantenimiento con el resto de las funciones que intervienen en el ciclo de vida del sistema, evaluando su esperanza de vida y, en consecuencia, la rentabilidad a través de la actualización de los flujos de efectivo.

El mantenimiento puede modelarse a través de un proceso de transformación, que utiliza recursos como personas, dinero e información, para obtener una adecuada disponibilidad de los activos, que pueda luego traducirse en rentabilidad para la empresa. Del modelo, presentado en la siguiente ilustración, Tsang (2002) identifica cuatro dimensiones estratégicas en el mantenimiento: opciones de externalización, estructura organizacional, políticas de mantenimiento, e infraestructura de soporte.

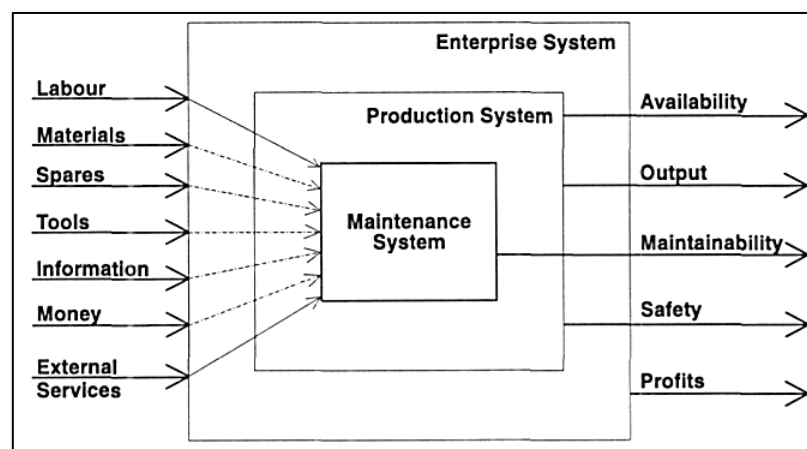


Figura 3-1. Modelo Input-Output de Mantenimiento.
(Adaptado de Tsang, 2002)

Es habitual que las empresas subcontraten las actividades de mantenimiento, en la búsqueda de mayor flexibilidad, menores costos, tecnología de punta y conocimiento especializado. De este modo, la organización puede enfocarse en el *core* del negocio, aunque se genera una dependencia del proveedor externo, el cual no necesariamente comparte la misma visión estratégica ni cultura organizacional, pudiendo dificultarse el flujo de información y conocimiento. Entre los diferentes tipos de servicios existentes, el *global service* es una prestación de empresas especializadas que proveen mano de obra, *know-how* y herramientas de gestión para la optimización del mantenimiento.

Por otro lado, Cárcel (2016) destaca entre los elementos esenciales del mantenimiento industrial la cadena de fallos, la incertidumbre y la incidencia del capital humano. La incertidumbre es una característica inherente del mantenimiento, ya que la actividad depende directamente de las fallas de un sistema, cuyo comportamiento es aleatorio por causas humanas, naturales, imprevistos y catástrofes de diversa índole que alteran la planificación y control de la actividad. Esta aleatoriedad complejiza la toma de decisiones y la optimización de la actividad. Algunas de las tendencias del mantenimiento moderno son: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), Mantenimiento Productivo Total (TPM), y Mantenimiento Basado en Condición (CBM). Los principales elementos de cada tendencia constituyen la filosofía del Mantenimiento Clase Mundial, que sirve como referencia para determinar el nivel de excelencia de las organizaciones, y se caracteriza por un cambio cultural que aumenta el autoestima del personal al establecer la conexión con elementos que otorgan valor al negocio, y el conocimiento del nivel de impacto de las decisiones en el mismo, adicional a la comprensión y entendimiento de la importancia de su actividad (Cáceres, 2004).

Un concepto que amplía y mejora el Mantenimiento de Clase Mundial es la Terotecnología, definida por Díaz Serrano y Díaz Povedano (2015a) como “el estudio y gestión de la vida de un activo, desde su construcción, instalación y puesta en marcha en una industria, hasta el final de su vida útil”. El mantenimiento basado

en Terotecnología integra las mejores prácticas gerenciales, financieras, de ingeniería, de logística y producción, apoyado con la última tecnología posible, para el logro de los siguientes objetivos: aumento de la disponibilidad de activos, reducción de los costos de mantenimiento, optimización de los recursos humanos, y mejoras en la vida útil de los activos. Aunque los factores humanos tales como el liderazgo y la cultura no se abordan directamente en el ámbito de aplicación de la Terotecnología, es claro que son críticos para el cumplimiento de los objetivos (Díaz S. & Díaz P., 2015b).

3.1.3. Proceso de Mantenimiento

La cadena de valor del mantenimiento, a grandes rasgos, se estructura de la siguiente forma:

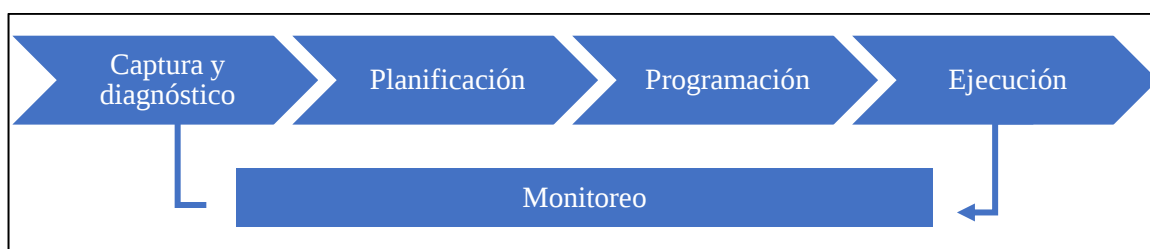


Figura 3-2. Cadena de valor del mantenimiento.
(Adaptado de Cáceres, 2004).

Más específicamente, los autores Arata y Furlanetto (2005) presentan en el “Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento” las siguientes actividades que componen el proceso de mantenimiento, las cuales se dividen en procesos estratégicos, subprocesos operativos, y subprocesos de apoyo.

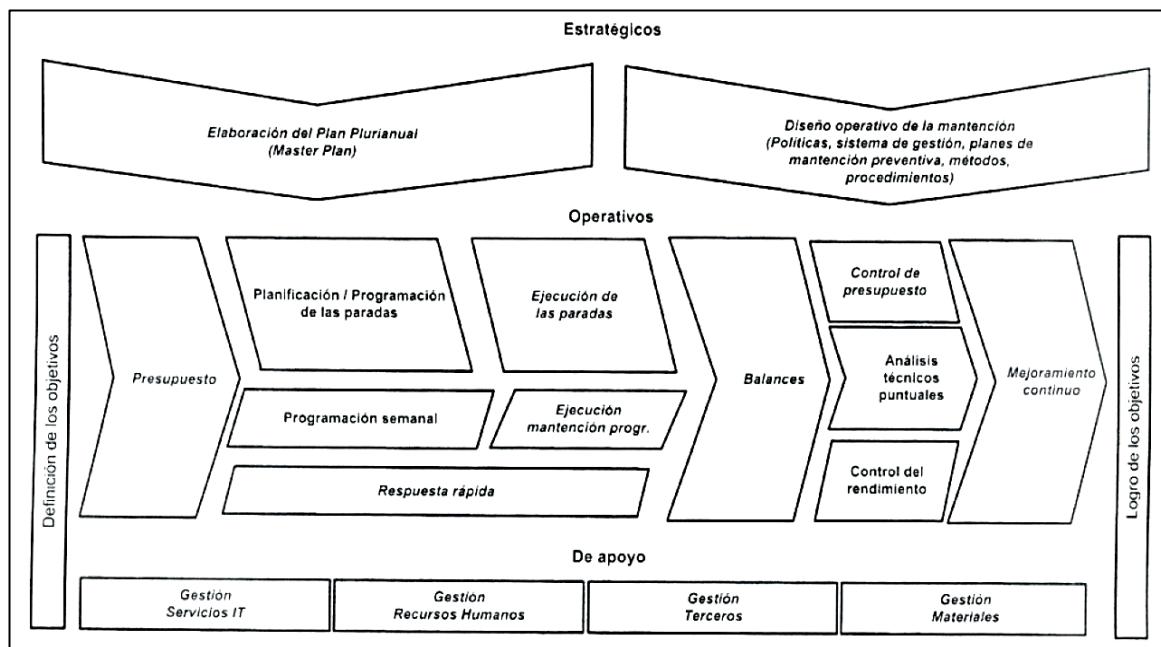


Figura 3-3. Proceso de Mantenimiento
(Adaptado de Arata y Furlanetto, 2005)

Los procesos estratégicos son:

- **Elaboración del plan plurianual de mantenimiento (Master Plan):** el plan debe captar los requerimientos de recursos, capacidades y herramientas necesarias para sostener la implementación del plan estratégico a nivel empresa.
- **Diseño operativo de la mantención:** hace referencia a la planificación del mantenimiento, y reúne actividades asociadas al diseño del proceso y su intercambio con procesos de apoyo, a la definición de políticas de mantenimiento, a la definición del modelo de gestión y control técnico-económico, y al desarrollo de herramientas de apoyo.

Los subprocesos operativos corresponden a:

- **Definición de los objetivos:** definición de planes de mantenimiento, estándares de trabajo y procedimientos de ejecución de actividades.
- **Presupuesto:** elaboración del presupuesto, alineado con el plan estratégico, cuantificando y calificando los requerimientos de recursos para el ejercicio actual.

- Planificación de las detenciones: programación de paradas, prestando especial atención a los requerimientos de recursos externos y materiales.
- Ejecución de las detenciones.
- Programación semanal de las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo.
- Ejecución de las mantenciones programadas.
- Respuesta rápida: primeros auxilios orientados a restablecer el funcionamiento de equipos, o a eliminar anomalías altamente críticas.
- Balance: elaboración de un balance de actividades, en aspectos técnicos y económicos.
- Control de presupuesto: verificación del empleo de recursos y costos correspondientes.
- Análisis técnicos puntuales: con el objetivo de estudiar eventos de mantenimiento significativos y la determinación de las acciones de mejoramiento.
- Control del rendimiento: respecto a indicadores previamente definidos.
- Mejoramiento continuo.

Finalmente, y de modo transversal, los subprocesos de apoyo son:

- Gestión de servicios IT
- Gestión de recursos humanos
- Gestión de terceros
- Gestión de materiales

Para llevar a cabo estas tareas, la función de mantenimiento suele organizarse en las siguientes áreas (Loui, 2012):

- Administración y servicios: reportes de gestión, control de contratos de servicios, entre otros.
- Ingeniería de mantenimiento: mejoramiento continuo, análisis de fallas, uso de softwares de gestión del mantenimiento, confiabilidad y monitoreo de condiciones.

- Planificación: planificación y programación de las actividades, y análisis de indicadores de desempeño.
- Operaciones: ejecución de las actividades de mantenimiento, inspecciones, trabajos correctivos, fiscalización de ejecución y calidad.
- Suministros: optimización de inventarios de repuestos, control de suministros, entre otros.

3.1.4. Estrategias de Mantenimiento

Una estrategia de mantenimiento debe minimizar los costos globales de la operación, desarrollando actividades de mantenimiento lo menos frecuentemente posible, pero resguardando la disponibilidad de los activos en el proceso productivo. Las estrategias de mantenimiento pueden clasificarse como correctivas (post falla) y preventivas (pre falla). A su vez, las estrategias de mantenimiento correctivo pueden ser inmediatas o diferidas, y las estrategias de mantenimiento preventivo pueden ser programadas, predictivas, o proactivas. La elaboración de un plan de mantenimiento implica combinar de forma óptima estas clasificaciones, en base al grado de criticidad de cada modo de falla, considerando su frecuencia, y sus efectos sobre el rendimiento y seguridad de la operación; con esta información, se asignan las estrategias de mantenimiento más complejas a las fallas más críticas, cuyos costos justifiquen el gasto asociado.

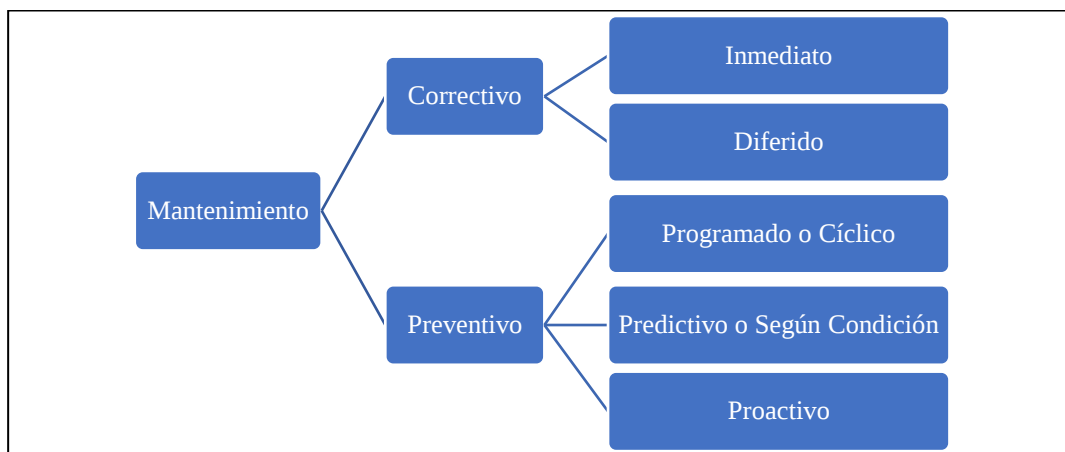


Figura 3-4. Estrategias de Mantenimiento.
(Fuente: Elaboración propia)

El mantenimiento correctivo, o post-falla, es una estrategia orientada a reparar luego de que la falla ya ocurrió, por lo que se asocia a una baja planificación, y a altos niveles de inventarios y mano de obra, de modo de asegurar la continuidad del proceso. A su vez, suele ser deficiente en cuanto a seguridad, y los costos pueden ser significativos al depender altamente de los tiempos de reparación y las inexistencias en inventario.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo busca reducir la probabilidad de ocurrencia de las fallas, evitando los efectos asociados a la detención repentina de la producción. Para esto, utiliza una serie de herramientas basadas en el tiempo de operación, o en la etapa del ciclo de vida. Las principales ventajas del mantenimiento preventivo son que permite planificar las actividades, estimando los requerimientos de materiales y recursos humanos, permite reducir los costos de las fallas, minimizar el tiempo de reparación de los equipos, y aumenta la seguridad de la operación. Se clasifica en:

- Mantenimiento programado o cíclico: las intervenciones se programan según fecha u horas de operación del equipo.
- Mantenimiento predictivo o basado en condiciones: se monitorean continua o periódicamente parámetros representativos del rendimiento de un equipo, para

los cuales se establecen rangos aceptables de operación. En caso de que un parámetro exceda los límites establecidos, entonces se interviene el equipo. La información disponible permite realizar análisis de modo de predecir la condición futura de los equipos. Es aplicable en la medida de que el costo de falla justifique la inversión en equipamiento y los costos de mano de obra asociada.

- **Mantenimiento proactivo:** se enfoca en detener y corregir las causas que originan el desgaste que puede conducir a una falla en el equipo o instalación.

Al evolucionar las estrategias de mantenimiento ha aumentado la cantidad de datos capturados por el seguimiento de equipos, lo cual justifica el desarrollo de sistemas de gestión basados en tecnologías de información, con la finalidad de tomar decisiones efectivas y optimizadas.

Adicionalmente existen estrategias de Mantenimiento Mejorado, que, a diferencia de las anteriores, se basan en una modificación genética de los equipos, como respuesta a resultados deficientes de la operación. El nivel de ingeniería estas estrategias es mucho más intensivo que las anteriores, sin embargo, alcanzan un nivel de prevención de falla mayor.

La participación del operador en actividades primarias de mantenimiento como la lubricación, limpieza, inspecciones de rutina y reparaciones menores, es fundamental para mejorar la disponibilidad de los equipos, independiente de la estrategia de mantenimiento seleccionada. Este concepto se desarrolla a profundidad en el *Total Productive Maintenance* (TPM).

Dada la imposibilidad de controlar todos los modos de falla posibles en un sistema productivo, se deben considerar una serie de factores complementarios que apoyen la búsqueda de una estrategia de cero fallas. Según Arata y Furlanetto (2005) los factores complementarios son:

- a) **Organización y recursos humanos:** para maximizar la eficiencia del personal de mantenimiento es esencial una adecuada gestión de recursos humanos, y un modelo de organización “integrado y flexible, con elevados niveles de coordinación y comunicación con el área de producción, que aseguren una

respuesta oportuna y precisa a los requerimientos de los clientes internos de mantención”.

- b) Planificación estratégica: una planificación que determine los requerimientos de mantenimiento durante todo el ciclo productivo, teniendo en cuenta consideraciones ambientales, escala productiva, flujo de procesos, selección de equipos y sistemas logísticos.
- c) Tecnología: sistemas de soporte que favorezcan la detección oportuna de fallas y la planificación de acciones preventivas.
- d) Investigación y desarrollo: se puede mejorar el proceso de mantenimiento al desarrollar nuevos materiales o mejorar el diseño de los equipos, de modo de facilitar las diferentes etapas de la ejecución y extender la vida útil.
- e) Estándares: puede facilitarse la ejecución del proceso de mantenimiento y la evaluación de los indicadores de desempeño a través de la estandarización.
- f) Ingeniería de Mantención: su objetivo es asegurar que los equipos se encuentren aptos para cumplir el plan de producción, minimizando los costos, a través de herramientas como el mantenimiento preventivo, monitoreo de condiciones, análisis de causa-efecto de las fallas, y el desarrollo de procedimientos para minimizar tiempos de reparación.
- g) Seguridad y medioambiente: el mantenimiento es una actividad clave para el control de emisión de residuos contaminantes, permitiendo una producción más limpia, y para el desarrollo de una operación de bajo riesgo mediante la definición de políticas preventivas.
- h) Mantenimiento indirecto: políticas de mantenimiento preventivo para todos los activos ligados a la función de mantenimiento, tales como los sistemas de monitoreo de condiciones.

3.2. Confiabilidad Operacional

En la actualidad, y como consecuencia de la competitividad industrial, el mantenimiento ha pasado a ser un sistema integral que contribuye a la generación de utilidades. Ante esto, García (2006) se refiere a la “Gestión de Activos basada en Ingeniería de la Confiabilidad” como la única vía efectiva que permite a las organizaciones enfrentar de forma eficiente los retos constantes a los cuales se encuentran sometidos. Se llama Confiabilidad a la “capacidad o probabilidad de un producto, proceso o sistema para realizar una función en el ambiente especificado de diseño por un determinado período de tiempo o eventos” (Nilo, 2005).

La Confiabilidad Operacional hace referencia a una serie de procesos de mejoramiento continuo, que incorporan de forma sistemática metodologías de análisis, avanzadas herramientas de diagnóstico, y nuevas tecnologías, con el objetivo de optimizar la producción industrial. Se basa en análisis estadísticos y de condición, y lleva implícita la capacidad industrial (procesos, tecnología y personas) para cumplir su función dentro de los límites de diseño y bajo un contexto operacional específico (García, 2006). Cuatro frentes componen la Confiabilidad Operacional:

- a) Confiabilidad de los Equipos: “Concatena herramientas y metodologías como Análisis de criticidad, Costo Riesgo Beneficio, Análisis Causa Raíz, Inspección basada en Riesgo, Modelos de inventarios, Optimización de planes de mantenimiento, basados en conceptos de gerencia del riesgo con miras a incrementar la confiabilidad” (Cáceres, 2004).
- b) Confiabilidad de los Procesos: “Se unen planificación, programación, costos de mantenimiento basados en actividad y contratistas orientados a la productividad, esto con el objetivo de integrar y asegurar la calidad de la ejecución del mantenimiento dentro de costos óptimos” (Cáceres, 2004).
- c) Confiabilidad Humana o del Talento Humano: se integra la consolidación de equipos naturales de trabajo, la gerencia del conocimiento y del desempeño, y los

modelos de competencias, para asegurar competitividad, eficiencia, y preservar el conocimiento.

- d) Confiabilidad de Diseño: aplicaciones de confiabilidad en etapas tempranas de la gestión de un activo físico, específicamente en las fases de Definición y Desarrollo, con el objetivo de generar un mayor impacto en los resultados globales de su vida útil.

En el contexto de la Confiabilidad Operacional, la Optimización Integral del Mantenimiento plantea un enfoque global para el desarrollo de las actividades, alineado con la misión del negocio, y que se estructura en torno a cuatro áreas (García, s.f.):

- a) Gestión del Talento Humano
- b) Definición de Estrategias de Gestión
- c) Optimización de los Activos Físicos
- d) Optimización de los Procesos y Sistemas de Información

García (s.f.) sugiere la siguiente Pirámide Tecnológica para desarrollar procesos de Optimización Integral del Mantenimiento, siendo el objetivo final la excelencia empresarial.

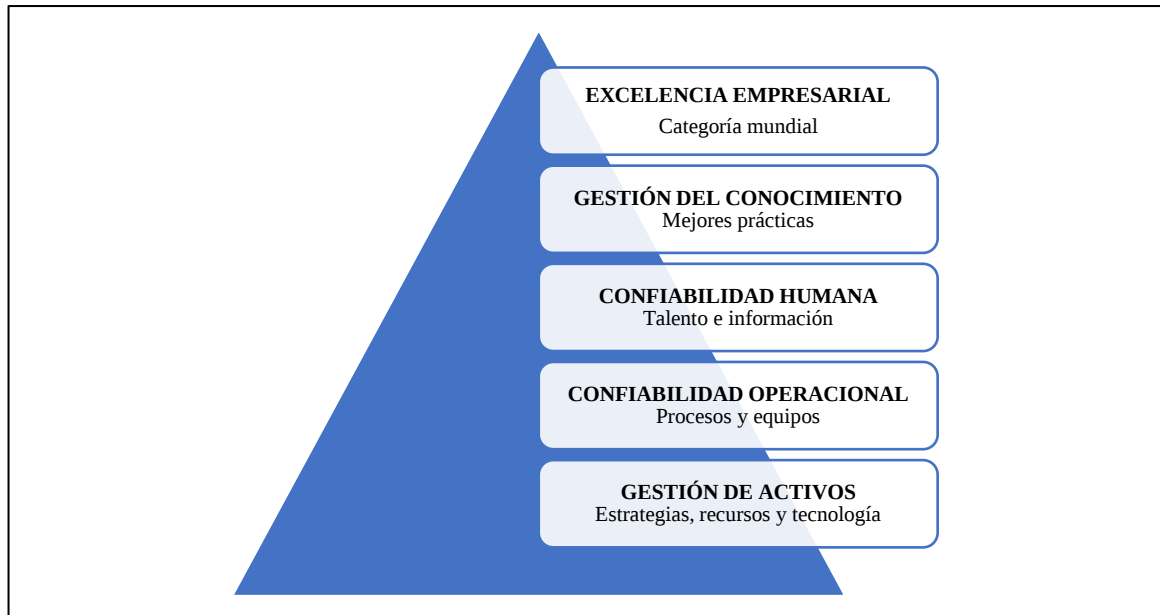


Figura 3-5. Pirámide Tecnológica
(Adaptado de García, s.f.)

En la base de la pirámide se encuentra la Gestión de Activos, como modelo gerencial que implica cambios en estrategias, tecnología, recursos y cultura organizacional. En el siguiente eslabón está la Confiabilidad Operacional, que introduce un avance sistemático para la eliminación de fallas potenciales y mal desempeño en equipos y procesos, mediante el uso del conocimiento y un adecuado liderazgo, con efectos en los resultados globales de la compañía.

En los niveles superiores se encuentra la Confiabilidad Humana y la Gestión del Conocimiento, que implican importantes transformaciones organizacionales y culturales, de modo de recuperar el valor de las personas, su conocimiento y experiencia, en la organización. De esta manera podría alcanzarse la Excelencia Empresarial, que se traduce en organizaciones basadas en el conocimiento para el logro de sus objetivos, apoyadas en tecnologías innovadoras, con un elevado nivel de aprendizaje, proactivas, futuristas, y dirigidas hacia la excelencia.

3.3. Confiabilidad Humana

3.3.1. Definiciones y Lineamientos Base

En primer lugar, García (2013) define el capital humano de una organización como los conocimientos, habilidades y destrezas de las personas que en ella se desempeñan, su salud física y mental, la calidad de sus hábitos de trabajo, sus actitudes, conductas, y múltiples inteligencias entre las que destacan la inteligencia emocional y social. Dada la influencia del actuar humano en la productividad, seguridad y resultados de actividades como el mantenimiento, es muy relevante su estudio y desarrollo por parte de las gerencias.

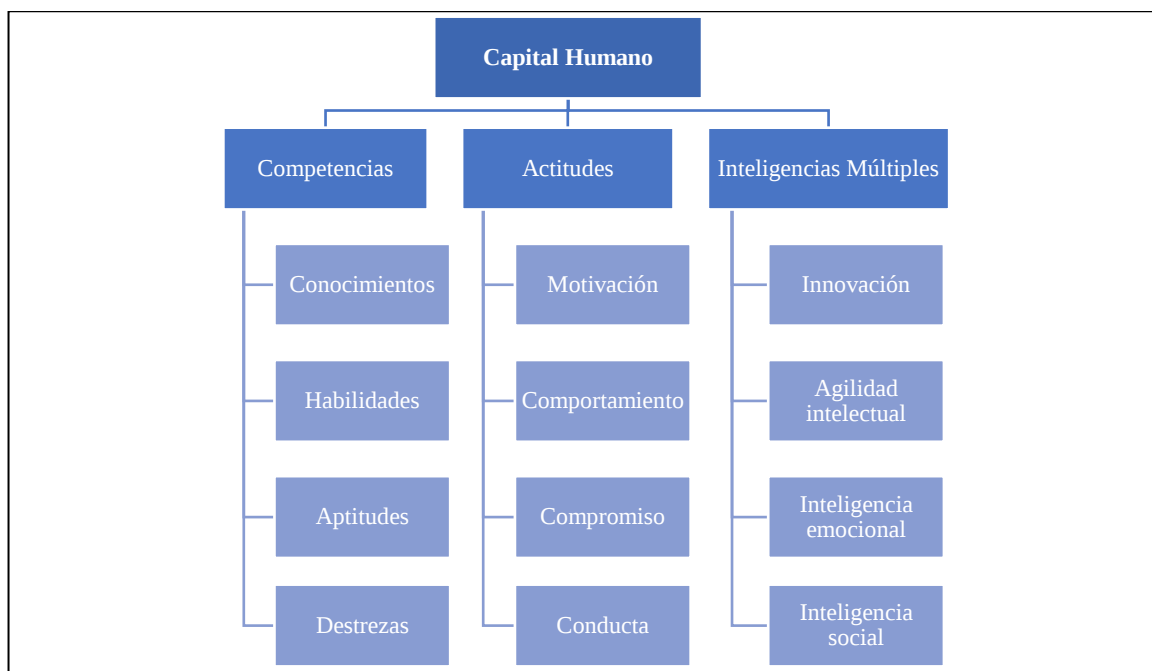


Figura 3-6. Capital Humano
(Adaptado de García, 2013).

Comprendido esto, la confiabilidad humana corresponde a “la capacidad de desempeño eficiente y eficaz de todas las personas en todos los procesos, sin cometer errores derivados del actuar y del conocimiento individual, durante su competencia laboral, en un entorno organizacional específico” (García, 2013). En la

práctica, se traduce en los siguientes factores de influencia personal para el desarrollo del capital humano en la organización:

- a) Formación y desarrollo: se debe capacitar práctica e integralmente al personal para que pueda realizar sus tareas correctamente desde el inicio, y con tendencia al mejoramiento continuo.
- b) Motivación: se debe proporcionar la motivación e incentivos necesarios para que el personal lleve a cabo sus tareas con compromiso, agrado y satisfacción.
- c) Comunicación: se debe establecer una sólida base de comunicaciones, y generar consciencia en las personas sobre la información que necesitan y la que deben suministrar.
- d) Sentido de pertenencia: se debe generar en el personal un sentido de pertenencia y compromiso con los objetivos corporativos, entendiendo que a través de ellos se alcanzará el desarrollo personal y profesional de cada trabajador.
- e) Ergonomía: la ergonomía del sitio de trabajo cumple un rol fundamental en la actitud y diligencia de los trabajadores.

El origen, y mayor desarrollo del concepto, se atribuye a evaluaciones de riesgos en industrias con sistemas altamente complejos y riesgosos, como la nuclear y la aeronáutica, en las cuales importantes accidentes han evidenciado la contribución del factor humano a la confiabilidad global; algunos ejemplos, descritos en la siguiente figura, son el desastre nuclear de Chernobyl, Three Mile Island y el accidente de la Aeronave Airbus A300-600. El error humano es el elemento que más contribuye a la seguridad y confiabilidad en muchos sistemas, con más de un 90% en la industria nuclear, más de un 80% en la química y petroquímica, 75% en la marina, y 70% en cuanto a accidentes aéreos. (Di Pascuale, Iannone, Miranda, & Riemma, 2013)

Three Mile Island (EEUU, 1979)	Chernobyl (Ucrania, 1986)	Accidente Aeronave Airbus A300-600 (EEUU, 2009)
• Accidente más grave en la historia de la industria nuclear civil de EEUU. • Fusión del núcleo con evacuación de gases radiactivos a la atmósfera. • Responsabilidad atribuida a una inadecuada formación de operadores y la realización de procedimientos inadecuados.	• Explosión de uno de los cuatro reactores de la central, durante la realización de un test de mantenimiento. • Se señalan como las principales causas: diseño inadecuado, falla en el procedimiento de prueba, falta de preparación de los operadores y de cultura de seguridad.	• Ejemplo de accidente en la industria aeronautica causado por el factor humano. • Avión impacta en zona residencial de Nueva York, poco después de despegar, falleciendo tripulantes, pasajeros y víctimas del impacto. • Responsabilidad atribuida a esfuerzos a los que se encontraba sometido el estabilizador vertical, debido a entradas innecesarias y excesivas en el pedal de timón de dirección del oficial, afectado por modificaciones realizadas por la aerolínea.

Figura 3-7. Antecedentes históricos confiabilidad humana.
(Adaptado de Neyra, s.f.)

Los estudios de confiabilidad humana permiten diagnosticar, tratar y actuar para solucionar problemas de rendimiento de los recursos humanos, medulares en el funcionamiento de una organización. Su ejecución es habitual en instalaciones con alto riesgo ante fallas, como las centrales nucleares y petroquímicas, y se eluden en la pequeña y mediana industria, formalizándose sólo en algunos grandes entornos industriales (Cárcel, 2016). Sin embargo, se pueden encontrar casos de uso en áreas de salud, ingeniería, transporte y negocios, variando las diferentes técnicas existentes para acomodarse a la disciplina en cuestión.

Leal (2017) indica que en la Confiabilidad Humana existe entre un 10% y un 30% de las oportunidades de mejoramiento, pudiendo generar entre un 70% y un 90% de contribución; comparativamente la Confiabilidad de Procesos y de Equipos cuentan con un 5-10% de las oportunidades cada una, generando una contribución solo de entre un 10 y un 30%. Adicionalmente, indica que un estudio de Confiabilidad

Humana se justifica en mayor grado cuando uno o varios de los siguientes factores se encuentran presentes en el proceso productivo:

- Índices no tolerables de seguridad.
- Afectación recurrente del ambiente.
- Deficiente calidad de productos.
- Reclamos de clientes.
- Elevados costos operativos.
- Organizaciones no exitosas.
- Incremento en la tasa de fallas de los equipos o sistemas.
- Incremento de los errores humanos, detectados en análisis causa-raíz.

3.3.2. Error Humano

Las tareas operativas se caracterizan por un sistema interactivo entre humanos, equipos, y el entorno físico y social. Tanto los componentes individuales, como las interacciones, definen la confiabilidad, y la eficiencia y eficacia con las que se cumplen los objetivos. En el sistema, el componente humano es el factor menos conocido y controlable, motivo por el cual la confiabilidad humana busca minimizar los riesgos de error en esta interacción. Para su estudio, el enfoque psicológico permite la generalización de los individuos, con la finalidad de crear planes de prevención y predicción de errores, aunque no de forma absoluta.

Varias personas influyen en el ciclo de vida de un sistema a través de sus acciones y decisiones, desde el diseñador del equipo hasta el personal de mantenimiento, considerando redactores de procedimientos, supervisores, entrenadores y operadores. En cada caso, el rol humano en el sistema es llevar a cabo una tarea definida, interactuando con la máquina para lograr un objetivo definido (IEC, 2010). Leal (2017) distingue acciones humanas primarias, donde el hombre es una interfaz directa con el proceso o los equipos, y secundarias, que corresponden a acciones indirectas como la planificación. En ambos casos, la influencia de la persona puede ser positiva, como también negativa, derivando en un error humano que puede

causar un accidente inmediato, o bien jugar un rol importante en el desarrollo de sucesos indeseados.

El error humano se define como la “falla de una acción humana definida, producto de múltiples probables causas (normalmente de índole externa) que puede afectar componentes (defecto) y procesos (alteración). Si la consecuencia es significativa (crítico) requiere una reparación inmediata” (Leal, 2017).

Todas las personas están sujetas a cometer errores, dadas las limitaciones físicas, cognitivas y psicológicas propias del ser humano (Figura 3-8). Esto conlleva un gran impacto en el sistema, por lo que el no incorporar las limitaciones inherentes y la probabilidad de error en su diseño, induce a resultados de confiabilidad incompletos y habitualmente mal valorados. Del mismo modo, el diseño de la máquina y el entorno deben ser controlados dentro de límites aceptables que no afecten el rendimiento de la persona durante la ejecución de sus tareas.

Limitaciones Físicas
• Restricciones antropométricas y biomecánicas. • Restricciones sensoriales.
Limitaciones Cognitivas
• Tiempo requerido entre la percepción de una señal y la respuesta a ella. • Memoria a corto plazo limitada. • Limitación en la cantidad de información procesable simultáneamente. • Incapacidad de concentrarse en varias tareas simultáneas. • Percepción de la realidad incorrecta ante ciertas situaciones.
Limitaciones Psicológicas
• Degradación del rendimiento debido a fatiga física y/o mental. • Tendencia a tomar decisiones basadas en aspectos emocionales.

Figura 3-8. Limitaciones Humanas.
(Adaptado de IEC, 2010).

Muy asociado con lo anterior, García (2006) indica que los errores humanos posibles se deben a factores que pueden clasificarse en cuatro categorías:

- a) Factores Antropométricos: errores atribuidos a la imposibilidad de que el operario se acomode físicamente a las condiciones del sistema o equipo, debido

a su tamaño o a la resistencia física con la que cuenta. Los errores de este tipo suelen ser fallas de un sistema que requiere modificación o rediseño.

- b) Factores Sensoriales: errores atribuidos a la capacidad de las personas para utilizar sus sentidos en la percepción de qué ocurre en su entorno. La visibilidad o el nivel de ruido pueden ser factores que induzcan al error, por lo que deben tomarse acciones correctivas para mitigarlos. Están asociados al ambiente físico.
- c) Factores Fisiológicos: errores atribuidos a tensiones medioambientales que generan fatiga, y con ello afectan al desempeño humano. Se pueden reducir efectuando cambios en el clima organizacional o en los procesos a realizar.
- d) Factores Psicológicos: errores atribuidos a aspectos internos o psíquicos de las personas, intencionales o no intencionales. Suelen requerir tratamiento especializado.

A su vez, la literatura define los siguientes tipos de errores en procesos industriales (García, 2006; Patterson, 2009):

- Desliz: el curso de acción planeado es adecuado, pero ocurre un fallo involuntario (sin intencionalidad) debido a falta de atención, por lo que se encuentran muy asociados a malas prácticas del operador. Se caracterizan por ser errores potencialmente evidentes, y suelen ocurrir en situaciones altamente automatizadas.
- Lapsos: el curso de acción planeado es adecuado, pero ocurre un fallo involuntario (sin intencionalidad) debido a falta de memoria o fallo del proceso cognitivo, por lo que se encuentran muy asociados a malas prácticas del operador. No necesariamente son evidentes, y suelen ocurrir en situaciones altamente automatizadas.
- Equivocación: fallo o deficiencia debido a un comportamiento equivocado basado en:
 - Habilidades o competencias: comportamiento inconsciente y automatizado por naturaleza.

- Reglas: aplicación de reglas aprendidas, como políticas y procedimientos, en la toma de decisiones. Los errores ocurren cuando un individuo usa la regla incorrecta o aplica incorrectamente una buena regla.
- Conocimiento: el individuo aplica conocimientos previamente aprendidos, por lo que implica una gran demanda mental que puede causar problemas en situaciones de emergencia. Los errores se producen por falta de formación o información.
- Violación o Negligencia: fallo intencional, o acto de sabotaje, que se desvía de los procedimientos previamente establecidos. Desprecio deliberado de las reglas y regulaciones establecidas, y se clasifican en:
 - Rutinarias: se lleva a cabo con la finalidad de reducir el tiempo empleado en un procedimiento y así elevar su rendimiento, pero realizando el menor esfuerzo posible. En el tiempo pueden convertirse en conductas habituales, y suelen ser toleradas por la gerencia.
 - Excepcionales: poco frecuentes y difíciles de predecir, ya que son fallos cometidos en instancias puntuales, por ejemplo, trabajando bajo presión.
 - Sabotaje: fallo realizado con la única intención de causar daño a personas o equipos.

En cuanto a la clasificación de error humano presentada por Calixto, Alves G. y Alves P. (2013), un Error por Omisión corresponde a una acción que no se realiza debido a lapsos o deslices; un Error por Comisión corresponde a una acción ejecutada de forma incorrecta, ya sea por desliz, lapso o equivocación; y un Error Intencional no es más que una violación o negligencia descrita anteriormente.

Con el objetivo de profundizar en las causas del error humano, se han desarrollado múltiples taxonomías con perspectivas cognitivas, ergonómicas, epidemiológicas y psicológicas. Algunas de las reconocidas como más relevantes por Patterson (2009), en el marco de la reducción de accidentes, son: Modelo SHEL, ICAM (Incident Cause Analysis Method), Método BeSafe (Behavioral Safety), Rueda de la

Desgracia, Modelo del Queso Suizo (SCM), y el HFACS (Human Factors Analysis and Classification System).

El Modelo SHEL fue desarrollado originalmente por Edwards en 1972, para incluir los factores humanos en el diseño de sistemas operacionales. El modelo describe las interacciones entre el humano y las máquinas e identifica las áreas de potencial falla, dividiendo estas en 4 categorías: fallas de *software* (documentos, políticas, regulaciones y normas sobre las que opera el sistema), fallas de *hardware* (recursos físicos utilizados), de condiciones ambientales (entorno físico en el que opera), y de *liveware* (personas involucradas). El error ocurre cuando cualquiera de los componentes o las conexiones entre ellos fallan.

El Método ICAM (Incident Cause Analysis Method) fue presentado por BHP Billiton en el año 2000, y se basa en las siguientes 3 creencias: la causa raíz de un accidente puede estar vinculada a deficiencias organizacionales, el error humano no puede evitarse y debe aceptarse, y si una organización pretende realmente reducir su número de accidentes entonces debe adoptar un nuevo enfoque que aprenda de los errores. Este método ha sido utilizado en diversas industrias, ya que permite identificar las deficiencias organizacionales y defensas fallidas, para luego desarrollar recomendaciones que las ataquen. En la práctica, los objetivos de una investigación ICAM son: establecer hechos, identificar factores contribuyentes y condiciones latentes, revisar idoneidad de controles y procedimientos existentes, informar hallazgos, recomendar acciones correctivas, detectar factores organizacionales que pueden ocasionar problemas recurrentes, y establecer medidas transversales basadas en aprendizaje.

El Modelo SCM, o del Queso Suizo, fue desarrollado por el profesor Jame Reason en la década de los noventa, para analizar accidentes que resultan de una falla en el sistema. Él define las fallas como una combinación de fallas activas y condiciones latentes; las fallas activas corresponden a actos inseguros de quienes tienen contacto directo con el sistema, y se clasifican como errores o violaciones, con o sin intención. Las condiciones latentes de un sistema a menudo pasan desapercibidas

hasta que ocurre un evento adverso, y pueden crear condiciones que provocan errores, o crear debilidades en las defensas del sistema.

Reason se basa en el supuesto de que hay componentes fundamentales dentro de una organización que deben trabajar adecuadamente en conjunto para lograr un ambiente seguro y de eficiencia. La primera versión del modelo se definían cinco planos consecutivos en el sistema: los tomadores de decisiones de más alto nivel, la línea de gerencia, condiciones previas, actividades productivas, y las defensas; cuando se desarrollan agujeros transversales a todos los planos del sistema, que corresponden a las fallas activas y latentes, entonces ocurren eventos adversos. Para la segunda versión del modelo, los planos se reducen a tres: la organización, el contexto o entorno de la tarea, y el individuo, pero el plano de defensas se extiende a tres capas. En la tercera versión (1997), se eliminan las etiquetas asociadas a cada plano, y ahora los planos representan las barreras, controles, defensas y salvaguardas del sistema. Se agregó una explicación de cómo surgen los agujeros, y flechas para distinguir las direcciones en las que ocurre y se investiga un accidente.

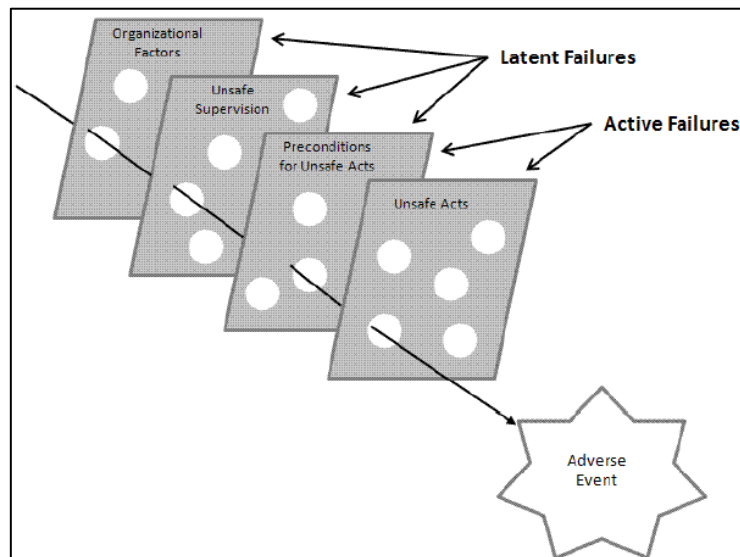


Figura 3-9. Modelo SCM.
(Patterson, 2009)

El Método BeSafe (Behavioral Safety) fue desarrollado por ergonomistas en British Coal, e intenta identificar las causas latentes de los accidentes provocados por error humano. Este método sigue el Modelo SCM presentado anteriormente, y trata de abordar sistemáticamente las fallas del sistema. El objetivo de BeSafe es identificar áreas donde el error humano es posible, antes de que ocurra, mediante el uso de herramientas ergonómicas como listas de verificación, análisis de tareas y cuestionarios. Se utilizan estadísticas existentes sólo como verificación, ya que el enfoque es basado en evaluaciones previas al error.

El modelo de Rueda de la Desgracia fue desarrollado en el 2000 por O'Hare, para analizar el papel de los factores humanos en los accidentes aeronáuticos u otros sistemas complejos. La estructura básica es de tres esferas concéntricas que representan las acciones de los operadores de primera línea, las condiciones locales, y condiciones organizativas. La esfera más interna, de "acciones locales", intenta describir qué pasó, y las exteriores apuntan a descubrir por qué sucedió.

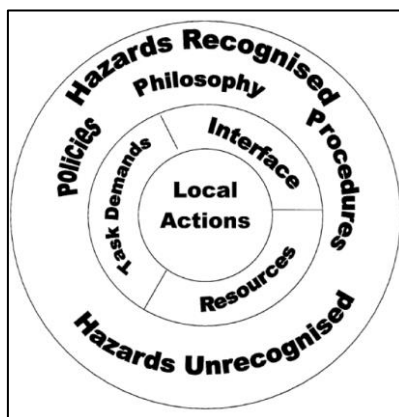


Figura 3-10. Modelo de la Rueda de la Desgracia.
(Patterson, 2009)

Finalmente, el Modelo HFACS (Human Factors Analysis and Classification System) fue desarrollado por el Dr. Scott Shappell y el Dr. Douglas Wiegmann para la Marina de EEUU, con el objetivo de que éste no solo fuese útil como herramienta de análisis, sino también como una estructura para la investigación de accidentes.

El marco fue desarrollado para definir las fallas latentes y activas que se identificaron en el SCM de Reason. El sistema de HFACS consta de cuatro niveles:

- a) Actos inseguros: acciones que ocurren inmediatamente antes de un error, y que resultan directamente en un evento adverso. Se dividen en tres categorías de error (basado en competencias, error de decisión, y perceptual), y dos categorías de violación (rutinaria y excepcional).
- b) Condiciones previas para actos inseguros: describe las condiciones ambientales y psicológicas que conducen a un acto inseguro. Estas condiciones incluyen los entornos físicos y tecnológicos, la comunicación, aptitud para el deber, limitaciones físicas y mentales, estados mentales adversos y estados fisiológicos.
- c) Supervisión insegura: se ocupa de las acciones y decisiones de la primera línea de administración. Las subcategorías incluyen: supervisión inadecuada, planificación de operaciones inapropiadas, falta de corrección de problemas conocidos y violación de la supervisión. Cada una de estas se divide en más subcategorías, con un total de 19 categorías causales en el marco original.
- d) Influencias organizacionales: asociadas a la gestión de recursos humanos, clima y procesos organizacionales.

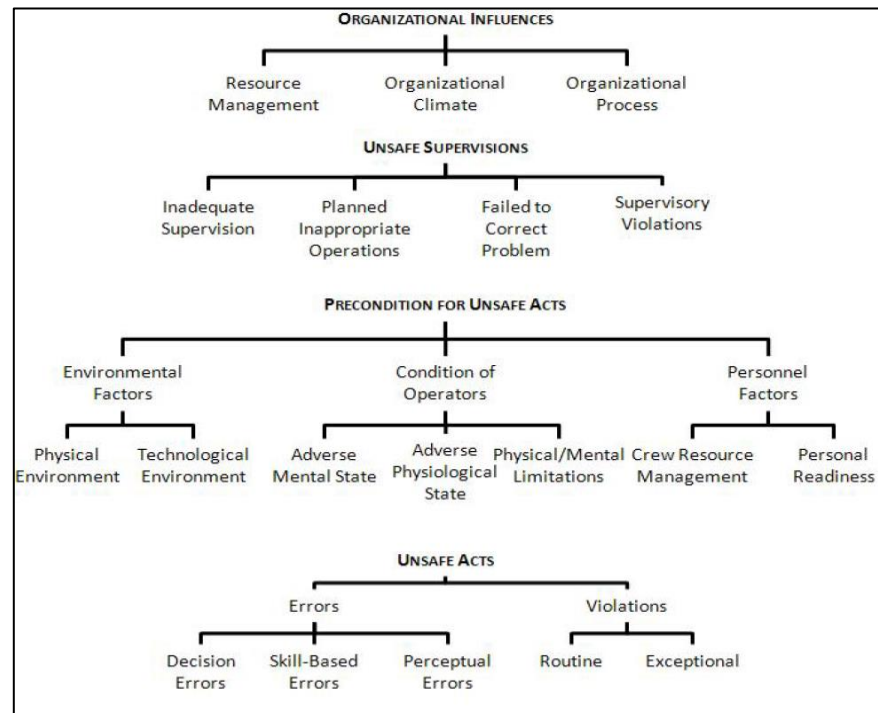


Figura 3-11. Modelo HFACS.
(Patterson, 2009)

El Modelo HFACS ha demostrado ser útil en aviación militar y civil, mantenimiento aeronáutico, control de tráfico aéreo, ferrocarriles, medicina y aeronaves pilotadas. Cuenta con una rigurosa validación en criterios de confiabilidad, exhaustividad, diagnóstico y usabilidad.

Diversas críticas al modelo han aparecido, por ejemplo, sugiriendo que el individuo se desliga de la culpa al derivar la responsabilidad a la organización, sin embargo, estudios ((Li y Harris, 2006; Tvaryanas et al., 2006) han encontrado relaciones estadísticas entre niveles del marco HFACS, demostrando que el modelo no está simplemente derivando la culpa, sino que está descubriendo condiciones latentes que han demostrado efectos en el desempeño del operador.

3.3.3. Cultura de la Confiabilidad Humana

Una estrategia de confiabilidad humana implica importantes cambios en la organización, instalando una cultura del desafío y el cuestionamiento de los procesos administrativos, junto con el gerenciamiento efectivo de las comunicaciones y la responsabilidad para el registro sistemático de la información. Por lo tanto, los cambios deben ser a nivel de la cultura organizacional, entendida como “el conjunto de principios y creencias básicas de una empresa que son compartidos por todos sus miembros y que la diferencian de otras organizaciones” (García, 2006).

Según los autores Guttman y Swain (1983), a nivel organizacional los procesos de confiabilidad humana deben satisfacer los siguientes criterios:

- Enfoque sistemático simple, no burocrático y de entendimiento para todos.
- Debe existir un Líder de Confiabilidad de alto nivel, con dedicación total a esta función.
- Los roles individuales conocidos por todos deben tener un alcance realista, y metas claras de fácil medición y control.
- Cuando no se logran las metas, la gerencia debe realizar acciones correctivas y los respectivos ajustes al programa.
- Se deben utilizar como herramientas de uso continuo el *kaizen*, *kairyo*, la innovación y la reingeniería.
- Cada error humano debe verse como oportunidad de aprendizaje.
- Se deben mantener programas de mejoramiento continuo.

La gestión humana eficaz implica una dirección por valores, el uso de modelos de competencias, planes de entrenamiento, empoderamiento, trabajo en equipo y, transversalmente, inteligencia emocional, ya que todos los actores deben comprometerse e involucrarse con la misión de la organización.

En efecto, es posible relacionar los elementos anteriores con el modelo jerárquico de necesidades desarrollado por Maslow, el cual muestra las necesidades que

afectan a todo individuo, organizadas en forma de pirámide, con las prioritarias en la parte baja y las menos dominantes en la parte superior. Cuando las personas satisfacen las necesidades de determinado nivel, se trazan nuevas metas para alcanzar los niveles superiores sucesivos, intentando siempre alcanzar una mayor satisfacción personal. La satisfacción personal estaría intrínsecamente ligada a un adecuado desempeño en las tareas de la persona. (Espinosa, Rebolledo, Irausquín y Quiroga, 2012)

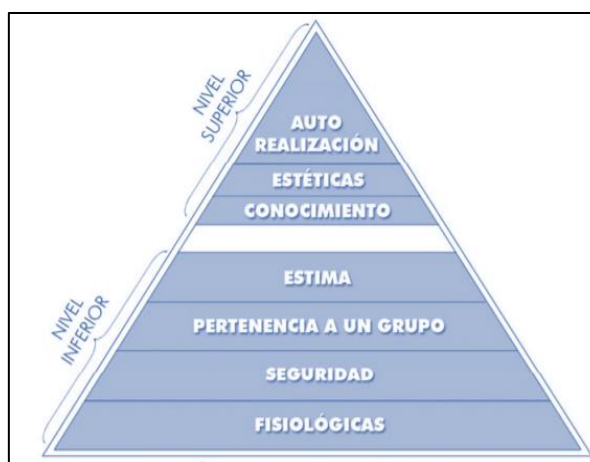


Figura 3-12. Pirámide de necesidades de Abraham Maslow
(Vázquez & Valbuena, 2010)

En este contexto, el doctor Víctor Leal (2017) identifica a la inteligencia emocional como la base de un modelo de Confiabilidad Humana, definiéndola como la capacidad de reconocer nuestros propios sentimientos y los del resto, de motivarnos y de manejar adecuadamente las relaciones. Entre los beneficios de la inteligencia emocional se encuentra el incremento de la autoconciencia, mejoras en el equilibrio emocional, el fomento de relaciones armoniosas, un mejor rendimiento laboral, mayor motivación y capacidad de influencia, y una reacción positiva a la tensión y estrés.

3.4. Políticas y Estrategias de Confiabilidad Humana

La alta gerencia debe generar políticas para optimizar la confiabilidad humana, cuyo proceso de desarrollo se divide en las siguientes tres etapas (Latino, 2002):

- a) Precisar las brechas, para proveer de herramientas y capacitación.
- b) Establecer roles y responsabilidades, y desarrollar medios para dar vigencia.
- c) Establecer modos de reconocer a quienes demuestran nuevos comportamientos.

De lo anterior se desprende que algunos de los elementos básicos de una política de confiabilidad humana son la capacitación, motivación, el conocimiento y el reconocimiento. Una buena política de capacitación debe ser parte de la política general de la empresa, y debe unificar la formación interna y externa, sobre todo en áreas intensivas en subcontrato como lo es el mantenimiento. Los niveles directivos deben colaborar con el desarrollo del personal, impulsando su formación, delegando tareas, exigiendo elevados niveles de desempeño y generando oportunidades de participación. Todo esto debe acompañarse de un plan de incentivos de alto alcance, justo y flexible para adaptarse al cambio.

Una política de confiabilidad humana se compone de diferentes estrategias concretas, cuyo fin común es recuperar el valor de las personas en la organización, en un contexto cada vez más tecnificado y automatizado, que requiere como punto de partida que también sea más humano.

Según García (2013), para mejorar la confiabilidad humana se debe crear un plan que integre las cuatro estrategias presentes en la siguiente figura, las cuales se profundizan en los siguientes puntos.



Figura 3-13. Estrategias de Confiabilidad Humana.
(Adaptado de García, 2013)

3.4.1. Gestión del Conocimiento

García (2006) define el Conocimiento como la información que posee valor agregado, al permitir generar acciones encaminadas a satisfacer las demandas del mercado, y apoyar las oportunidades a través de la explotación de las competencias centrales de la organización.

El Conocimiento forma parte del Capital Intelectual de una organización, que corresponde al conjunto de activos intangibles que pueden utilizarse para generar valor, compuesto por el aprendizaje corporativo, valores esenciales, conocimientos, habilidades gerenciales, espíritu de equipo, el plan de cumplimiento de competitividad, el uso dado softwares, las rutinas y procesos operacionales, las bases de datos, entre otros aspectos. El Capital Intelectual, manifestado a través de la fuerza de trabajo, permite resolver los problemas y llevar a cabo las actividades que aseguran el cumplimiento de los objetivos.

Puede definirse la Gestión del Conocimiento como:

La planificación, organización, dirección, coordinación y control de una red de personas incorporadas en los procesos de la cultura organizacional y apoyadas por las tecnologías de la información y las comunicaciones, que busca la creación, adquisición, adaptación, asimilación, organización,

transmisión, protección, uso y conservación del conocimiento, generando beneficios intelectuales, tangibles e intangibles, orientados a potenciar las competencias de la organización y la generación de valor. (García, 2013)

El concepto descrito hace referencia al conocimiento corporativo (Capital Intelectual), sin embargo, son las personas quienes lo constituyen mediante sus experiencias y aprendizajes (Capital Humano). Los conocimientos individuales, integrados con los corporativos, constituyen el Capital Intelectual Estructurado de la organización.

Actualmente el conocimiento es un recurso movilizador y foco de la producción de riqueza en el mundo, en un nivel de desarrollo en que ya no solo importa su producción y el acceso, sino que también la velocidad en que se transfiere. Se llama Organizaciones que Aprenden a aquellos organismos que aplican tecnologías para una gestión eficiente y eficaz del conocimiento, ya que entienden el alcance de ello. Su evolución es a las Organizaciones del Conocimiento, que corresponden a aquellas que “basan su estrategia competitiva en el aumento permanente de la productividad, por medio de la optimización de sus activos fijos y de su Talento Humano, mediante el uso de una muy buena base de conocimiento en continua retroalimentación” (García, 2006).

La Gestión del Conocimiento es mucho más que el uso de base de datos, su finalidad es distribuir el conocimiento a través de toda la organización, y promover su intercambio permanente, de modo de perpetuar y aprovechar el valor generado. Algunos de los elementos que componen la Gestión del Conocimiento, según Cáceres (2004), son: comunidades de conocimientos, buenas prácticas, lecciones aprendidas, competencias y pericias claves, visión compartida, aprendizaje en equipo, y el desarrollo profesional individual.

Lo anterior debe complementarse con un adecuado Sistema de Información, que almacene todos los datos, procedimientos y recursos involucrados en el mantenimiento, y permita generar y compartir información que agregue valor apoyando la toma de decisiones. García (s.f.) destaca que un Sistema de Información Gerencial puede ser muy útil en mantenimiento ya que:

- Facilita la preparación de informes y reportes con análisis de tendencias.
- Muestra de forma instantánea el estado de ejecución de programas.
- Permite la presentación gráfica y precisa de logros.
- Contribuye al control de las desviaciones de los objetivos y facilita la corrección temprana.
- Permite simular decisiones y sus resultados.

Según Cárcel (2016), la mayoría de los estudios formalizados de confiabilidad humana solo consideran los procesos humanos que dan lugar a fallas, sin tener en cuenta el tratamiento y gestión del conocimiento, que debidamente analizado y procesado mejora la confiabilidad global, la gestión de fallas, los tiempos de mantenibilidad, y la optimización de costos. Algunos factores comunes entre las organizaciones con una efectiva gestión del conocimiento son:

- Se dirigen hacia la excelencia, siendo el capital intelectual su mayor activo.
- Tienen alta flexibilidad y adaptación mediante el uso continuo de nuevas tecnologías de la información y comunicaciones.
- Tienen un alto nivel de competencia y gestión eficaz del conocimiento.
- Tienen un elevado nivel de aprendizaje en equipo, que se base en permanente innovación.
- Hacen uso de la autogestión para determinar sus competencias esenciales.
- Son proactivas y futuristas, basando sus planes de crecimiento en planes de visión compartida.

Un modelo para gestionar el conocimiento debe permitir enlaces fluidos entre los agentes, en el marco de una estructura en red, y con amplia apertura al aprendizaje, por lo que requiere un cambio organizacional y cultural respecto a la forma de aprender y hacer. Además, debe abarcar los dominios actuales de conocimiento de la organización y también los futuros escenarios, permitiendo el diálogo y reflexión necesarios para potenciar los motores de conocimiento existentes. Es esencial que se consideren tanto los conocimientos explícitos como los tácitos, y que la

diferenciación entre los diferentes agentes sea mínima, valorando e integrando el aporte a nivel individual, grupal, organizativo e inter-organizativo. (Petrella y Joyanes, 2011)

Existen tres dimensiones que caracterizan un modelo de gestión del conocimiento: los recursos basados en conocimiento que consideran, las actividades de gestión del conocimiento que actúan sobre los recursos, y las influencias de la gestión del conocimiento que facilitan o limitan la manifestación de estas actividades. Petrella y Joyanes (2011) recomiendan a las organizaciones contar con modelos personalizados de gestión del conocimiento, según las dimensiones mencionadas, y el desarrollo de un esquema de clasificación del conocimiento por niveles de uso, de modo de facilitar su transferencia. Además, llaman a tener especial cuidado con la estandarización de procesos, comprendiendo su relevancia y limitaciones, ya que puede atentar contra la flexibilidad para generar nuevos conocimientos.

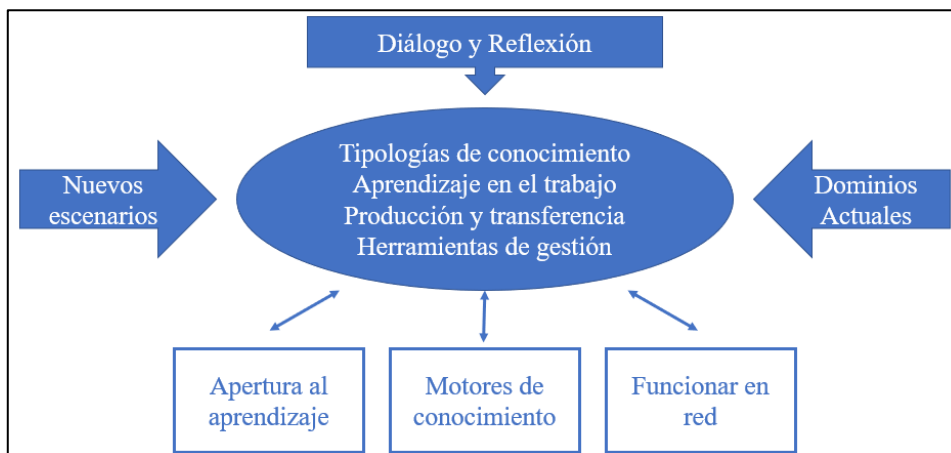


Figura 3-14. Modelo de Gestión del Conocimiento
(Adaptado de Petrella y Joyanes, 2011)

Es muy relevante la innovación para gestionar el conocimiento de las organizaciones, pero del mismo modo es necesario el conocimiento para poder innovar. Es fundamental un manejo eficaz y eficiente el conocimiento de las organizaciones para transformarse e innovar, lo cual sólo cobra sentido con una

cultura corporativa que estimule la difusión de la información, y su manejo proactivo.

3.4.2. Trabajo en Equipos Naturales

Se define Equipo Natural de Trabajo como “conjuntos de personas de diversas funciones dentro de la organización que trabajan juntas por un período de tiempo determinado, en un ámbito de potenciación de energía, para analizar los problemas de distintos departamentos, apuntando al logro del objetivo común”. (García, 2013) La finalidad de un equipo de mantenimiento debe ser asegurar la implementación de estrategias desarrolladas, sincronizar actividades, establecer planes integrales de acción, y optimizar globalmente los costos asociados a la actividad. De este modo se obtendrán beneficios en términos de innovación, colaboración, confianza, motivación, sentido de pertenencia, calidad del trabajo, sinergia colectiva, comunicación efectiva y responsabilidad compartida. Actualmente existe mayor conciencia sobre las ventajas del trabajo en equipo, y de la importancia de contar con un líder que sepa aprovechar las ventajas individuales para un óptimo desempeño colaborativo.

Algunas características de un equipo de alto rendimiento son las siguientes: (García, 2012)

- Creatividad e innovación
- Visión y talento
- Conocimiento y liderazgo
- Comunicación y confianza
- Rapidez y proactividad

Cáceres (2004), indica que las funciones básicas en un equipo de mantenimiento son las siguientes:

- Operador: apoya mediante su experiencia en el manejo y operabilidad de equipos.
- Planificador Integral y Programador: proporcionan una visión global y sistémica del proceso, respectivamente.

- Mantenedor: apoya mediante su experiencia práctica en el mantenimiento de equipos.
- Especialistas: brindan conocimientos de áreas específicas.
- Diseñador o Ingeniero de Procesos: proporciona elementos del diseño y funcionamiento de los equipos.
- Facilitador: corresponde a un asesor técnico o metodológico.

La evolución del mantenimiento en el tiempo ha llevado al desarrollo de nuevos perfiles profesionales, como los siguientes (Arata y Furlanetto, 2005):

- Operador polivalente: encargado de operar el equipo que cuenta con conocimientos técnicos no especializados del mantenimiento de este, pero si con una “cultura de la mantención”, y de la relación entre ella y el uso del equipo.
- Mantenedor especializado: mecánico, electricista, técnico de diagnóstico, entre otros.
- Mantenedor de sistemas: capaz de diagnosticar averías y de reparar sistemas complejos.

3.4.3. Gerencia del Desempeño

La Gerencia del Desempeño, según García (2006), corresponde al “proceso que permite monitorear y evaluar la idoneidad del talento humano durante la implantación y desarrollo de las estrategias propuestas, con el fin de garantizar la generación de valor y establecer las acciones correctivas de manera proactiva”. Gestionar el desempeño es de alta relevancia en la búsqueda de la excelencia organizacional, apuntando no sólo al desempeño individual, sino que también a las relaciones y el trabajo conjunto.

Para una aplicación exitosa de la Gerencia del Desempeño en la resolución de problemáticas, se debe generar un plan de mejora continua que siga necesariamente los siguientes pasos (Daniels, 1993):

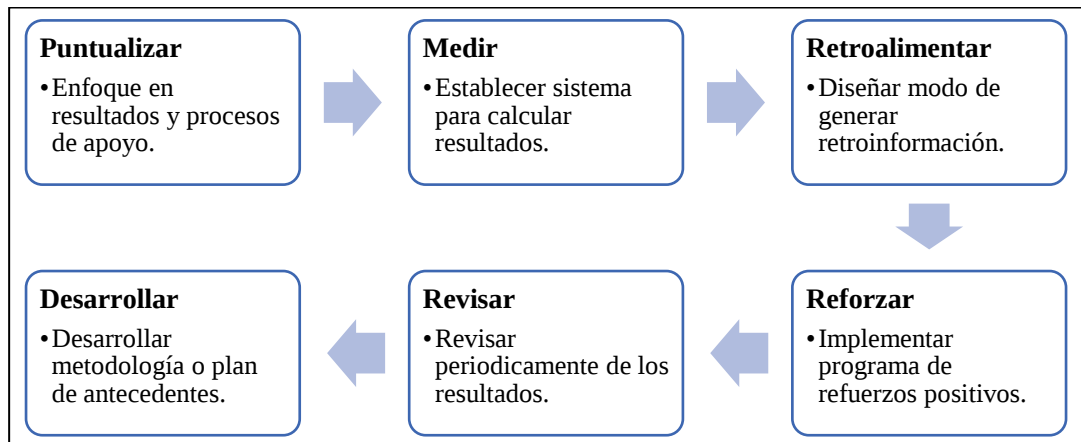


Figura 3-15. Mejoramiento del Desempeño
(Adaptado de Daniels, 1993).

A través de la evaluación del desempeño es posible identificar problemáticas de adaptación e integración de las personas en sus cargos, de desperdicio de potencialidades, de falta de interés, desmotivación, entre otras, por lo que es esencial al momento de generar políticas de Confiabilidad Humana que se ajusten a las necesidades de la organización.

Toda decisión estratégica de una compañía debe enlazarse a medidas de desempeño. Las medidas de desempeño tradicionales aplicadas al personal suelen enfocarse hacia el valor agregado, y el impacto o consecuencia de su rendimiento, basadas en indicadores claves de la operación. Los índices de desempeño más comunes en mantenimiento se presentan a continuación:

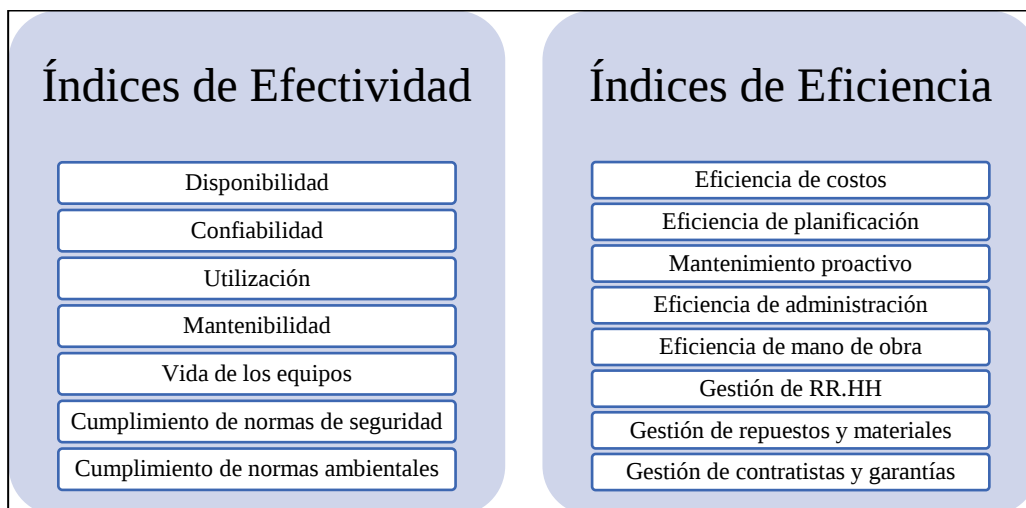


Figura 3-16. Índices de Desempeño en Mantenimiento
(Adaptado de Louit, 2012).

Cáceres (2004) destaca una metodología de medición integral del desempeño, conocida como Cuadro de Mando Integral, la cual indica que la gestión debe medirse de manera holística, y no solo con base en parámetros clásicos en mantenimiento como la disponibilidad, confiabilidad y tiempo promedio de reparación. Las perspectivas de medición que abarca esta metodología son:

- Perspectiva Dinámica-Organizacional:** se centra en la excelencia de las personas, la cultura y clima de la organización, el manejo de la información y tecnologías para apoyar los objetivos internos. En mantenimiento se miden competencias, cierre de brechas, uso de los sistemas, clima organizacional, entre otros.
- Perspectiva Interna:** se miden los procesos de trabajo que agregan valor al negocio, y sus mejoras, en búsqueda de la excelencia. En mantenimiento esto se traduce en indicadores como el tiempo de reparación, sobretiempo, procesos certificados, seguridad, y cumplimiento de programas.
- Perspectiva de Cliente y Socio:** se centra en la satisfacción de clientes, socios y la comunidad, evaluándose por ejemplo la calidad de servicios contratados, y la implantación de políticas. En específico, algunos indicadores son: disponibilidad de equipos, tasa de fallas, retrabajo, entre otros.

d) Perspectiva Financiera: se mide el rendimiento del capital, el valor agregado a la corporación, y la reducción de costos unitarios en el caso de empresas de servicios. Algunos de los indicadores de posicionamiento a nivel mundial son las tarifas de cada actividad de mantenimiento, los costos de mantenimiento por unidad de producción, y también sobre el valor de los activos.

3.4.4. Formación por Competencias

En el ámbito profesional, una Competencia corresponde a una herramienta estratégica que es indispensable para enfrentar los desafíos propios de la actividad. A su vez, un Modelo de Competencias es la estrategia que desarrolla una organización para impulsar las competencias individuales, acorde a las necesidades operativas, de modo de garantizar el crecimiento y administración del potencial intelectual global (García, s.f.).

La Formación por Competencias debe promover la identificación, adquisición, potenciación y desarrollo de conocimientos y habilidades que añadan valor a la organización, incentivando la innovación y el autoaprendizaje como medidas de adaptación ante cambios. En el escenario actual, que se caracteriza por el rol protagónico de la tecnología en los procesos industriales, la formación y experiencia resultan ser ventajas competitivas.

Es responsabilidad de las empresas ir más allá del aprendizaje técnico, y promover la formación integral de sus trabajadores, de manera de mejorar sus aptitudes, capacidades, conocimientos y destrezas, y así mejorar su autoestima, relaciones interpersonales y adaptación al entorno laboral.

Para el desarrollo de un programa de Formación por Competencias, Latino (2002) sugiere implementar un estudio de necesidades para detectar las brechas existentes, y luego traducirlas a criterios de capacitación. Una capacitación debe lograr cumplir con la necesidad percibida, y a la vez conectar con los conocimientos previos del trabajador. Además, para que sea efectivo deben brindarse oportunidades de uso repetitivo de las habilidades adquiridas en el trabajo, por lo que los supervisores

cumplen un rol fundamental en el proceso, mediante la asignación de tareas y el seguimiento del desempeño.

3.5. Métodos de Análisis de Confiabilidad Humana

3.5.1. Análisis de Confiabilidad Humana

El análisis de confiabilidad humana (HRA) corresponde a:

Una evaluación cualitativa y cuantitativa para identificar los efectos en las desviaciones de la acción humana y/o sus errores, desde el punto de vista de seguridad, calidad, efectividad (e ciencia y eficacia), con la finalidad de identificar las causas raíces físicas, humanas y organizacionales que las producen y en función de ello establecer las acciones que las eliminen o mitiguen sus consecuencias. (Leal, 2017)

Específicamente, un análisis de confiabilidad humana involucra las siguientes actividades:

- a) Identificación de potenciales errores humanos en cada etapa del modelo de procesamiento de información, que involucra una fase sensorial, una cognitiva, y una respuesta motora.
- b) Análisis de fuentes de error para definir contramedidas y mejorar la confiabilidad.
- c) Cuantificación de la confiabilidad humana, para así cuantificar la confiabilidad global del sistema, en caso de que sea apropiado.
- d) Decisiones de mejoramiento si es necesario.

Existen diferentes métodos de análisis de confiabilidad humana, la mayoría desarrollados por la industria nuclear, química y aeronáutica, con el objetivo de apoyar los estudios probabilísticos de riesgos (*Probabilistic Risk Assessment*, PRAs), ya que involucran procedimientos con elevados niveles de riesgo. Existen métodos específicos y genéricos respecto a la industria a la que se enfocan.

La mayoría de los métodos se basan en la asignación de probabilidades nominales de error humano características para una tarea (*Human Error Probabilities*, HEP), y la incorporación de factores determinantes del desempeño (*Performance Shaping*

Factors, PSFs, o *Performance Influencing Factors*, PIFs), que corresponden a características del ambiente, de la tarea y de la persona, que determinan el actuar de un individuo. De forma implícita, los PSFs consideran cuantitativamente procesos cognitivos y conductuales que modelan el desempeño de las personas.

Los diferentes Métodos de Análisis de Confiabilidad Humana se clasifican en tres generaciones consecutivas, según el avance de sus consideraciones: (IEC, 2010)

- Primera Generación: tiene origen en la década de 1960, pero con mayor desarrollo desde 1980, y hasta 1990. Trata el error humano del mismo modo que un error de componente *hardware*, considerados de carácter binario. Se asocia a cada tarea una probabilidad de falla inherente (HEP), que se ve alterada por factores determinantes del desempeño (PSFs), basados en una evaluación de las características de la tarea. Los distintos métodos se diferencian entre sí por el modo en que estiman las probabilidades, y la forma en que se incorporan los factores.
- Segunda Generación: comienzan a desarrollarse desde 1990, hasta aproximadamente el 2005. Se incorporan al análisis la evaluación del contexto y del comportamiento humano (procesos cognitivos) en la toma de decisiones, como influenciadores del sistema.
- Tercera Generación: inicia el 2005, hasta la actualidad, y en varios casos corresponde a la evolución de métodos precedentes, ya que se enfoca en las relaciones y dependencias existentes entre los factores de desempeño humano.

El desarrollo de las diferentes metodologías implica el uso de datos sobre falla humana, o la opinión de expertos. Existe una importante carencia de datos empíricos para el desarrollo y validación de los modelos HRA, por lo que recientes estudios se han centrado en generar bases de datos que robustecen y reducen la incertidumbre en las evaluaciones de confiabilidad humana; algunos ejemplos son el Repositorio y Análisis de Eventos Humanos (HERA) y el Sistema de Información de Factores Humanos (HFIS), con enfoque en la industria nuclear (Di Pascuale et al., 2013).

Respecto al uso de la opinión de expertos, se puede agregar matemáticamente el juicio individual de diferentes expertos, o se pueden generar distintos tipos de paneles de discusión en que se obtiene como resultado una sola estimación.

De modo de facilitar la comparación entre los diferentes métodos de análisis de confiabilidad humana existentes, el Departamento de Gestión Industrial de Riesgo de la Électricité de France (Galizia, A., Duval, C., Serdet, E., Weber, P., Simon, C. & Iung, B, 2015) define los siguientes criterios analíticos:

Tabla 3-1. Criterios analíticos de comparación entre métodos HRA

Criterio	Descripción	Taxonomía
Marco teórico principal	Base teórica y supuestos para modelar el comportamiento humano. La teoría cognitiva situada sugiere que el conocimiento no puede separarse del contexto social, cultura y físico.	• Conductual • Cognitivo • Cognitivo situado
Origen de la data	Distingue entre datos ya existentes en el modelo y datos provenientes de otras fuentes, tales como retroalimentación, resultados de pruebas, simulaciones, probabilidades de error nominales, etc.	• Inputs • Predefinido
Naturaleza de la data	Se refiere a la naturaleza de los datos utilizados por el método.	• Cuantitativo • Cualitativo ordinal (pueden ordenarse en una escala) • Cualitativo nominal (no tienen orden natural)
Enfoque de procesamiento	Se refiere al tratamiento para la evaluación cuantitativa en el procesamiento de datos, dependiente del tipo de datos utilizados.	• Frecuentista • Bayesiano
Objetivo de análisis	Dominio de operabilidad del método.	• Operador • Operador y equipo • Sistema
Cobertura de las PSFs	Consideraciones realizadas a través de los factores PSFs. En el caso del humano abarca características personales y capacidades de trabajo; para la tarea considera procedimientos y características de la tarea requeridas para el operador; en el caso del sistema considera tecnologías y características físicas de la planta; y para la ambiente abarca factores organizacionales, de equipo y ambiente físico.	• Humano • Tarea • Sistema • Ambiente

(Adaptado de Galizia et al., 2015).

A continuación, se presentan los principales métodos de cada generación, en base a la información presentada por la International Electrotechnical Commission (2010), Galizia et al. (2015), Di Pascuale et al. (2013), Abrishami, Khakzad, y Mahmoud (2020a).

3.5.2. Métodos de Primera Generación

Esta macro categoría incluye 35 a 40 métodos de HRA, muchos de los cuales corresponden a variaciones de un mismo método. Se configuran bajo el supuesto de que los humanos fallan por deficiencias naturales, tal como lo hacen los componentes eléctricos o mecánicos, y tienen la siguiente base teórica:

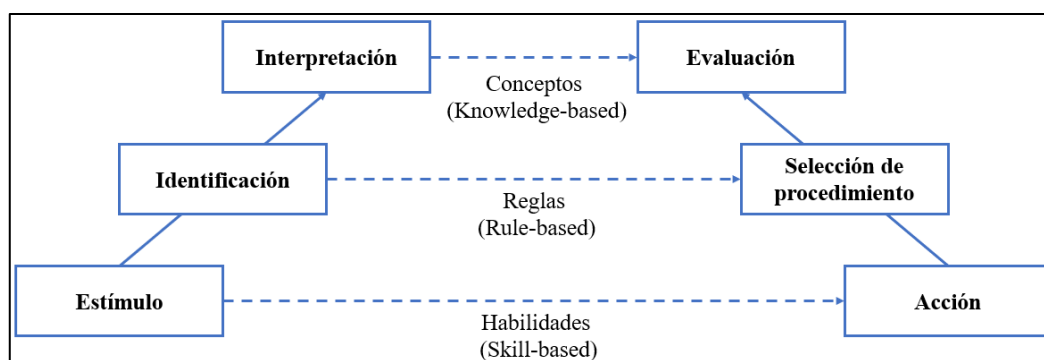


Figura 3-17. Modelo SKR de Rasmussen
(Adaptado de Di Pascuale et al., 2013)

Los modelos más representativos de la primera generación se presentan en la siguiente tabla, y se detallan a continuación de ella, sin embargo, existen otros adicionales como lo son: SHARP (Systematic Human Action Reliability Procedure) (Electrical Power Research Institute, 1992); ASEP (Accident Sequence Evaluation Program) (Swain, 1987); SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) (Embrey, 1996); FMEA/FMECA (Failure Modes and Effects Analysis) (Palady, 1995); APJ (Absolute Probability Judgement) (Kosmowski, Degen, Mertens & Reer, 1994); JHEDI (Justified Human Error Data Information) (Kirwan, 1997).

Tabla 3-2. Comparativa métodos de primera generación.

Método	Año	Base teórica	Origen y naturaleza data	Enfoque procesamiento	Objetivo análisis	Cobertura PSFs
THERP	1983	Conductual	Empíricos (curvas y tablas) y juicio de expertos; Cuantitativo	Frecuentista	Operador	Humano - Tarea
SLIM	1984	Conductual	Coeeficientes PSFs; Cuantitativo	Bayesiano	Operador	Humano - Tarea
HCR	1984	Cognitivo	Curvas; Cuantitativo	Frecuentista	Operador	Humano - Tarea
HEART	1988	Cognitivo	Tablas; Cuantitativo	Frecuentista	Operador y equipo	Humano - Tarea

(Adaptado de Galizia et al., 2015).

THERP (Technique for Human Error Rate Prediction)

Su estudio comenzó en 1961 para la gestión de riesgos en la industria nuclear de Estados Unidos, y hoy corresponde al método estándar de confiabilidad humana respecto a temas ergonómicos. Permite evaluar a profundidad el desempeño en una tarea, calculando la probabilidad de realizarla con éxito, y provee requerimientos ergonómicos detallados para el diseño del sistema. Se utiliza especialmente en sistemas cuya confiabilidad se basa en acciones críticas, pero no es adecuado para evaluar la toma de decisiones o para considerar un amplio rango de condiciones de contexto.

Genera una profunda descomposición de las tareas en elementos de error, usando la taxonomía THERP, y representándolos gráficamente en un árbol de eventos, lo que permite modelar su dependencia. Se asignan probabilidades nominales (HEP) a cada uno, tomando valores de una base de datos construida con datos empíricos y el juicio de expertos. Luego, se complementan las probabilidades con multiplicadores asociados a los FSPs que correspondan.

Los creadores, Swain y Guttman, crearon un manual para su uso, el cual contiene 27 tablas de probabilidades con valores establecidos de acuerdo a juicios de

expertos, para factores como el ambiente de trabajo, experiencia, motivación y tensiones en el equipo.

Más información disponible en Guttman & Swain (1983).

SLIM (Success Likelihood Index Methodology)

Permite la evaluación cualitativa y cuantitativa del desempeño en una tarea con un enfoque de diagnóstico detallado. Nace en la industria nuclear, pero se utiliza en caso de requerir un método flexible, sin la disponibilidad de datos específicos.

Para cada tarea expertos identifican PSFs relevantes, y su peso o factor ponderador en el error humano. Luego, los expertos le asignan a cada factor un puntaje en la escala de 1 a 9, donde 1 representa la peor condición del factor y el 9 la mejor. Considerando lo anterior, se calcula el índice de probabilidad de éxito (*Success Likelihood Index*, SLI) tomando como base la suma global ponderada de estos valores, para luego transformarlo a una probabilidad de error humano aplicando al menos dos HEPs referenciales.

El requisito es contar con HEPs referenciales probados, y la disponibilidad de PSFs relevantes que sean evaluables. La determinación de HEPs referenciales suele ser problemática, y predetermina los resultados que se pueden lograr. No se consideran las interdependencias de PSFs, por lo que los resultados sólo pueden utilizarse para un diagnóstico.

Más información disponible en Embrey, Humphreys, Rosa, Kirwan & Rea (1984).

HCR/ORE (Human Cognitive Reliability Model / Operator Reliability Experiments)

Este método, desarrollado por Hannaman, Spurgin y Lukic, permite la evaluación del desempeño en la tarea según el tiempo disponible, con aspectos ergonómicos de forma limitada.

Según HCR el resultado de la ejecución de una tarea, sea éxito o falla, depende del tiempo disponible para realizarla, por lo tanto, la probabilidad de error (HEP)

corresponde a la fracción del tiempo requerido para diagnóstico y el tiempo disponible de respuesta.

Su origen se basa en experimentos de confiabilidad del operador (ORE). Para las tareas descritas en los procedimientos, se distinguen fallas asociadas y no asociadas al tiempo. Luego, existen seis curvas HEP de tiempo disponibles, según el sistema y la dinámica de la falla, normalizadas respecto al requisito medio de tiempo (mediana). La cuantificación de probabilidad HEP asociada a PSFs para fallas no asociadas al tiempo se realiza considerando 8 mecanismos de error establecidos. Del mismo modo, se establecen las directrices para un modelo de PSFs como árbol de decisión. Las tareas que no se describen en los procedimientos utilizan un método rápido de evaluación de HEP.

El enfoque original de HCR distinguía comportamientos basados en habilidades, reglas y conocimientos, pero se demostró que no es válido para el actuar de los humanos. La versión actual requiere experimentos de simulación antes de dar validez a las evaluaciones, por lo que los esfuerzos requeridos limitan el uso del modelo a salas de control nuclear.

Más información disponible en Hannaman, Spourgin y Lukic (1985).

HEART/CARA (Human Error Assessment and Reduction Technique)

HEART permite evaluar el desempeño en una actividad con un enfoque de diagnóstico detallado. Está destinado a tareas genéricas de sistemas, más que para acciones específicas. El método HEART se desarrolló para tareas genéricas en la gestión del tráfico aéreo, bajo el nombre de CARA.

En la evaluación, se selecciona un valor nominal de HEP mediante la comparación de la tarea con una lista de 8 acciones genéricas con probabilidades de error definidas. Luego, el valor es modificado usando PSFs seleccionados de una lista de 38 factores, varios basados en estudios empíricos. La desventaja del modelo es que su calibración es insuficiente.

Su manejo es fácil y rápido, sin embargo, no es adecuado para estimar la confiabilidad humana de acciones que requieren una alta precisión en la evaluación,

o altos resultados de confiabilidad, por ejemplo, aquellas que derivan inmediatamente en efectos adversos en el sistema. De todos modos, el método HEART deja al descubierto debilidades ocultas detrás de cada tarea, y propone procesos de mejora que abarcan reducción de errores o medidas de compensación asociadas a su ocurrencia.

Más información disponible en Williams (1992).

Limitaciones de la Primera Generación

Esta generación se concentra en cuantificar el error humano, en términos de éxito o fracaso de la acción, con menor atención en la profundidad de las causas y razones. Esto desencadena una de las principales críticas, ya que se estudia de forma externa el comportamiento y error humano, ignorando las causas y mecanismos cognitivos implicados. Si bien el modelo SKR describiría la lógica cognitiva del desempeño, la literatura indica que el modelo no cuenta con un adecuado realismo humano y psicológico. Adicionalmente, se le critica no considerar aspectos del contexto, los errores por comisión, y por no usar métodos adecuados al incluir el juicio de expertos. En la práctica, lo anterior se mitiga definiendo probabilidades HEP más altas, y con mayores límites de incertidumbre.

Galizia et al. (2015) identifican que gran parte de los modelos presentados tienen una limitación en el modelamiento y cuantificación del rendimiento humano bajo diversas condiciones, atribuible, en parte, a la falta de una adecuada base teórica que guíe el análisis de las actividades cognitivas. Estudios empíricos demuestran que las deficiencias en los modelos teóricos impactan la capacidad de caracterizar adecuadamente las tareas y los PSFs asociados, limitando la comprensión operativa del procesamiento de información que llevan a cabo las personas, lo cual afecta en el cálculo de las probabilidades HEP. A pesar de la incorporación de factores modeladores del desempeño en el cálculo de las probabilidades, la mayoría de los métodos no parecen cubrir una amplia gama de factores que abarque todas las circunstancias. Además, la existencia de varios métodos genera inconsistencias entre los PSFs considerados más relevantes en el cálculo de las probabilidades.

Ekanem, Mosleh y Shen (2016) resumen las limitantes de los métodos de primera generación, en cuanto a la identificación de errores y la cuantificación de la probabilidad de error, en los siguientes puntos:

- Los métodos carecen de procedimientos para identificar los errores por comisión, que pueden ser significativamente más riesgosos que los por omisión.
- Los métodos no proveen una base convincente de probabilidades de error, y no hay fundamentos teóricos que respalden los procedimientos cuantitativos. La limitada data experimental utilizada por algunos métodos es insuficiente para dar resultados confiables estadísticamente.
- Los métodos no proporcionan una imagen causal del error del operador. El supuesto básico de los métodos cuantitativos en primera generación es que el error puede ser estimado usando alguna función implícita o explícita que asocia un grupo de PSFs con probabilidades de error.
- Los métodos están insuficientemente estructurados para evitar una importante variabilidad entre los resultados de diferentes analistas que lo apliquen.

3.5.3. Métodos de Segunda Generación

Los métodos de segunda generación, a diferencia de los anteriores, proporcionan una guía de posibles patrones de decisión seguidos por el operador, incluyen modelos de procesos mentales de psicología cognitiva adecuados, extienden la clasificación de errores, reconocen la importancia del “error cognitivo” (fracaso de una actividad predominantemente de naturaleza cognitiva y/o causa inferida de una actividad que falla), y consideran aspectos dinámicos de la interacción humano-máquina, entendiendo interrelaciones entre PSFs. Esta evolución ha permitido que se utilicen métodos de segunda generación para el desarrollo de simuladores de desempeño del operador, sin embargo, está estrechamente ligada con un abandono del desarrollo cuantitativo de los modelos, que caracterizaba a la primera generación.

Los modelos cognitivos más utilizados se basan en las siguientes teorías:

- S.O.R. Paradigm (*stimulus-organism-response*): la respuesta es función de cómo el estímulo actúa en el organismo que la genera.
- El hombre como sistema de procesamiento de información (IPS): los procesos mentales son procedimientos estrictamente especificados, y los estados mentales se definen por relaciones causales con otros estados y entradas sensoriales.
- Cognitive Viewpoint: cognición se considera más activa que reactiva, definida como un procesos cíclico y no secuencial.

Los modelos más representativos de la segunda generación se presentan en la siguiente tabla, y se detallan a continuación de ella, sin embargo, existen otros adicionales como lo son: CAHR (Connectionism Assessment of Human Reliability) (CAHR website <http://www.cahr.de/tools/CAHR.htm>).

Tabla 3-3. Comparativa métodos de segunda generación

Método	Año	Base teórica	Origen y naturaleza data	Enfoque procesamiento	Objetivo análisis	Cobertura PSFs
CREAM	1994	Cognitivo	Tablas HEP nominales; Cuantitativo	Frecuentista	Operador y equipo	Humano – Tarea - Sistema
ATHEANA	1996	Conductual y cognitivo	HEP nominales; Cuantitativo y cualitativo	Frecuentista	Sistema	Humano – Tarea – Sistema – Ambiente
MERMOS	1998	Cognitivo situado	Inputs de simulaciones y escala para obtener juicio de expertos; Cualitativo ordinal	Bayesiano	Sistema	/
SPAR-H	1999	Cognitivo	HEP nominal; Cuantitativo	Frecuentista	Sistema	Humano - Tarea

(Adaptado de Galizia et al., 2015).

CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method)

Desarrollado por Erik Hollnagel en 1993, es el método de segunda generación más utilizado, ya que permite un análisis cualitativo de la influencia del contexto en el comportamiento humano y toma de decisiones, con una cuantificación aproximada. Su uso se enfoca en evaluaciones rápidas del contexto en el desempeño humano de tareas específicas, y el detalle de sus resultados se encuentra en un nivel de

detección, es decir, no alcanzan mayor profundidad. Existen dos versiones de la técnica, la básica y la extendida, cuyo factor común es la habilidad de identificar la importancia del desempeño humano en un contexto dado, y el modelo cognitivo que puede ser utilizado en análisis retrospectivos (cuantificación de errores) y prospectivos (identificación de errores).

Su enfoque se diferencia de otros métodos por la teoría cognitiva incluida a través de cuatro modos de control humano (*Contextual Control Modes*), que identifican diferentes niveles de control que tiene un operador en una tarea, según el escenario y las condiciones características, determinando el nivel de confiabilidad esperable, lo cual se traduce en intervalos de HEP. Los modos de control son: perturbado ($0.1 < \text{HEP} < 1.0$), oportunista ($0.01 < \text{HEP} < 0.5$), táctico ($0.001 < \text{HEP} < 0.1$) y estratégico ($5.0 \text{ E-}06 < \text{HEP} < 0.01$, mayor grado de control).

El escenario de la tarea se describe mediante las nueve condiciones de desempeño comunes (*Common Performance Conditions*, CPCs) o PSFs. Cada factor tiene un número determinado de estados, y sus efectos asociados. Para reflejar el efecto de los factores en el error humano, se utilizan tablas que contienen las relaciones establecidas.

Más información disponible en Hollnagel (1993; 1998).

ATHEANA (A Technique for Human Error Analysis)

Método que mediante un análisis del contexto y de la toma de decisiones (proceso cognitivo) permite conocer detalladamente el potencial de tener decisiones humanas erróneas, con resultados semicuantitativos. Brinda un robusto marco psicológico para identificar y evaluar los PSFs, incluyendo factores ambientales y organizacionales. En cuanto a su uso, es recurrente en estudios del campo nuclear. Puede utilizarse prospectiva, o retrospectiva en el análisis de errores posteriores a accidentes producidos por el contexto, permitiendo representar situaciones complejas en una estructura estandarizada que facilita su comprensión.

En base a escenarios de accidentes, el método identifica eventos de falla o errores caracterizados por ser actos inseguros, es decir acciones u omisiones que resultan

en una degradación en el rendimiento del sistema, y por contextos que fuerzan el error (EFC), que incluye los PSFs y las condiciones facilitadoras de error del sistema. Por lo tanto, las probabilidades de error se cuantifican sumando las probabilidades de EFCs, la probabilidad de un acto inseguro dado el EFC, y la probabilidad de un EFC dado un acto inseguro previo.

La mayor ventaja de ATHEANA es que provee un entendimiento robusto y holístico del contexto relativo al factor humano que causó un accidente, y que considera un amplio rango de PSFs, los cuales no son estrictamente tratados como independientes. Por otro lado, el método es dificultoso, requiere de un gran equipo, y no se encuentra suficientemente descrito como para asegurar resultados similares en diferentes equipos.

Más información en Cooper et al. (1996); Forester, Kolaczowski, Cooper, Bley & Lois (2007); US Nuclear Regulatory Commission (2000).

MERMOS (Method for the evaluation of the realization of an operator's mission regarding safety)

MERMOS (Méthode d'Evaluation de la Réalisation des Missions Opérateur pour la Sûreté) permite un análisis cualitativo de la influencia del contexto en el comportamiento humano y la toma de decisiones. Su uso es extensivo en la industria nuclear francesa, siendo validado y obteniendo la aprobación reglamentaria.

A diferencia de otros métodos, este evita el término “error humano” y distinguen misiones, que corresponden a conjuntos de tareas por realizar para recuperar o mitigar un accidente. Los mecanismos se establecen según el modo en que se coordina la misión, y los resultados probables de ello. Múltiples patrones de falla que derivan en la falla de la misión se identifican utilizando un proceso estructurado que considera una estrategia, una acción y un diagnóstico (*Strategy-Action-Diagnostic*, SAD), incluido en el Sistema de Operaciones de Emergencia (EOS).

Más información en Bieder, Le-Bot, Desmares, Bonnet & Cara (1998).

SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk)

El método desarrollado por la U.S. Nuclear Regulatory Commission, permite dirigir de forma limitada ámbitos de la primera y segunda generación, en un nivel de detección, por lo que no necesariamente será preferido ante otros modelos más sofisticados y detallados en situaciones que requieren un análisis detallado del desempeño humano. El modelo de procesamiento de información utilizado por el modelo es una representación de la percepción y elementos perceptivos, cuyos principales componentes se presentan en la siguiente figura.

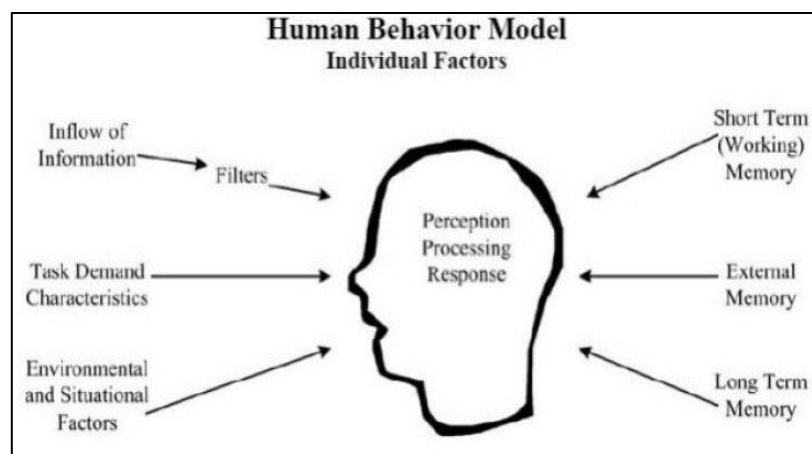


Figura 3-18. Modelo de comportamiento humano en SPAR-H.
(Di Pascuale et al., 2013)

En la práctica, el modelo consta de una primera etapa de identificación, por parte de analistas, que distinguen dos tipos de tareas, diagnóstico y acción, a las cuales asignan HEPs nominales de 0.001 y 0.0001 respectivamente. Luego, estos valores son modificados en base a 8 factores predefinidos que caracterizan el contexto, y su dependencia. Matemáticamente la relación se establece con los PSFs como multiplicadores de la probabilidad nominal; si el efecto es positivo el múltiplo es menor a 1 y por lo tanto la probabilidad nominal disminuye, si el efecto es negativo ocurre lo contrario.

Más información en Gertman, Blackman, Marble, Byers & Smith (2005).

Limitaciones de la Segunda Generación

La segunda generación de modelos HRA aún carece de suficiente respaldo teórico y experimental, por ejemplo, en cuanto a un modelo de PSFs que considere una amplia gama de circunstancias y relaciones de interdependencia. Respecto a la cuantificación, aún deben mejorarse las funciones que relacionan los PSFs con las probabilidades, ya que esta generación se concentra más en aspectos cualitativos que cuantitativos. Modelos como ATHEANA y MERMOS, con un enfoque hacia la identificación de los mecanismos de falla, permiten generar análisis cualitativos mucho más completos que aquellos métodos basados en PSFs (SPAR-H y CREAM), sin embargo, lo anterior no asegura un cálculo más exacto de las probabilidades de error humano, ya que la mayoría de los métodos no cuenta con una adecuada guía para traducir la información cualitativa en entradas para cuantificar HEPs.

Por otro lado, aún existe una importante dependencia del juicio de expertos para el cálculo de las probabilidades de error humano, por lo que la subjetividad dificulta la coherencia de los métodos.

La variabilidad de los equipos de trabajo es una problemática que deben manejar los modelos de HRA, sin embargo, métodos simples (SPAR-H) trabajan con el desempeño de equipos “promedio”, y los más complejos (ATHEANA y MERMOS) manejan con una variabilidad que no alcanza a captar la infinidad de combinaciones de equipos y circunstancias posibles.

Ekanem, Mosleh y Shen (2016) resumen las limitantes de los métodos de segunda generación en los siguientes puntos:

- Falta de base teórica y experimental para elementos clave y supuestos fundamentales de muchos de los métodos.
- Falta de un modelo causal que vincule la respuesta del operador con los factores determinantes del desempeño u otra caracterización del contexto.

- La mayoría de los enfoques propuestos aún son muy simples, y en varios casos, se plantean funciones implícitas, que vinculan los PSFs con las probabilidades, sin una base teórica o empírica.
- En varios casos, los números son resultados de la opinión de expertos, del uso de escalas subjetivas, y del uso de probabilidades referenciales infundadas.

3.5.4. Métodos de Tercera Generación

Las limitaciones de los métodos de primera y segunda generación condujeron a nuevos desarrollos relacionados con la mejora de métodos preexistentes. En esta línea, aparece en 2005 el método **NARA (Nuclear Action Reliability Assessment)**, como una versión avanzada del método HEART para la industria nuclear, desarrollada por expertos para la compañía privada British Energy. Más información en Kirwan et al. (2005).

Las Redes Bayesianas (2005) se introducen en esta generación como un importante desarrollo para los modelos HRA, considerado por Groth, Smith y Swiler (2014) como un relevante campo de estudio en la búsqueda de explotar las características y propiedades de los modelos existentes, ya que permite combinar supuestos de probabilidad de error humano basados en opiniones expertas, con los datos de desempeño humano disponibles, reduciendo la subjetividad de los métodos convencionales. Una de sus mayores ventajas es que considera las probabilidades condicionales del error humano respecto a los factores, y con ello las relaciones de dependencia. La complejidad de su implementación matemática potencia el desarrollo de aplicaciones computacionales para gestionar la confiabilidad humana en diferentes industrias, y de proyectos de simulación para generar datos que respalden el método.

Otro de los desarrollos más relevantes corresponde a los métodos de Dinámica de la Confiabilidad, en los cuales, mediante simulación cognitiva y modelación, se puede abordar la naturaleza dinámica del desempeño de los humanos de un modo que no lo hacen la mayoría de los métodos de HRA. La simulación cognitiva consiste en la

reproducción de un modelo cognitivo utilizando aplicación numérica y/o computacional. Las herramientas de simulación y modelación pueden ser utilizadas de tres formas para capturar y generar data relevante en los HRA:

- Outputs* de simulaciones pueden ser analizados por expertos, y utilizados para informar una estimación de la probabilidad de error humano.
- Se puede utilizar simulación para producir estimaciones de PSF, que se pueden cuantificar para producir probabilidades de error humano (HEP).
- Se pueden establecer criterios de desempeño específicos mediante los cuales los operadores en la simulación pueden fallar o acertar, en determinadas tareas. A través de iteraciones de la tarea que exploran sistemáticamente el rango de la actuación humana, es posible llegar a una frecuencia de fracaso (o éxito). Este número puede usarse como una aproximación frecuentista de un HEP.

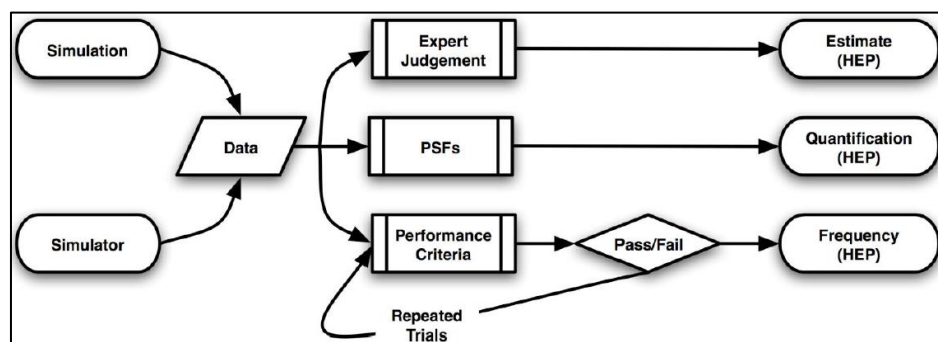


Figura 3-19. Simulación en HRA.
(Di Pascuale et al., 2013)

Reconociéndose la relevancia de incorporar dinamismo a la confiabilidad humana, se han comenzado a desarrollar nuevos métodos y a modificar los existentes, de modo de considerar la progresión dinámica del comportamiento que conduce a las fallas. Aún no existe una herramienta que combine perfectamente todos los elementos básicos de una simulación HRA, sin perjuicio de que existen significativos trabajos en progreso, como el simulador PROCOS, desarrollado por

Trucco y Leva en 2006, o el sistema IDAC, que combina una un simulador de planta realista con un sistema de simulación cognitiva capaz de modelar PSFs.

PROCOS es un simulador cognitivo probabilístico para estudios de confiabilidad humana, desarrollado para apoyar el análisis en contextos operativos complejos. El modelo de simulación consta de dos diagramas de flujo cognitivo, que reproducen el comportamiento de un operador de procesos industriales. El objetivo es integrar las capacidades de cuantificación de los métodos de HRA con una evaluación cognitiva del operador.

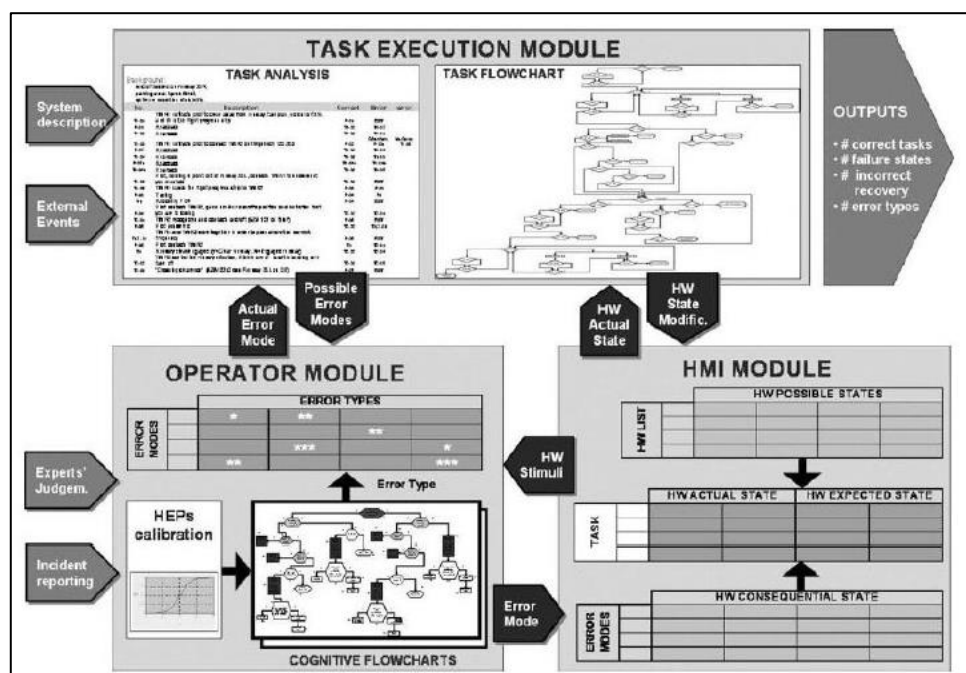


Figura 3-20. Simulador PROCOS.
(Di Pascuale, 2013)

El modelo IDAC, por otro lado, es un modelo de comportamiento del individuo, desarrollado en base a hallazgos de la psicología cognitiva, la ciencia del comportamiento, la neurociencia, los factores humanos, observaciones, y varios enfoques de HRA de primera y segunda generación. Para modelar el proceso cognitivo, IDAC combina las dimensiones racional y emocional, a través de un número limitado de reglas genéricas de comportamiento que gobiernan y restringen

las respuestas dinámicas del operador, reguladas en gran medida mediante formación, procedimientos, tareas estandarizadas, y disciplina profesional. De este modo se reduce la complejidad del problema, respecto a la situación realista, pero de todos modos se cubren diversas fases de la respuesta dinámica del operador, incluyendo evaluación de situaciones, diagnóstico, y acciones efectuadas ante situaciones anormales.

La estructura IDAC se compone de modelos de procesamiento de información (I), resolución de problemas y toma de decisiones (D), y ejecución de acciones (A). Dada cierta información recibida, el equipo genera una respuesta probabilística, vinculando el contexto a la acción a través de cadenas causales explícitas. Debido a la variedad, cantidad y detalles de la información de entrada, así como a la complejidad de aplicar sus reglas internas, el modelo IDAC solo puede implementarse actualmente a través de una simulación computacional para casos específicos. Más información del modelo IDAC en Chang & Mosle (2007).

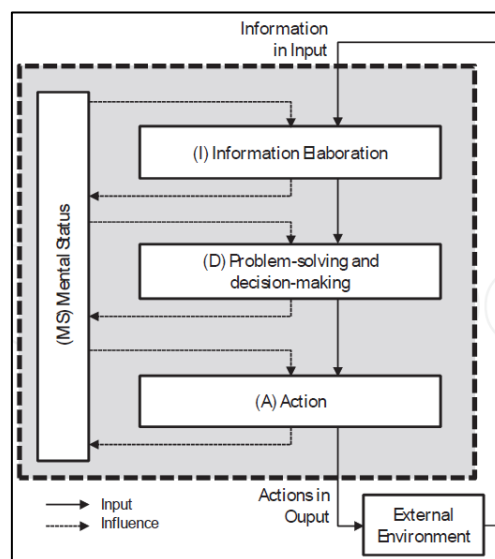


Figura 3-21. Flujo cognitivo en modelo IDAC.
(Di Pascuale, 2013)

4. DIAGNÓSTICO: CAPITAL HUMANO EN EL MANTENIMIENTO MINERO

A continuación, se presenta un diagnóstico sobre el estado actual del capital humano en la función de mantenimiento de la industria minera, y sus estrategias desarrollo, basado en documentos oficiales de entidades asociadas a la industria minera, presentaciones realizadas en conferencias¹ y entrevistas directas con profesionales².

La información recopilada se estructura en cuatro categorías principales: una caracterización del mantenimiento en minería, sus tendencias actuales, principales problemáticas asociadas al capital humano, y la oportunidad de desarrollo identificada.

4.1. Caracterización del Mantenimiento Minero

La cadena de valor en minería cuenta con una serie de procesos que implican el uso de equipos con requerimiento de mantención. Los principales procesos y equipos asociados se presentan a continuación.

Tabla 4-1. Principales procesos y equipos en mantenimiento minero.

Proceso	Equipos
Exploración y sondaje	• Perforadora diamantina • Perforadora con aire reverso
Extracción rajo	• Perforadora • Pala hidráulica • Camión alto tonelaje • Tractor neumático/oruga • Excavadora hidráulica • Camión aljibe • Motoniveladora • Cargador frontal

¹ Congreso Internacional de Mantenimiento Minero Mapla Mantemin 2018-2019 (Gecamin); Seminario Internacional en Gestión del Capital Humano en Minería HR Mining 2016 y 2018 (Gecamin).

² Vladimir Fierro (Ingeniero Senior Experto en Mantenimiento de Antofagasta Minerals); Cristian Gárate (Director en Moddos Consultorías Organizacionales, Consultor Senior en RRHH con experiencia en proyectos de la industria minera); Jaime Neyra (Consultor en Bluefield, con amplia experiencia en la industria minera); Juan Quispe (Gerente Corporativo de Mantenimiento en Antofagasta Minerals); Eduardo Salamanca (Director en SHENRE, empresa dedicada a la ingeniería de mantenimiento, con amplia experiencia en la industria minera y tópicos de confiabilidad humana); Macarena Tapia (Consultora en Symnetics, con proyectos en el área de gestión del mantenimiento).

Extracción subterránea	• LHD (cargador de transporte y descarga) • Jumbo (equipo perforador)
Procesamiento de óxidos	• Apilador • Roto pala • Tambor aglomerador • Celdas electrolíticas • Puente grúa • Máquina despegadora de cátodos
Procesamiento de sulfuros	• Chancadores • Correa Overland • Molinos • Celdas de flotación • Hidrociclones • Espesadores • Estaciones de bombeo • Filtros de presión • Planta de osmosis • Planta de tratamiento de aguas
Fundición y refinación electrolítica	• Secador • Tolvas • Hornos • Puente grúa • Máquina cortadora de asas • Máquina preparadora de cátodos • Máquina preparadora de ánodos • Máquina lavadora de scrap/cátodos • Unidades de filtrado a presión

(Adaptado de Consejo de Competencias Mineras, 2017)

El Consejo de Competencias Mineras (2017) divide las actividades de mantenimiento minero en dos categorías: mecánico, de ensayos o predictivo; y eléctrico e instrumentista. Las competencias más representativas del mantenimiento mecánico son la mantención de sistemas de lubricación, de motores diésel, y el diagnóstico y reemplazo de bombas de desplazamiento positivo. En el caso del mantenimiento eléctrico-instrumentista, las competencias más representativas son canalizar y cablear líneas de media tensión, el mantenimiento de motores y generadores eléctricos, de tableros de distribución, de dispositivos de instrumentación de campo, y de sistemas de control.

El mantenimiento mecánico, a su vez, se divide en dos ámbitos de especialización: mina y planta. El relativo a la mina aborda la mantención de equipos, habitualmente móviles, que realizan labores de perforación, carguío, transporte y habilitación de zonas de trabajo. El mantenimiento de planta, por otro lado, aborda instalaciones, dispositivos y equipos fijos asociados al procesamiento de minerales.

En la práctica, el proceso de mantenimiento se traduce en las siguientes actividades, y los respectivos perfiles profesionales implicados.

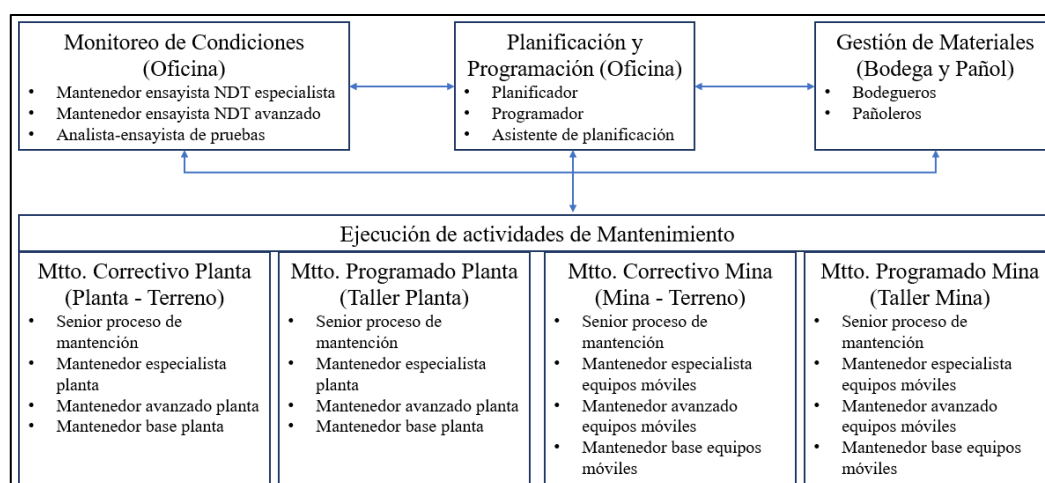


Figura 4-1. Actividades y perfiles en mantenimiento minero
(Adaptado de CCM, 2017)

Un desglose de la distribución de trabajadores por estamento, realizado por el Consejo de Competencias Mineras (2019) indica que el 27% de los trabajadores de empresas mineras, y el 57% de empresas proveedoras, corresponden a mantenedores; este estamento no considera los supervisores y profesionales del área. Entre los mantenedores, el porcentaje de personas que cuenta con educación superior es de 43% en el caso de las empresas mineras y 68% para proveedoras. Respecto a la participación femenina, en el estamento de mantenedores un 1,7% corresponde a mujeres en empresas mineras, y un 0,4% en el caso de empresas proveedoras.

A continuación, se presenta una tabla resumen de la información del factor humano, en los distintos perfiles de mantenimiento, para una ventana de tiempo proyectada entre los años 2019 y 2028.

Tabla 4-2. Resumen personal de mantenimiento.

Perfil	Dotación 2019	Participación femenina 2019	Promedio de edad 2019	Sobre oferta o brecha al 2028
Profesional de mtto.	1.094	7%	43	-460
Ingeniero especialista en mtto.	2.683	9%	41	-125
Supervisor de mtto.	2.509	4%	45	-1.075
Mantenedor mecánico	14.517	2%	40	-6.437
Mantenedor eléctrico	4.353	4%	40	-843

(Adaptado de Consejo de Competencias Mineras, 2019).

Los indicadores de desempeño más utilizados para el proceso de mantenimiento en minería son: tiempo medio entre fallas (MTBF, *Mean Time Between Failures*), tiempo medio para reparar (MTTR, *Mean Time To Repair*), disponibilidad de los equipos, costos operacionales, frecuencia y gravedad de accidentes, y el cumplimiento de normativas medioambientales.

4.2. Tendencias Actuales

Los requerimientos de la industria minera en Chile son cada vez más exigentes, y su cumplimiento implica una gestión de activos físicos de excelencia, en constante búsqueda de alternativas y estrategias modernas e innovadoras para reducir costos y utilizar eficientemente los recursos.

A través del diagnóstico se identificaron dos principales tendencias actuales de la función de mantenimiento: la transición desde un mantenimiento correctivo a uno predictivo y proactivo, y muy ligado a lo anterior, la introducción de tecnologías que desarrollan un mantenimiento más inteligente. Adicionalmente, ha sido tendencia en los últimos años la introducción de estrategias *Lean* en la cadena de gestión de activos, con el objetivo de optimizar las operaciones y recursos existentes para alcanzar las metas de la organización.

4.2.1. Transición hacia un mantenimiento proactivo

La transición desde un mantenimiento correctivo hacia uno proactivo es de los principales objetivos de todas las organizaciones, con enfoque en la detección y corrección de las causas que originan el desgaste que puede conducir a una falla en el equipo o instalación.

Entre los beneficios de evolucionar desde un mantenimiento correctivo a uno preventivo, predictivo, y proactivo, según el nivel de madurez predominante, se encuentra la disminución de costos y la tasa de accidentabilidad, y un aumento de la productividad, la confiabilidad y la vida de los equipos. Esto constituye una ventaja competitiva para las organizaciones, sin embargo, requiere de una nueva cultura con mirada a largo plazo y metas globales que no se restrinjan a los costos de operación; este es justamente el mayor desafío, ya que no todas las empresas son capaces de generar una nueva cultura debido a la complejidad de gestionar el cambio en los procesos y el capital humano.

Una iniciativa ejemplar es la de Codelco, que, en la búsqueda de competitividad, generó su Agenda 2020 de Productividad y Costos, con un eje específico en el mantenimiento proactivo. El objetivo de este eje es “Desarrollar un mantenimiento en CODELCO que sea referente en la industria, capaz de empujar los niveles de producción de cobre comprometido a través de una óptima gestión de ciclo de vida de los activos” (Symnetics, 2018), lo cual se traduce en (Labrin & Lomuscio, 2019):

- Mejorar la *performance* del mantenimiento, aumentando los niveles de mantención preventiva y predictiva.
- Aumentar la disponibilidad de los equipos clave en los procesos de producción de cobre.
- Reducir los costos asociados al mantenimiento.



Figura 4-2. Lineamientos de Agenda 2020.
(Adaptado de Labrin & Lomuscio, 2019)

La propuesta de valor de Codelco, respecto al eje de Mantenimiento Proactivo, está en función de alcanzar los objetivos en base a indicadores de productividad (OEE), costos (presupuesto) y seguridad. Para enfrentar el cambio, se definieron las siguientes seis dimensiones estratégicas o líneas de acción, clasificadas en procesos propios del mantenimiento y habilitadoras del mantenimiento:

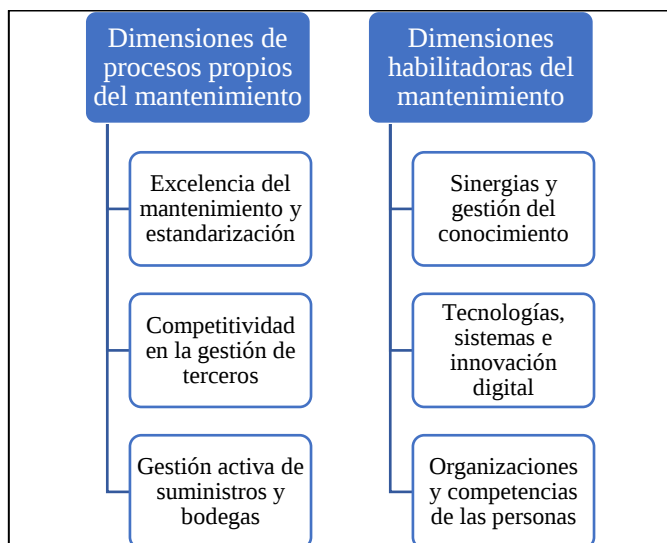


Figura 4-3 . Dimensiones estratégicas en mantenimiento proactivo.
(Adaptado de Labrin y Lomuscio, 2019)

4.2.2. Mantenimiento Inteligente 4.0

La introducción de tecnologías como Big Data, y los sistemas robotizados, es una tendencia transversal a todas las industrias y funciones, con importantes beneficios y a la vez desafíos para las organizaciones.

La gestión de Big Data implica el almacenamiento de grandes cantidades de información provenientes de sistemas y sensores en nubes de datos, el uso de algoritmos que facilitan una predicción rápida y precisa, y la generación de conocimiento que favorece a la toma de decisiones en mantenimiento. Según Estupiñan y Atibiche (2019) un Sistema de Gestión de Mantenimiento alojado en una nube permite incrementar en un 20% la productividad, y ahorrar cerca del 50% el tiempo dedicado a planificar las actividades.

La realidad aumentada, por otro lado, permite asistir al mantenedor en la ejecución de actividades, optimizando el proceso y las tareas de vigilancia. Otra innovación en el área es el monitoreo remoto, que permite el seguimiento y análisis de signos vitales de equipos críticos como chancadores, celdas de flotación y bombas, de modo de acelerar el proceso de identificación de potenciales fallas; actualmente la

operación Ministro Hales de Codelco (Calama) cuenta con un centro de operación remota desde Santiago donde, además de operar los equipos, se monitorean sus condiciones de funcionamiento, lo cual favorece a la sinergia.

Los sistemas robotizados de mantenimiento son también una tendencia incipiente, que permitiría estandarizar la calidad de la ejecución, automatizar labores de alta precisión, y reducir riesgos que afecten a la seguridad del personal. Un ejemplo de esto son las aplicaciones robóticas de la empresa MIRS (Mining & Heavy Industry Robotics), que permiten, por ejemplo, manipular tuercas de molinos SAG, o la realización telecomandada de labores de cambio de palmetas trommel, reduciendo al máximo la interacción humana en un proceso susceptible a accidentes, y reduciendo de 20-25 minutos a 3 minutos el cambio de cada palmeta.

Un estudio sobre el impacto de las nuevas tecnologías en la minería, realizado por el Consejo de Competencias Mineras (2018), muestra que al 2017 el nivel tecnológico del mantenimiento minero se encontraba en un 83% operado, 4% teleoperado, y 13% automatizado. Sin embargo, al 2022 se proyecta un 42% de operación, 10% de teleoperación, y 48% de automatización. Respecto a las diferentes categorías de mantenimiento, las que tienen mayores cambios potenciales corresponden al eléctrico e instrumentista, ya que la operación podría ser reemplazada por teleoperación y automatización en un 78% y 88% respectivamente; el mantenimiento mecánico operado solo se reduciría en un 15%. La metodología para el cálculo de estos valores contempla 77 competencias definidas en el Marco de Cualificaciones para la Minería (CCM, 2017), y proyecciones del máximo potencial de cambio validadas por expertos, en base a una propuesta inicial.

Pero como se mencionó anteriormente, un mantenimiento más inteligente implica una serie de desafíos asociados a la gestión del cambio y del conocimiento. Se debe capacitar a los profesionales, y adaptar la estructura organizacional de modo de satisfacer los nuevos requerimientos. Cabe mencionar que existe un importante desafío asociado al acercamiento e implementación de nuevas tecnologías a medianas y pequeñas empresas, ya que suelen restringirse a grandes corporaciones.

4.3. Problemáticas Asociadas al Capital Humano

Los siguientes puntos presentan las principales problemáticas del mantenimiento que pueden asociarse al desempeño del capital humano, identificadas a través de la interacción con la industria.

4.3.1. Búsqueda de Calidad de Ejecución

La calidad de ejecución de las actividades es una de las principales problemáticas en la función de mantenimiento, dependiente directamente del desempeño del capital humano. La norma ISO 9000 (2015) define calidad como el “grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos”. Una organización orientada a la calidad promueve una cultura que se refleja en comportamientos, actitudes, actividades y procesos que proporcionan valor mediante el cumplimiento de las necesidades y expectativas de los clientes, que, en este caso, corresponden a los requerimientos de equipos planificados en la operación.

La mala calidad de ejecución del mantenimiento tiene implicancias directas en la operación a nivel global, ya que reduce la disponibilidad de los equipos, afecta la planificación del mantenimiento, y aumenta el riesgo de accidentes. Según Nilo (2005), existe un falso paradigma de que el aumento de calidad genera un aumento en costos, sin embargo, experiencias a nivel mundial muestran que, por el contrario, las mejoras en calidad incrementan la productividad, reducen costos de calidad, y contribuyen a un mejor clima de trabajo, aumentando las utilidades.

Uno de los mayores desafíos en este ámbito es la parametrización y medición, ya que la calidad puede percibirse como un término holístico, pero necesariamente debe traducirse a indicadores cuantificables. En términos de KPIs estratégicos para el mantenimiento minero, una calidad mayor aumenta el MTBF y disminuye el MTTR, sin embargo, múltiples factores pueden estar influenciando los resultados. Otro modo de medir la calidad es mediante el factor que relaciona la tasa de falla antes y después de la intervención de mantenimiento.

En la búsqueda de mejorar la calidad de ejecución de las actividades, el personal juega un rol fundamental, ya que son las personas quienes se comprometen y alinean a través del entendimiento común de la política de la calidad y los resultados deseados por la organización. Del mismo modo, es muy relevante gestionar las relaciones y la comunicación entre las diferentes partes involucradas, considerando siempre el contexto de la organización.

Adicionalmente, una de las acciones que debe considerarse es el control de la calidad, o pruebas de entrega de equipos, muy utilizadas en industrias de menor escala u otras como la aeronáutica, pero muchas veces olvidadas en la minería. Esta actividad se define por la norma ISO 9000 (2015) como “Parte de la gestión de la calidad orientada al cumplimiento de los requisitos de la calidad”, y se acompaña por otras actividades relevantes para gestionar la calidad, correspondientes a: planificación de la calidad, aseguramiento de la calidad, y mejora de la calidad.

4.3.2. Integración y Alcances en la Gestión Humana

La gestión del capital humano es esencial en la industria minera, debido a la magnitud de las actividades implicadas, las condiciones en las que se llevan a cabo, y los riesgos existentes en cuanto a la seguridad del personal. Las organizaciones, a través de sus departamentos de recursos humanos, ejecutan globalmente una serie de acciones enfocadas hacia el liderazgo, formación y motivación, sin embargo, no se desarrollan planes integrados específicos para la función de mantenimiento, que se midan con un objetivo estratégico común y que cuenten con todos los alcances necesarios para su efectividad.

El desempeño de las personas es función de una serie de variables humanas que deben manejarse sistemáticamente, entre ellas la motivación, los conocimientos y las relaciones, para lo cual debe existir una comprensión de las interrelaciones y del factor antropológico asociado. Del mismo modo, lo anterior se condiciona directamente por la cultura minera, caracterizada, entre otras cosas, por su alta orientación a la seguridad, y muchas veces, dificultad para gestionar y enfrentar cambios. Es por esto, que toda herramienta para gestionar el capital humano debe

considerar en profundidad la cultura propia de la actividad, y del contexto, al momento de establecer modos de acción y resultados esperados. Un ejemplo de esto es el cálculo de los tiempos esperados para la reparación de una componente, ya que países como Canadá cuentan con productividades que no son comparables con los resultados de la cultura en Chile.

El elevado nivel de externalización de actividades dificulta el desarrollo del capital humano y la gestión de personas, ya que deben unificarse las culturas organizacionales, y por sobre todo, los objetivos con los cuales se trabaja. Debe dedicarse especial atención a la comunicación entre la empresa contratista y mandante, y extender los esfuerzos de desarrollo de capital humano a aquellos trabajadores que, desde empresas externas, apoyan al cumplimiento de las metas de la organización.

Además de la gestión del cambio, la gestión del conocimiento es también un alcance que debe abarcar la gestión humana. La función de mantenimiento se caracteriza por la estandarización de sus procedimientos, sin embargo, esto no necesariamente se alinea con las acciones por parte de los operadores de actividades, ya que la bajada de información debe considerar la comprensión en todos los niveles de la cadena de valor. Del mismo modo, las estrategias de gestión para mejorar el desempeño de las personas deben ser capaces de penetrar hasta los niveles operativos, ya que una de las principales problemáticas es que las estrategias no se concretizan más allá de los niveles de superintendencia o jefaturas de unidad.

La principal causa de lo anterior es que las estrategias desarrolladas no siempre cuentan con indicadores y resultados que hagan sentido a todos los eslabones de la cadena de valor, y es por esto que el trabajo no puede delegarse solo a recursos humanos, sino que debe ser conjunto con el área de mantenimiento, la cual cuenta con los conocimientos específicos sobre las actividades y el control de las problemáticas.

La gestión del cambio, de competencias, de conocimientos, y del desempeño, hoy se desarrollan mediante acciones específicas e independientes, sin embargo, deben

hacerse parte de la cultura de la organización de modo de garantizar resultados favorables y a largo plazo en el rendimiento de las personas durante la realización de sus actividades.

4.3.3. Consideración del Error Humano

Tal como se mencionó anteriormente, errar es propio de la naturaleza de las personas, sin embargo, en la mayoría de las organizaciones la planificación del mantenimiento no considera directamente la probabilidad de que los operadores, por diferentes motivos, no realicen de forma adecuada sus tareas. Si bien la planificación utilizando registros de desempeños históricos incorpora indirectamente la frecuencia de errores humanos, no existen mecanismos en el mantenimiento minero que asignen probabilidades a los errores asociados a diferentes causas, ni medidas que controlen adecuadamente cada una de ellas, con el objetivo de mejorar los resultados.

El error humano afecta directamente a la operación, y a la vez genera importantes riesgos para la seguridad de los trabajadores, razones por las cuales es imperante su manejo. Es común encontrar en la industria análisis de causa-raíz posteriores al hecho que derivan en responsabilidades humanas, sin embargo, pocas veces existe un desglose o categorización más detallada del origen, ni menos aún análisis predictivos respecto al comportamiento humano en el mantenimiento, a pesar de que expertos declaran que existe información que resultaría útil para este fin.

Por otro lado, y bajo la premisa de que no todos los errores son controlables, los sistemas o procesos debiesen diseñarse para absorber o evitar errores, de modo de asegurar la confiabilidad desde el origen, sin embargo, no existe conciencia y una activa cooperación entre las compañías mineras y proveedores de equipos para alcanzar este objetivo.

4.3.4. Brechas en Competencias

Una de las problemáticas más reconocidas respecto al factor humano en mantenimiento minero corresponde a las brechas de competencias técnicas y fundamentales, con causas atribuibles a diferentes factores, y consecuencias directas en el desempeño de las personas.

Los programas de formación para el personal de mantenimiento, en muchos casos, no se adecúan a los verdaderos requerimientos de competencias, y/o no cuentan con planes de evaluación y seguimiento que avalen su efectividad en el cumplimiento de los objetivos organizacionales. Esto no se condice con el alto impacto que tiene la formación del personal en la continuidad operacional y seguridad de los trabajadores, comparable con la industria aeronáutica, en la cual operadores y mantenedores cuentan con programas intensivos de capacitación previa y continua mucho más íntegros en cuanto a conocimientos adquiridos y su puesta en práctica. En este ámbito, la externalización puede ser también una problemática, ya que, al contratar personal externo para la ejecución de una actividad, la empresa minera suele desligarse de la responsabilidad de su formación, confiando en que las personas contarán con las capacidades necesarias para ejecutar sus tareas de forma confiable, productiva y con calidad. Existen compañías contratistas con centros de entrenamiento de clase mundial, sin embargo, este factor está directamente relacionado con el costo del servicio, que suele ser la variable decisiva en la administración de contratos.

Dada la importancia de este tema, tanto en mantenimiento como en otras actividades de la minería, el Consejo Minero, con la asesoría de Fundación Chile, impulsó en el 2012 el Consejo de Competencias Mineras, con el fin de proveer información, estándares y herramientas que permitan adecuar la formación de técnicos y profesionales a la demanda del mercado laboral minero, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Específicamente para el mantenimiento, el marco de cualificaciones distingue el mantenimiento mecánico y de ensayos, del eléctrico e instrumentista. Dentro de cada categoría, a su vez, se definen los procesos y

perfiles ocupacionales, con las respectivas unidades de competencias necesarias, de modo de orientar respecto a la formación base de cada uno de ellos. Adicionalmente, declaran competencias base para todas las actividades, tales como el trabajo con seguridad, la comunicación y el trabajo colaborativo, y destacan las competencias requeridas transversalmente por los instructores en la industria. (CCM, 2017)

El documento Fuerza Laboral de la Gran Minería Chilena 2019-2028 del Consejo Minero (2019), indica que el 28% de la inversión en capacitación se dedica a los mantenedores, equivalente al 29% de las horas de capacitación impartidas. La metodología mediante la cual se lleva a cabo esta formación corresponde a un 67% en sala (*off the job*), 25% en el puesto de trabajo (*on the job*), y un 8% mediante *E-learning*. Otros indicadores de la capacitación minera, a nivel general, son los siguientes.

Tabla 4-3. Indicadores de capacitación en la minería chilena.

Indicador de capacitación	Dato CCM (2019)
Horas promedio de capacitación por trabajador (Horas de capacitación / dotación)	29,9 hrs
Participación promedio por persona (Asistentes / dotación)	2,4
Índice de capacitación (Horas de capacitación / horas totales trabajadas)	1,36%
Inversión promedio por trabajador (Inversión / dotación)	\$308.609
Costo promedio por capacitación (Inversión / hora de capacitación)	\$10.902
Costo promedio por participante (Inversión por asistente)	\$183.476

(Adaptado de Consejo de Competencias Mineras, 2019).

Las principales limitantes, reportadas por las empresas, para la ejecución de las capacitaciones en la gran minería, en orden según su nivel de importancia, son: disponibilidad de asistentes, presupuesto de empresa, logística para la ejecución de las capacitaciones, oferta de cursos de capacitación, oferta de organismos de capacitación, financiamiento público, y las necesidades operacionales. (CCM, 2019)

Por otro lado, el año 2018 la Fundación Chile, y la Confederación de la Producción y el Comercio, publicaron el Marco de Cualificaciones de Mantenimiento 4.0, que presenta para múltiples industrias una guía para enfrentar la formación de los trabajadores ante los cambios impuestos por las nuevas tecnologías. Esto último valida la necesidad de alinear los programas de capacitación con los requerimientos de la industria, ya que como muestra la figura a continuación, el mantenimiento tendrá un impacto relevante, en comparación a la extracción y procesamiento, debido a la robotización, digitalización, operación remota y automatización. Cristian Gárate (2020) recalca la importancia del tema en los siguientes términos:

Hoy, de cara a la cuarta revolución industrial, el enfoque de Competencias parece cobrar más vigencia que nunca, ya que nunca se necesitó tan rápidamente entender en profundidad qué esperan las organizaciones de sus trabajadores. De cara a un mundo del trabajo en que la única certeza que tenemos a futuro es que deberemos adaptarnos y reconvertirnos constantemente, ser competente ya no sólo significará ser capaz, sino que a la vez estar vigente. (Gárate, 2020)

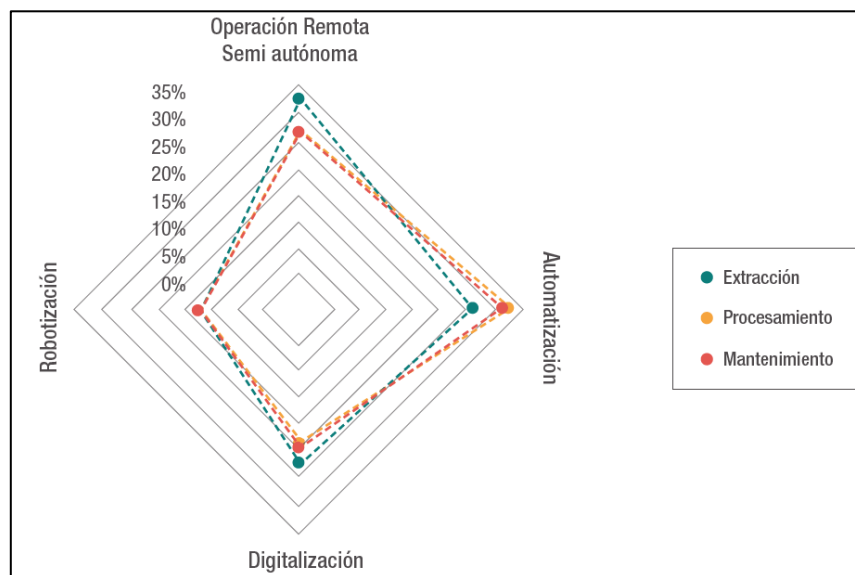


Figura 4-4. Impacto de la tecnología por proceso
(Adaptado de Consejo de Competencias Mineras, 2019).

Algunas de las prácticas destacadas en torno a la problemática de brechas en competencias técnicas, y no así utilizadas a nivel general, son los procesos de inducción a trabajadores nuevos, las acreditaciones para acelerar el proceso de contratación en casos críticos como las paradas mayores de planta, las evaluaciones prácticas en capacitaciones, los sistemas de medición de competencias y su respectiva aplicación en el planteamiento de programas de formación. Es imperativo que los criterios de calidad con que se elaboran las competencias sean complementados con la capacidad de transformarlos en una actividad formativa o instrumento de evaluación.

Es importante recalcar también la necesidad de una formación en cuanto a habilidades fundamentales como el relacionamiento, comunicación, y trabajo en equipo, en toda la cadena de valor. Si bien existe un cambio de prioridades ligado a la revolución tecnológica, las competencias transversales son y seguirán siendo muy requeridas en todas las industrias, tal como se observa en la siguiente figura del World Economic Forum, adaptada por el Consejo de Competencias Mineras (2018).

LAS 10 MEJORES HABILIDADES		
EN 2015		EN 2020
Resolución de Problemas Complejos	1	Resolución de Problemas Complejos
Coordinación con otros	2	Pensamiento Crítico
Gestión de Personas	3	Creatividad
Pensamiento Crítico	4	Gestión de Personas
Negociación	5	Coordinación con otros
Control de Calidad	6	Inteligencia Emocional
Orientación de Servicio	7	Juicio y Toma de Decisiones
Juicio y Toma de Decisiones	8	Orientación de Servicio
Escucha Activa	9	Negociación
Creatividad	10	Flexibilidad Cognitiva

Adaptado de: Future of Jobs Report, World Economic Forum |

Figura 4-5. Las 10 mejores habilidades.
(Consejo de Competencias Mineras, 2019)

4.4. Oportunidad de Desarrollo

Mediante el diagnóstico pudo detectarse un creciente interés y motivación por parte de la industria minera frente a la gestión del capital humano, como vehículo para mejorar los resultados operacionales. El mantenimiento es un área estratégica en el factor humano, ya que solo en la minería chilena emplea a más de 45 mil personas (Fundación Chile, 2018), es menos automatizable que otras actividades, y la automatización de otros campos no hace más que incrementar la dependencia de la función de mantenimiento.

El interés por asegurar la continuidad y excelencia operacional, disminuyendo los accidentes que pueden poner en riesgo a las personas, ha llevado al planteamiento

de estrategias como la Agenda 2020 de Codelco, cuyo pilar de mantenimiento proactivo cuenta con 6 ejes muy asociados al factor humano. Entre ellos destacan “Sinergias y Gestión del Conocimiento”, y “Organizaciones y Competencias de las Personas”, aunque de todos modos siguen siendo considerados como elementos habilitadores.

A pesar del gran número de acciones específicas planteadas, se evidencia la necesidad de un modelo que integre sistemáticamente todos los esfuerzos, con un objetivo común que pueda comunicarse a través de toda la cadena de valor mediante indicadores estratégicos. Considerando el marco teórico presentado, lo anterior puede plantearse como un Sistema Integrado de Confiabilidad Humana, que analice, haga seguimiento y desarrolle, los diferentes factores que puedan afectar al desempeño de las personas en la ejecución de sus actividades. Cabe mencionar que la confiabilidad humana debiese considerarse desde el diseño de los equipos, y a lo largo de toda la cadena de valor.

Industrias como la aeronáutica y nuclear son pioneras en este campo, presentándose oportunidades de modelos extrapolables según diferentes condiciones y objetivos. En el mantenimiento minero cada área cuenta con sus propias condiciones de operación, desafíos, procesos, principios de degradación, y consecuencias, los cuales deben considerarse al momento de diseñar una estrategia; el mantenimiento de equipos mina en terreno, la contaminación por polvo o sílice presente en equipos de conminución, las altas temperatura en equipos de fundición y refinería, y otros factores diferenciados son condicionantes del rendimiento.

Considerando el contexto de un mantenimiento más inteligente, HR Analytics se presenta como una potencial herramienta de apoyo, siendo un medio para cuantificar y respaldar la toma de decisiones. Según la compañía finlandesa de aprendizaje digital Valamis (s.f.), Human Resources Analytics corresponde a la recopilación y análisis de datos de recursos humanos para mejorar el desempeño de la fuerza laboral de una organización, permitiéndole enfocarse en las mejoras necesarias y la planificación de futuras iniciativas. Entre sus usos se encuentra la predicción de

abandono del personal, reclutamiento, determinación del impacto de iniciativas de capacitación y desarrollo, entre otros.

5. MODELO DE CONFIABILIDAD HUMANA PARA EL MANTENIMIENTO MINERO

5.1. Objetivo del Modelo

En directa relación con la oportunidad de desarrollo identificada, el modelo a diseñar tiene como objetivo integrar los diferentes factores que condicionan el desempeño humano en el mantenimiento de equipos mineros, de modo de comprender su influencia en la probabilidad de error humano, y su consecuencia en indicadores estratégicos. De esta forma, se espera contribuir al aumento de la confiabilidad humana, mejorando la calidad de ejecución de las actividades al gestionar sistemática e integralmente los factores desde la perspectiva de la organización. A su vez, se espera proponer un modelo que pueda alimentarse de datos empíricos, de modo de generar resultados realistas, y de demostrar el valor de recopilar y analizar información en las organizaciones.

La efectividad del modelo estará dada por su comprensión en los diferentes niveles de la cadena de valor de gestión de activos, para lo cual son necesarios resultados cuantificables basados en algún indicador estratégico tanto para la gerencia como para el mantenedor. Según la información recopilada en el diagnóstico, el MTBF es uno de los indicadores más adecuados para este objetivo, reconocido también por el Consejo de Competencias Mineras (2017) como una métrica principal del desempeño del proceso de mantenimiento.

Tomando en cuenta los datos presentados por el Consejo de Competencias Mineras (2019) sobre la dotación de mantenimiento en Chile (Tabla 4-2), el modelo estará enfocado principalmente en las labores operativas de mantenimiento mecánico, que agrupan a un 57.7% del total de trabajadores de mantenimiento.

Puede enmarcarse el modelo en las bases del mantenimiento proactivo, el cual está dirigido a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla, siendo una de estas causas la calidad del mantenimiento.

5.2. Diseño del Modelo

El diseño del modelo en cuestión implica el desarrollo inicial de un modelo cualitativo que categoriza los diferentes tipos de actividades existentes en el mantenimiento mecánico, y los múltiples factores que regulan el desempeño de las personas (*Performance Shaping Factors*, PSFs), basado en literatura sobre confiabilidad humana. Tal como Jaime Neyra indica (s.f.), un análisis cuantitativo que realmente refleje la situación de una organización debe construirse a través de una base sólida de investigación cualitativa, que incluya una predicción del desempeño de las personas con la cual contrastar resultados, un esquema robusto que permita conocer las distintas acciones humanas de acuerdo con las funciones desempeñadas, posibles fallos en la realización de tareas y sus consecuencias finales.

Luego de esto, se selecciona un modelo referencial de asociación cuantitativa entre las actividades y los factores de desempeño, considerando la influencia específica de cada factor, de modo de obtener una probabilidad total de error humano en las actividades operativas de mantenimiento mecánico en minería; para esto, se consideran modelos de confiabilidad humana existentes en otras industrias. Finalmente, se establece la relación cuantitativa entre la probabilidad total de error humano y el tiempo medio entre fallas del sistema.

5.2.1. Categorías de Actividades

Con el objetivo de generar una metodología que no se restrinja al análisis de una única actividad, el presente modelo distingue y contempla diferentes categorías de actividades de mantenimiento mecánico, según la clasificación presentada por el Consejo de Competencias Mineras (2018):

- Rutinarias: se refiere a actividades que se realizan de manera repetitiva o con mayor frecuencia, bajo procedimientos exactos (fácilmente automatizables).
 - Manuales: son actividades como producción y monitoreo de líneas de producción. Fácilmente automatizables y frecuentemente reemplazados por

máquinas (automatización). Algunos ejemplos generales son las actividades repetitivas de construcción, transporte y reparación.

- Cognitivas (mentales): actividades que están lo suficientemente bien definidas para que puedan ser llevadas a cabo por un trabajador con baja educación en un país en desarrollo. Pueden ser fácilmente reemplazadas por algoritmos y software computacional (digitalización). Algunos ejemplos generales son las actividades de escritorio como el mantenimiento de registros, ingreso de datos, y el servicio al cliente repetitivo.
- No rutinarias: son actividades que requieren para su realización cambios de ritmo de trabajo, como por ejemplo una tarea de producción especializada.
 - Manuales: actividades que demandan adaptabilidad situacional, reconocimiento visual y de idioma, y quizás interacción persona a persona. Requieren cantidades modestas de entrenamiento. Pueden ser reemplazadas por robótica avanzada y tele operación. Algunos ejemplos generales son las ocupaciones de servicio para asistir a otro, tales como conducir un camión, la limpieza de habitaciones de hotel, y la preparación de alimentos.
 - Cognitivo-analíticas (pensamiento abstracto): actividades que requieren resolución de problemas, intuición y creatividad. Son facilitadas y complementadas por computadores, sin poder ser reemplazadas por éstos. Algunos ejemplos generales son las actividades de diagnóstico, análisis y escritura, tales como pruebas de hipótesis en ámbitos de ciencia, ingeniería, derecho, medicina, diseño y marketing.
 - Cognitivo-interpersonales: además de lo anterior, estas actividades requieren la habilidad de mutar las acciones a realizar según el contexto, estableciendo, priorizando, y revisando. Requieren de habilidades de persuasión, negociación y gestión de personas. Difícilmente pueden ser reemplazadas por tecnología. Algunos ejemplos generales son las actividades de alta adaptabilidad situacional, de pensamiento analítico abstracto, y que involucran inteligencia emocional.

El informe referenciado analiza las 77 unidades de competencias laborales (UCLs) en mantenimiento, declaradas por el Marco de Cualificaciones para la Minería (CCM, 2017), concluyendo mediante la opinión de expertos que el 48% se asocia a actividades rutinarias-manuales, un 30% a rutinarias-cognitivas, un 3% a no rutinarias-manuales, y un 19% a no rutinarias-cognitivas.

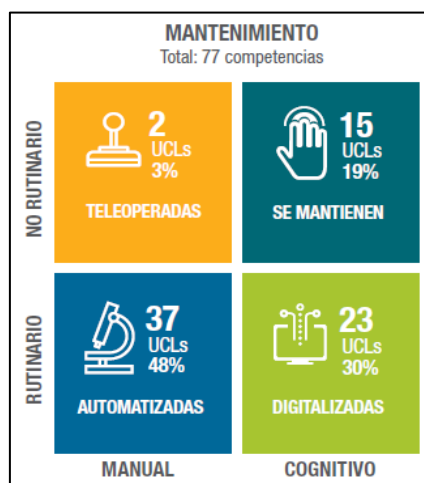


Figura 5-1. Clasificación de actividades en mantenimiento (CCM, 2018).

Específicamente para el subproceso de mantenimiento mecánico, que corresponde al enfoque del presente modelo, entre un total de 46 unidades de competencias el 63% se asocia a actividades rutinarias-manuales, un 13% a rutinarias-cognitivas, y un 24% a no rutinarias-cognitivas; no hay presencia de actividades de tipo no rutinarias-manuales en el mantenimiento mecánico. Las unidades contempladas se presentan en el Anexo A.

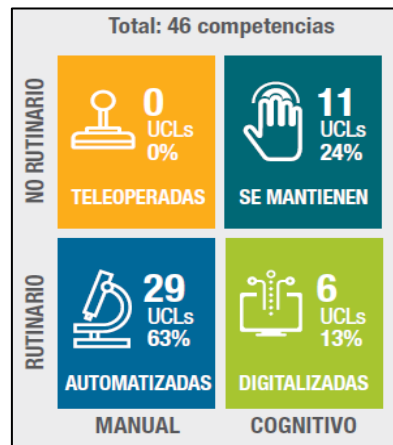


Figura 5-2. Clasificación de actividades en mantenimiento mecánico.
(CCM, 2018)

Teniendo en consideración las 3 categorías relevantes para el mantenimiento mecánico, a continuación, se asocian como referencia a los tipos de error humano presentados anteriormente. Como metodología, se asigna a cada relación un número en la escala de 1 a 3, donde 3 equivale a la probabilidad más alta de que ocurra un error de ese tipo en la categoría de actividad, y 1 a la más baja.

Tabla 5-1. Errores humanos en categorías de actividad.

Error / Actividad		Rutinarias-Manuales	Rutinarias-Cognitivas	No rutinarias-Cognitivas
Desliz ³		3	2	1
Lapso ⁴		2	3	2
Equivocación	Habilidades ⁵	2	1	3
	Reglas ⁶	1	2	3
	Conocimiento ⁷	2	2	3
Violación ⁸		2	2	2

(Fuente: Elaboración propia)

Por definición, tanto los deslices como los lapsos suelen ocurrir en actividades rutinarias, ya sea por falta de atención o pérdida de memoria, respectivamente. Sin embargo, las actividades manuales, al ser más automatizables, tienen mayor probabilidad de sufrir un error por falta de atención (desliz), mientras que en el caso de las cognitivas es más relevante la pérdida de memoria (lapso) como origen del error humano.

En cuanto a las equivocaciones, la probabilidad de cometer una en una acción no rutinaria es mayor a la de hacerlo en una rutinaria. Considerando el desglose de motivos de equivocación, aquella basada en habilidades es más probable en acciones manuales que cognitivas, mientras que la basada en reglas es más probable en

³ Desliz: el curso de acción planeado es adecuado, pero ocurre un fallo involuntario debido a falta de atención. Suele ocurrir en situaciones altamente automatizadas.

⁴ Lapsos: el curso de acción planeado es adecuado, pero ocurre un fallo involuntario debido a falta de memoria o fallo del proceso cognitivo. Suele ocurrir en situaciones altamente automatizadas.

⁵ Equivocación por habilidades: Fallo debido a un comportamiento equivocado basado en acciones inconscientes y automatizadas por naturaleza.

⁶ Equivocación por reglas: Fallo debido a un comportamiento equivocado basado en aplicación de reglas aprendidas, como políticas y procedimientos, en la toma de decisiones. Los errores ocurren cuando un individuo usa la regla incorrecta o aplica incorrectamente una buena regla.

⁷ Equivocación por conocimiento: Fallo debido a un comportamiento equivocado basado en conocimientos previamente aprendidos, por lo que implica una gran demanda mental que puede causar problemas en situaciones de emergencia. Los errores se producen por falta de formación o información.

⁸ Violación: fallo intencional o acto de sabotaje, rutinario o excepcional.

acciones cognitivas dado que involucran una toma de decisión, y la equivocación por conocimiento puede afectar tanto a las actividades manuales como a las cognitivas. Finalmente, las violaciones o negligencias pueden ocurrir en cualquier tipo de actividad, y al depender de la intención de quien la ejecuta no distingue procesos manuales o cognitivos.

5.2.2. Factores Determinantes del Desempeño (PSFs)

A continuación, se desarrolla una estructura de factores determinantes del desempeño, cuyo objetivo es incluir en el modelo las características del ambiente, de la tarea y la persona, que determinan el actuar de los individuos en las tareas de mantenimiento minero. Se espera que el resultado sea una estructura de factores comprensibles, ortogonales y medibles.

El estudio *Good Practices for Implementing Human Reliability Analysis* (NUREG-1792) de la US Nuclear Regulatory Commission (2005) identifica una lista de 15 PSFs esenciales para un análisis de confiabilidad humana genérico, de los cuales se utilizarán los primeros 14 como base cualitativa en el presente modelo, ya que el último, que corresponde a la consideración de desviaciones en secuencias de accidentes “realistas”, constituye un factor no cuantificable posteriormente. El listado es el siguiente:

- a) Formación y experiencia
- b) Procedimientos y controles administrativos
- c) Instrumentación
- d) Tiempo disponible
- e) Complejidad de la tarea
- f) Carga de trabajo, presión y/o estrés
- g) Dinámicas y características del equipo
- h) Personal y recursos disponibles
- i) Interfaz humano-sistema
- j) Ambiente
- k) Accesibilidad/operabilidad de equipos manipulados

l) Necesidad de herramientas especiales

m) Comunicaciones

n) Necesidades físicas especiales

Comparativamente, los famosos modelos de segunda generación SPAR-H y CREAM usan 8 y 9 PSFs respectivamente, aunque el cruce entre factores realizado por Boring (2010) permite dar cuenta de que son muy pocos los aspectos que no estarían siendo completamente abarcados por el listado de NUREG-1792; estos son la aptitud para el deber de SPAR-H, hora del día y adecuación a la organización de CREAM. Los diferentes métodos de HRA tienen una importante superposición de PSFs, por lo que el estudio menciona que se puede documentar una gran variedad de condiciones de rendimiento con el listado antes presentado, incluso aunque este solo toque ampliamente ciertos problemas del desempeño humano.

Boring (2010) desarrolla una discusión respecto al número adecuado de factores que deben considerarse en los modelos de HRA, ya que con el tiempo han aparecido listados cada vez más largos y detallados, de hasta 60 PSFs, sin evidencia de en qué medida esta expansión mejora la calidad del análisis. Si bien un mayor número de factores permite una caracterización cualitativa más completa y objetiva, estos no son ortogonales al observarlos y medirlos, por lo que el fenómeno de correlación entre factores aumenta, perjudicando el resultado del análisis cuantitativo; la dependencia entre factores se demuestra en SPAR-H, donde, a modo de ejemplo, la correlación entre el tiempo disponible y el estrés es igual o superior a 0.5 en diagnóstico y acción. Ante esto, Galyean (2006) propone considerar como factores ortogonales a la persona, la organización y el ambiente, los cuales agrupan los PSFs de modelos más amplios, reduciendo el esfuerzo en el análisis y las dependencias que pueden generarse.

A modo de favorecer la fase cuantitativa del modelo, se considerará una estructura de PSFs en 3 niveles, donde el primero corresponde a las categorías ortogonales, el segundo son los factores determinantes del desempeño, y el tercero los respectivos parámetros considerados. Los factores se basan en el listado de NUREG-1792 y en

las estrategias teóricas de confiabilidad humana antes presentadas, de modo de que en su implementación se incorpore esta terminología como eje central de la estrategia organizacional.

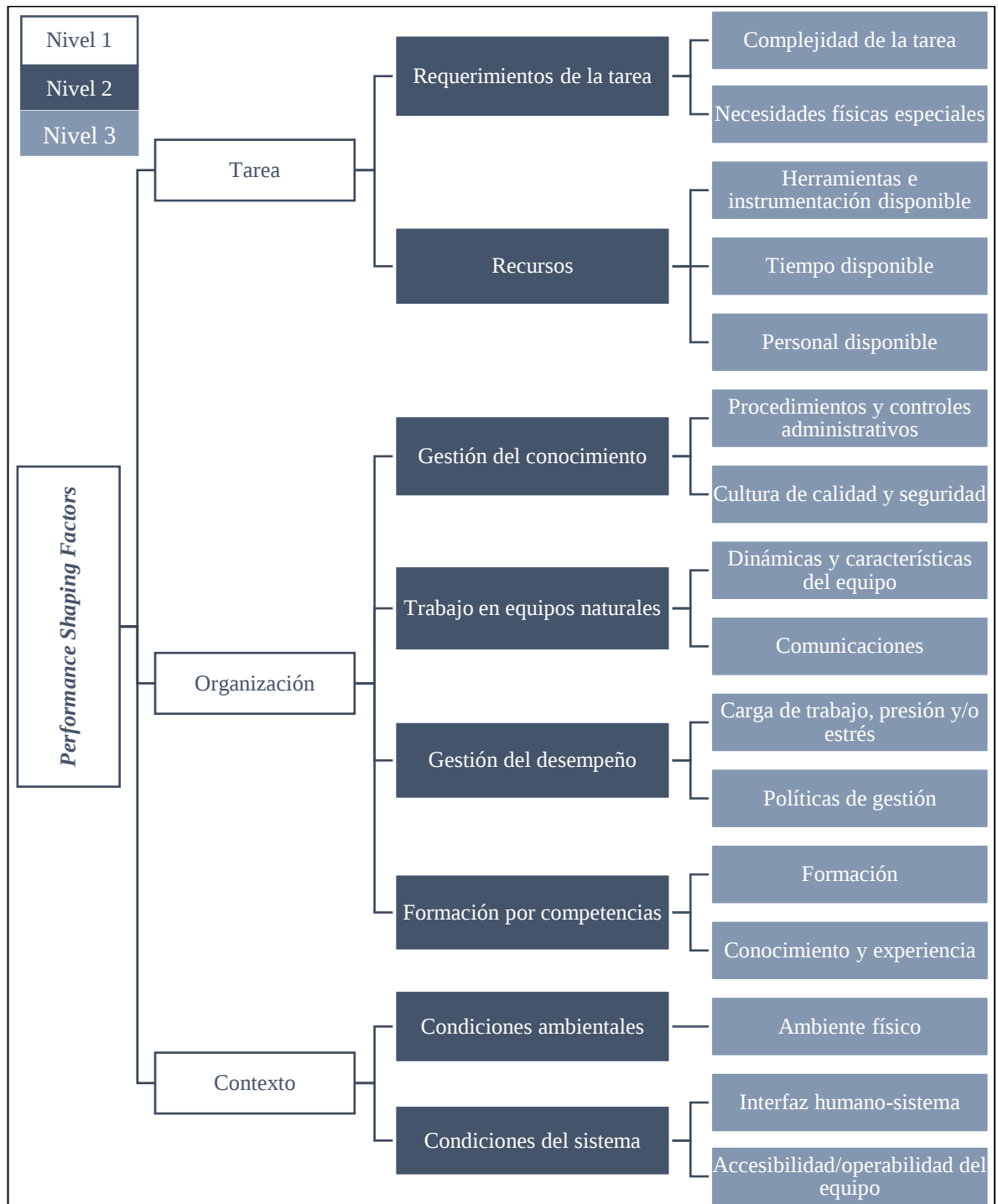


Figura 5-3. Estructura de *Performance Shaping Factors*.
(Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se presenta una descripción de los 8 factores y sus consideraciones, basada en literatura existente y modelos anteriormente presentados (Ekanem, Mosleh & Shen, 2016; Kolaczowski, Forester, Louis & Cooper, 2005),

1. Tarea: Requerimientos de la Tarea

- **Complejidad de la tarea:** Complejidad del diagnóstico y la respuesta requerida, por causas inherentes de la tarea o por situaciones externas. Existe mayor probabilidad de error humano en actividades que implican múltiples pasos, análisis mental, coordinación de varias personas, que no usan adecuadamente listas de verificación, que involucran cálculos y muchas variables.
- **Necesidades físicas especiales:** Requerimiento de capacidades y aptitudes fisiológicas del operador. Muchas actividades implican acciones físicamente exigentes, como el uso de herramientas pesadas, lo cual puede influir positiva o negativamente en el desempeño del operador de acuerdo con su condición física.

2. Tarea: Recursos

- **Herramientas e instrumentación disponible:** Disponibilidad, adecuación y calidad de las herramientas e instrumentos que permiten la ejecución de las tareas y facilitan el seguimiento de parámetros para generar diagnósticos. Puede ser un factor negativo en aquellos casos en que las herramientas o instrumentación no están disponibles o su lectura es compleja, cuando la información arrojada es ambigua, y cuando generan alarmas o indicaciones muy sutiles.
- **Tiempo disponible:** Tiempo requerido y disponible para completar la acción. Una tarea con tiempo reducido de acción tenderá a contar con mayor probabilidad de error humano, sin embargo, cuando el tiempo disponible es mucho mayor al necesario para completar una acción, este factor no influencia fuertemente el resultado. El tiempo requerido suele ser función de otros factores, como la dotación disponible, la complejidad del procedimiento, la ergonomía de la interfaz, etc., por lo tanto, no tiene sentido estandarizar este factor en condiciones ideales.

- **Personal disponible:** Disponibilidad del personal disponible para ejecutar las tareas. Su influencia depende de la actividad, y depende directamente de las acciones necesarias, su complejidad y el tiempo disponible.

3. Organización: Gestión del Conocimiento

- **Procedimientos y controles administrativos:** Existencia, accesibilidad, adecuación y calidad de instrucciones paso a paso requeridas para ejecutar una tarea. El uso exclusivo de planes de trabajo y procedimientos escritos, en lugar de orientación verbal y memoria, tienden a elevar la probabilidad de error humano. Se considera también la calidad de la información existente, ya que las ambigüedades, falta de información y detalles, y las inconsistencias son una influencia negativa.
- **Cultura de calidad y seguridad:** Políticas; compromiso de la alta dirección con la seguridad y calidad; respuesta y compromiso de las personas; infracciones y errores registrados en el registro de operaciones; investigación de accidentes o eventos cercanos a accidentes.

4. Organización: Trabajo en Equipos Naturales

- **Dinámicas y características del equipo:** Grado de cohesión (frecuencia con que el grupo de personas desempeña sus funciones en grupo, comportamiento de asistencia mutua, voluntad de sacrificar el juicio correcto para mantener la cohesión del equipo); coordinación (nivel en el que los diferentes roles y responsabilidades individuales se aclaran a cada miembro del equipo); composición (tamaño del equipo, homogeneidad/heterogeneidad, estabilidad y compatibilidad); liderazgo (calidad, rango, experiencia y confiabilidad del tomador de decisiones); dinámica organizacional (horas laborales, estructura de trabajo etc.). La influencia positiva o negativa de estos factores dependerá de la situación concreta bajo estudio.

- **Comunicaciones:** disponibilidad y calidad de canales de comunicación, estrategia y coordinación. Para reducir la probabilidad de error deben existir adecuados canales de comunicación, de modo que el mensaje se difunda correctamente, a pesar de que puedan existir factores medioambientales que lo dificulten.

5. Organización: Gestión del Desempeño

- **Carga de trabajo, presión y/o estrés:** diseño, asignación y dirección de procesos de trabajo, que condicionan la percepción de estrés y tensión de la persona o equipo. Condiciones usualmente críticas en situaciones que requieren una respuesta rápida y accidentes. Su impacto puede ser negativo en la probabilidad de error, según cual sea el caso, y suelen asociarse a otros factores como la complejidad y el tiempo disponible.
- **Políticas de gestión:** seguimiento de indicadores de gestión, retroalimentación, incentivos y reconocimientos para motivar al personal.

6. Organización: Formación por Competencias

- **Formación:** existencia, frecuencia y calidad de programas de formación asociados a las habilidades requeridas para ejecutar tareas específicas, incluyendo situaciones de emergencias. Los casos en que las tareas a realizar no se abordan periódicamente en las capacitaciones, ni son parte de los deberes habituales, constituyen una influencia negativa a la probabilidad de error. La metodología y sesgos del entrenamiento también son factores por considerar; cuanto más cercana a la situación real sea la capacitación (simulación versus sala de clases), más beneficiosa será.
- **Conocimiento y experiencia:** existencia, aplicabilidad e idoneidad de habilidades técnicas e inteligencias múltiples (innovación, agilidad intelectual, inteligencia emocional y social) de la persona asignada para ejecutar una tarea.

Se vincula a la formación, sin embargo difiere en que no todas las personas procesan la información recibida de igual modo.

7. Contexto: Condiciones Ambientales

- **Ambiente físico:** Habitabilidad en el lugar de trabajo y factores que condicionan de forma positiva o negativa el desempeño del operador (iluminación, temperatura, humedad, vibración, ruido, espacio disponible, etc.).

8. Contexto: Condiciones del Sistema

- **Interfaz humano-sistema:** Ergonomía del sistema con que el humano interactúa, asociada a la calidad del diseño para la facilidad y precisión de la percepción de información visual, auditiva y cognitiva. Idoneidad de la distribución de la carga de trabajo entre la automatización y los controles manuales del operador.
- **Accesibilidad/operabilidad del equipo:** No necesariamente en las actividades en terreno está asegurada la accesibilidad inmediata al equipo, por lo tanto, debe considerarse como un condicionante del desempeño de las personas.

La aplicación de los factores en modelos cuantitativos requiere la definición de parámetros cuantificables (métricas) que determinen sus estados, o de comportamientos visibles asociados a cada uno de ellos. Esta es una de las principales problemáticas, ya que, como Boring, Griffith y Joe (2007) indican, existen factores directos e indirectos; los factores directos corresponden a aquellos que pueden medirse directamente, con relación uno a uno entre la magnitud del PSF y la medida, mientras que los indirectos solo se determinan subjetivamente o a través de múltiples variables. Estos últimos son más difíciles de medir cuantitativamente, ya que deben codificarse las relaciones existentes entre las múltiples variables involucradas, varias de las cuales pueden estar sujetas a juicios subjetivos. Sin embargo, tal como Galileo Galilei declaró, el objetivo siempre debe ser “*measure*

what is measurable and to try to render measurable what is not yet so” (citado por Boring, Griffith y Joe, 2007).

Gran parte de los métodos proponen escalas de medición con un limitado número de estados discretos de factores (alto/medio/bajo, adecuado/inadecuado, etc.) que consideran el nivel de cumplimiento de variables observables por la organización, muchas veces desarrolladas a través de cuestionarios; este es el caso de SACADA Database Project (Chang et al., 2014), de la Comisión de Regulación Nuclear de EE. UU. (NRC), que reúne información de diferentes PSFs, estandarizada en tres estados para cada uno de ellos. En este sentido, las variables Booleanas asociadas a PSFs directos facilitan el análisis, sin embargo, se pierde la cuantificación continua de la medida. Esto puede solucionarse desarrollando métricas más matizadas que incluyan medidas indirectas (Kolakowski et al., 2005).

La siguiente tabla presenta modos de medición, a través de parámetros cuantificables o comportamientos visibles, asociados a cada factor directo e indirecto, sugeridos por Groth & Mosleh (2012), Groth (2009), Boring, Griffith & Joe (2007).

Tabla 5-2. Medición de PSFs.

Factor	Modo de medición
Requerimientos tarea	• Complejidad de la tarea: (Indirecto) modelos multivariantes de complejidad que incluyen aspectos como la profundidad de procesos cognitivos, número de tareas paralelas y las capacidades de la persona de ejecutarlas. • Necesidades físicas especiales: (Indirecto) modelos multivariantes que consideran parámetros directos como la textura de la persona, y el ritmo cardíaco.
Recursos	• Herramientas e instrumentación disponible (Directo): diferencia entre los recursos necesarios según procedimiento, y los disponibles, medida a través de variable Booleana (verdadero o falso) o escalas de cumplimiento. • Tiempo disponible: (Directo) diferencia entre el tiempo estándar necesario para ejecutar una tarea, y el tiempo efectivo disponible.

	• Personal disponible: (Directo) diferencia entre el personal necesario y el disponible, medible mediante una variable Booleana o como una proporción.
Gestión del conocimiento	• Procedimientos y controles administrativos: existencia de procedimientos técnicos (Directo) medida a través de variable Booleana, y calidad (Indirecto) medida a través de escalas diseñadas para calificar la calidad de los procedimientos objetivamente con múltiples criterios. • Cultura de calidad y seguridad: (Directa) existencia de procedimientos técnicos y su cumplimiento, medida a través de variable Booleana, y calidad (Indirecto) medida a través de escalas diseñadas para calificar la calidad de los procedimientos objetivamente con múltiples criterios.
Trabajo en equipos naturales	• Dinámicas y características del equipo: (Indirecto) escalas multivariantes que consideran aspectos como la cohesión, coordinación y composición del equipo. Se incorpora la percepción del operador mediante encuestas. • Comunicaciones: (Indirecto) existe una serie de medidas de comunicación multifactoriales que involucran canales, calidad y frecuencia.
Gestión del desempeño	• Carga de trabajo, presión y estrés: (Indirecto) modelos de medición que combinan tareas simultáneas, complejidad y tiempo disponible. Variables como el estrés cuentan con medidas directas como las fisiológicas. • Políticas de gestión: (Directo) existen métricas establecidas para medir resultados como la productividad laboral, resultados de evaluación de desempeño y el cumplimiento de metas.
Formación por competencias	• Formación: (Directo) parámetros directos como horas en simulador, horas de práctica, certificaciones, y variables Booleanas asociadas a la metodología de aprendizaje (aprendizaje en sala, simulación, mixto). Existen parámetros indirectos más complejos como el retorno sobre la inversión en capacitación. • Conocimientos y Experiencia: (Directo) años de trabajo en cargo específico, puntaje en puntaje de conocimiento.
Condiciones ambientales	• Ambiente físico: (Indirecto) no existe una única medida para determinar la calidad del medioambiente, sino que es una combinación de factores directamente medibles como la temperatura y el nivel de ruido. Consideradas de forma aislada estas serían medidas directas.

Condiciones del sistema	• Interfaz humano-sistema: (Indirecto) medición basada en el cumplimiento de estándares ergonómicos que incluyen la existencia de alertas y sensores. • Accesibilidad/operabilidad del equipo: (Directo) Es posible asignar una variable Booleana a la disponibilidad de equipos, sin embargo, si se consideran varios equipos a la vez, o su calidad, el factor se vuelve indirecto.
-------------------------	--

(Fuente: Elaboración propia basada en Groth & Mosleh, 2012); Groth, 2009; Boring, Griffith & Joe, 2007)

Adicionalmente, en el Anexo B se presenta una serie de consideraciones prácticas que contribuyen positiva y negativamente a los PSFs, extraídas del *Human Event Repository and Analysis* (HERA) (Hallbert, Whaley, Boring, McCabe & Chang, 2007).

Dado que el modelo trabaja desde la perspectiva de la organización, las actitudes del capital humano (motivación, compromiso, comportamiento y conducta) son en parte consecuencia de la gestión, motivo por el cual la dimensión psicológica de cada persona se encuentra implícita en factores como la Gestión del Desempeño y el Trabajo en Equipos Naturales. Sin embargo, existen factores que afectan las capacidades cognitivas y físicas de los trabajadores, pero que no se consideran en el modelo por el hecho de ser una variable aleatoria que es consecuencia inherente de trabajar con personas; esto se refiere a asuntos personales, enfermedades, emociones, entre otros. Boring, Griffith & Joe (2007) proponen una serie de medidas directas e indirectas para cuantificar estos factores con el objetivo de mejorar la confiabilidad humana, entre las cuales se encuentran exámenes físicos para el control de enfermedades, exámenes de alcohol y drogas, y la medición del tiempo de reacción de las personas, muy relacionado con atributos psicológicos como la memoria, percepción, fatiga y otros constructos cognitivos complejos.

5.2.3. Modelo Cuantitativo Referencial

Con el objetivo de comprender la influencia de los factores de desempeño sobre el error humano, en las diferentes categorías de actividad, se asociarán cuantitativamente mediante Redes Bayesianas (*Bayesian Networks*, BN), que como

se mencionó anteriormente, corresponde a un método que permite combinar información subjetiva y empírica para calcular una probabilidad de error humano, considerando diferentes factores y su dependencia causal.

En la práctica, las Redes Bayesianas se definen como un método gráfico probabilístico para trabajar bajo incertidumbre, en el cual se presenta un gráfico acíclico con nodos que representan variables aleatorias, y arcos que muestran las relaciones de dependencia directa entre variables (relaciones causales no determinísticas). Cada nodo cuenta con una función de densidad de probabilidad, que puede derivarse de la opinión de expertos, datos empíricos (reales o simulaciones), o de la combinación de ambos. Luego, el análisis cuantitativo se basa en el Teorema de Bayes y las tablas de probabilidad condicional (*Conditional Probability Tables*, CTPS) (Abrishami, Khakzad, Mahmoud & Van Gelder, 2020). En Redes Bayesianas, la distribución de probabilidad conjunta de una variable aleatoria (x_i) puede ser expresada como el producto de las probabilidades condicionales, dados los nodos “padres” ($Pa(x_i)$).

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(x_i | Pa(x_i)) \quad (5.1)$$

Luego, usando el Teorema de Bayes, pueden modificarse las probabilidades asignadas a los nodos, utilizando nueva evidencia y datos disponibles (E), lo cual resulta muy útil en la búsqueda de mejorar métodos existentes. Una de las principales aplicaciones es el análisis de sensibilidad de los diferentes factores.

$$P(X|E) = \frac{P(E|X)P(X)}{P(E)} = \frac{P(X, E)}{\sum_X(X, E)} \quad (5.2)$$

Abrishami et al. (2020a) distinguen y comparan los siguientes tres tipos de métodos de Redes Bayesianas, entre los cuales se encuentran mejoras a métodos ya existentes, con el principal objetivo de reducir su incertidumbre y subjetividad.

a) Basados en reglas: relaciones matemáticas establecidas para estimar HEP a partir de PSFs.

- BN-CREAM: Redes Bayesianas aplicadas a *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (método de segunda generación) (Kim, Seong, & Hollnagel, 2006).
 - BN-SPARH: Redes Bayesianas aplicadas a *Standardized Plant Analysis Risk* (método de segunda generación) (Groth et al., 2014).
- b) Basados en datos: se deriva la correlación entre HEP y PSFs a partir de datos y algoritmos de aprendizaje.
- BPL: *Bayesian Parameter Learning*.
- c) Híbridos: uso combinado de datos y relaciones matemáticas establecidas.
- BN-SLIM: Redes Bayesianas aplicadas a *Success Likelihood Index Methodology* (método de primera generación) (Abrishami et al., 2020b)

Como resultado de la comparación de los métodos presentados, BPL y BN-SLIM son más precisos que los basados en reglas, superando BN-SLIM a BPL en aquellos casos en que la base de datos no se encuentra completa, ya que es menos sensible a la información disponible. Dado que en la minería no existen bases de datos tan robustas como en la industria nuclear, que es el foco de estos modelos, se selecciona el método BN-SLIM para el cálculo de la probabilidad de error humano.

BN-SLIM resulta de la aplicación de Redes Bayesianas al método SLIM, que corresponde a una técnica de primera generación ampliamente utilizada, y muy flexible, ya que permite una amplia gama de PSFs de acuerdo con la industria y aplicación de interés, siendo esta una diferencia relevante respecto a métodos como SPAR-H y CREAM, que se basan en factores específicos. El método SLIM es de carácter determinístico, no requiere datos específicos, y se basa en el juicio de expertos, por lo que está expuesto a cierto grado de incertidumbre y subjetividad. Otra de sus limitaciones tiene que ver con la incapacidad de considerar las dependencias entre factores y actividades. La metodología base de SLIM es la siguiente: (Abrishami et al., 2020b)

- a) Expertos determinan N factores relevantes para el desempeño (PSFs) de la actividad de interés, y sus pesos relativos en el error humano (W_i), los cuales

deben sumar 1; se asigna mayor peso al factor con mayor influencia en el error humano.

- b) Expertos asignan a cada factor un puntaje (R_i), que corresponde a un número determinístico en la escala de 1 a 9, donde 1 representa la peor condición del factor y el 9 la mejor.
- c) Se calcula el índice de probabilidad de éxito (*Success Likelihood Index*, SLI) como la suma ponderada de los factores.

$$SLI = \sum_{i=1}^N W_i * R_i \quad (5.3)$$

- d) Se estima la probabilidad de error humano (HEP), a partir del índice SLI, utilizando la relación logarítmica a continuación; para obtener las constantes a y b se requieren 2 parejas de HEP-SLI referenciales, las cuales se obtienen a partir de data histórica o el juicio de expertos.

$$\text{Log}(HEP) = a * SLI + b \quad (5.4)$$

Para incorporar el uso de Redes Bayesianas en el método se forma una estructura de nodos y arcos en que el origen corresponde a N nodos de factores de desempeño (PSFs), los cuales derivan mediante la fórmula presentada en el nodo del índice de probabilidad de éxito SLI, para finalmente asociarse mediante la otra fórmula con el nodo que representa la probabilidad de error humano (HEP). Por lo tanto, la estructura cuenta con N+2 nodos.

Cada uno de los N nodos correspondientes a PSFs tiene tantos estados posibles como puntajes que se le pueden asignar; en el caso del método base SLIM existen 9 estados, correspondientes a los puntajes de 1 a 9, entre los cuales se asigna solo uno. Siguiendo esto, el nodo SLI tiene 9^N combinaciones de estados posibles, y finalmente, gracias a la función de transformación, el nodo HEP solo tiene dos, asociadas a la ocurrencia y no ocurrencia del error. Al incorporar Redes Bayesianas, el comportamiento de cada nodo PSF ya no se asocia solo a un estado, sino que se le asigna una distribución de probabilidad que refleja el comportamiento sobre los

diferentes valores que puede tomar el factor, producto de la incertidumbre del analista y/o de la incorporación de datos que modelan la distribución. Para cuantificar el efecto de las distribuciones de los PSFs, se desarrollan tablas de probabilidad condicional para los nodos SLI y HEP. Cabe mencionar que, de todos modos, se pueden definir escenarios específicos determinísticos de PSFs, funcionando tal como lo haría el método SLIM base.

A continuación, se muestra un ejemplo de estructura BN-SLIM presentado por Abrishami et al. (2020b), en el cual se modela el error humano a partir de dos factores modeladores del desempeño: experiencia y entrenamiento. Cada factor puede tomar 3 diferentes puntajes (R1, R5, R9), y a diferencia de lo que sería el método SLIM, en BN-SLIM se toma una probabilidad de ocurrencia para cada uno de los tres, derivando en 9 diferentes valores SLI asociados a probabilidades condicionales. Luego de transformar los índices SLI a HEP, y ponderar por las probabilidades condicionales, se obtiene una única probabilidad final de error humano.

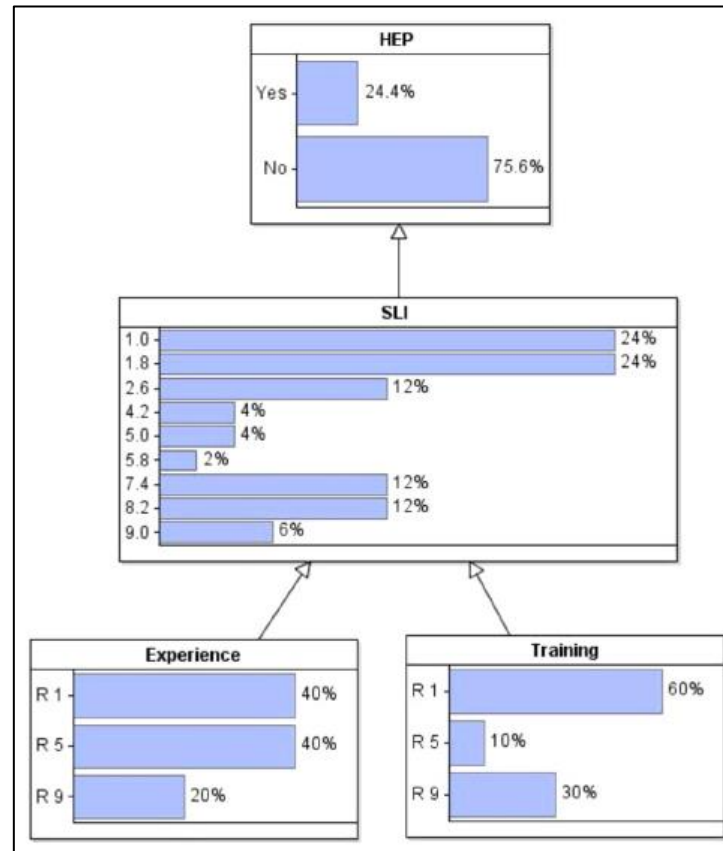


Figura 5-4. Ejemplo estructura BN-SLIM.
(Abrisahmi et al., 2020b)

Los beneficios de aplicar Redes Bayesianas a SLIM son siguientes: considera la dependencia entre tareas con PSFs comunes, maneja la incertidumbre expresando los puntajes de factores mediante distribuciones de probabilidad, y permite realizar análisis de diagnóstico, utilizando distintos escenarios *what-if*, de modo de detectar los factores críticos (Abrishami et al., 2020b). La definición de los ponderadores de cada factor, y la dependencia de las parejas referenciales para determinar las variables a y b, siguen siendo temas que BN-SLIM no abarca, pero que pueden ser modelados en el caso de contar con data suficiente.

5.2.4. Traducción en Indicadores Estratégicos

A partir del cálculo de la probabilidad de error humano, se espera determinar su influencia en el MTBF (*Mean Time Between Failure*), indicador técnico estratégico

para el mantenimiento en minería, ya que mide la confiabilidad de un equipo o sistema, y se asocia directamente con la continuidad operacional.

El MTBF corresponde al tiempo medio entre fallas, entendiendo la falla como el deterioro repentino o gradual de un componente que ya no puede realizar su función requerida. En la práctica, se expresa como la división entre las horas operacionales y el número de fallas, es decir, el inverso de la tasa de falla si el equipo se encuentre en plena vida útil, o también como la suma entre el MTTF (*Mean Time To Failure*) y el MTTR (*Mean Time To Repair*). Puede considerarse el MTBF de una flota o sistema como el valor promedio ponderado por el tamaño relativo de cada componente.

$$MTBF = \frac{\text{Hrs operacionales}}{\text{Nº de fallas}} \quad (5.5)$$

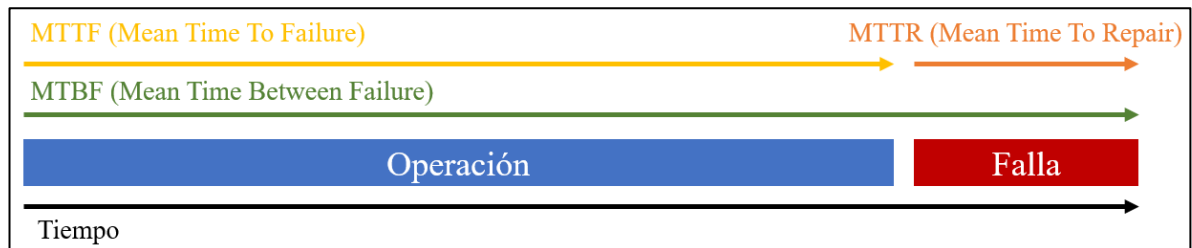


Figura 5-5. *Mean Time Between Failure*.
(Fuente: Elaboración propia)

Las fallas de los equipos se originan por cuatro principales causas:

- Mal diseño del equipo, montaje o selección de materiales.
- Errores en la operación del equipo.
- Errores en el mantenimiento del equipo.
- Factores ambientales o sobrecargas.

Luego, existen tres etapas en la vida de un equipo de acuerdo con la tasa de fallas (frecuencia esperada de fallas), tal como se muestra en la siguiente figura. La Etapa Temprana (10% aproximadamente) se caracteriza por una tasa de falla decreciente en el tiempo, con fallas iniciales principalmente asociadas al mal diseño del equipo,

montaje o selección de materiales. La Etapa Madura, que corresponde al periodo más largo (80% aprox.), tiene una tasa constante de fallas, asociadas principalmente a la inadecuada operación o mantenimiento de los equipos. Finalmente, la Etapa de Envejecimiento o Ancianidad (10% aprox.) se caracteriza por una tasa creciente de fallas, ligadas a la fatiga de los materiales y el término de la vida útil. Las anteriores pueden describirse como fallas primarias, sin embargo, siempre existe la posibilidad de tener fallas secundarias, como resultado de condiciones no nominales de operación; algunas condiciones que causan fallas secundarias son la sobrecarga, temperaturas anormales, contaminación, corrosión, etcétera (Pascual, 2005).

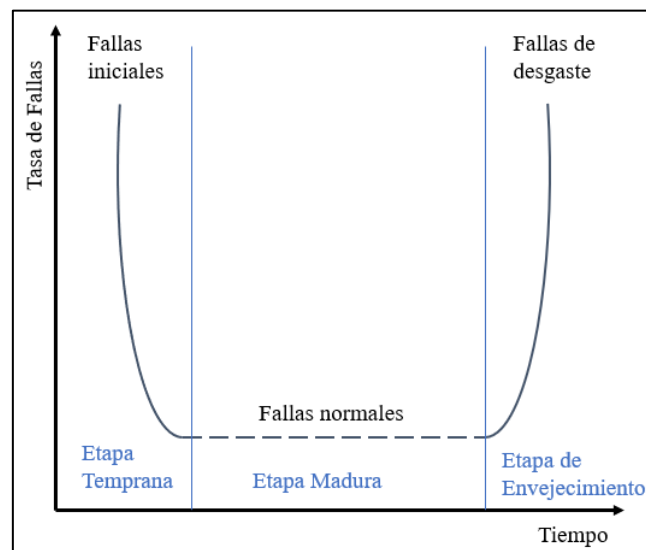


Figura 5-6. Etapas en la vida de un equipo.
(Fuente: Elaboración propia)

Dada su extensión relativa, el presente modelo se centra en la Etapa Madura de la vida de los equipos, por lo que los errores en la operación y el mantenimiento de estos cobran una alta relevancia en cuanto a la tasa de fallas. A modo de supuesto, se considerará la siguiente ponderación de causas para las fallas de los equipos en minería, la cual indica, por ejemplo, que un 35% del número de fallas en la Etapa Madura se debe a errores en la operación.

Tabla 5-3. Causas de falla en la Etapa Madura de la vida útil de un equipo minero.

Causa		Ponderador
A	Mal diseño del equipo, montaje o selección de materiales	10%
B	Errores en la operación del equipo	35%
C	Errores en el mantenimiento del equipo.	35%
D	Factores ambientales o sobrecargas.	20%

(Fuente: Elaboración propia)

Por lo tanto, considerando un modelo que impacta en los errores en el mantenimiento de un equipo, realizado por personas, el potencial de cambio es de hasta un 53,8% del MTBF, para el caso optimista en que el modelo reduce en un 100% las fallas por mantenimiento. Para un MTBF de 65 horas, declarado como favorable para camiones de alta capacidad por Rodrigo Pascual (2005), el modelo tiene un potencial de aumentar el indicador hasta las 100 horas. Este valor potencial es solo un referencial, ya que en la práctica el escenario en que no existen fallas por mantenimiento resulta poco verosímil.

$$MTBF = \frac{Hrs\ operacionales}{0.1 * A + 0.35 * B + \mathbf{0.35} * C + 0.2 * D} \quad (5.6)$$

$$Caso\ base \rightarrow MTBF_{base} = \frac{Hrs\ operacionales}{0.1 * 1 + 0.35 * 1 + 0.35 * 1 + 0.2 * 1} \quad (5.7)$$

$$Caso\ optimista \rightarrow MTBF_{opt} = \frac{Hrs\ operacionales}{0.1 * 1 + 0.35 * 1 + \mathbf{0.35} * \mathbf{0} + 0.2 * 1} = 1,54 * MTBF_{base} \quad (5.8)$$

5.2.5. Estructura BN-SLIM Aplicado

Fusionando todo lo mencionado anteriormente, se obtiene un modelo con la siguiente estructura de cuatro niveles.

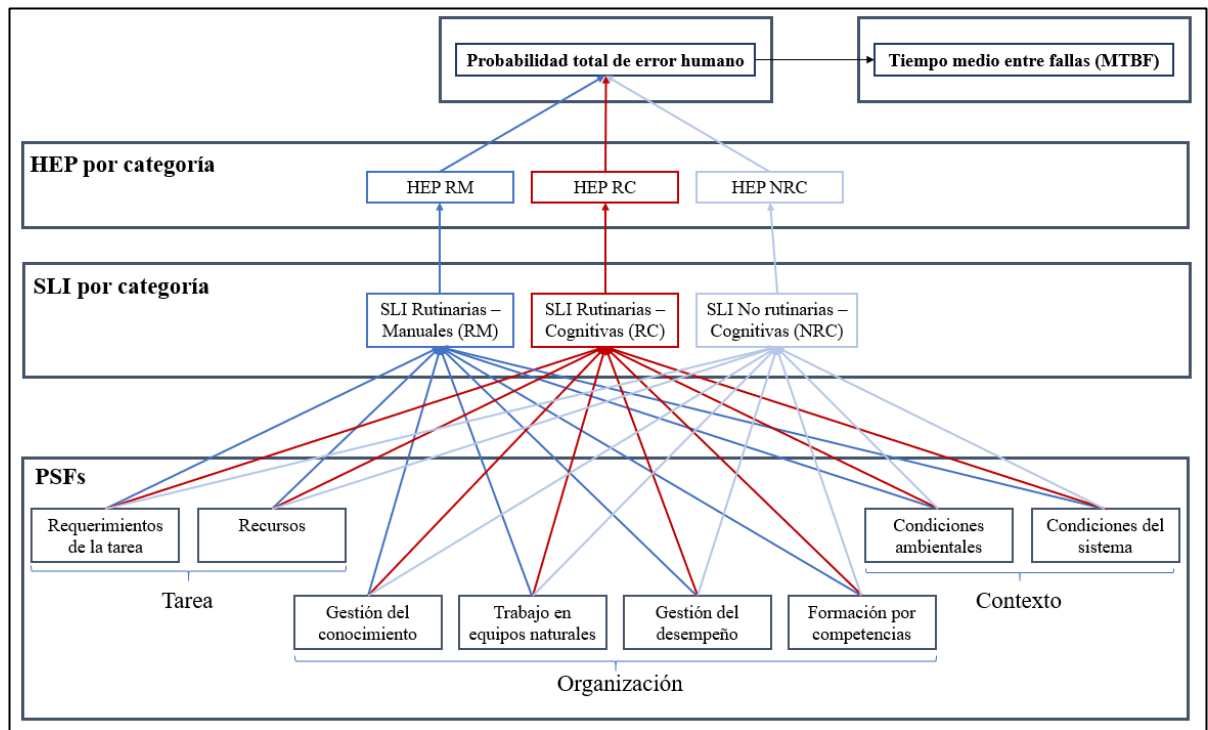


Figura 5-7. Estructura modelo BN-SLIM aplicado.
(Fuente: Elaboración propia)

En el primer nivel (inferior) se encuentran los 8 factores modeladores del desempeño (PSFs) descritos previamente, cada uno con sus respectivos estados posibles y distribuciones de probabilidad; implícitamente se presentan las categorías de factores y los respectivos parámetros cuantificables. El segundo nivel corresponde a los índices de probabilidad de éxito (SLI) de cada categoría de actividad, calculados en base a ponderadores de factores diferenciados para cada una de ellas. Cabe mencionar que algunos factores podrían tener distribuciones diferentes según el tipo de actividad bajo análisis.

El tercer nivel del modelo corresponde a las probabilidades de error humano correspondientes a cada categoría de actividad, calculadas en base a las parejas referenciales, y luego el cuarto nivel corresponde a una probabilidad total de error humano, que considera el porcentaje de competencias atribuidas por el Consejo de Competencias Mineras a cada categoría de actividad de mantenimiento mecánico.

Finalmente, la probabilidad total de error humano se traduce en un cambio del indicador estratégico (MTBF) respecto a un caso base.

Es necesario mencionar que el presente modelo se enfoca en buscar la probabilidad de error humano, e influencia en indicadores, para el mantenimiento de un sistema completo. Sin embargo, es posible utilizarlo de igual modo para equipos específicos, e incluso para actividades puntuales.

5.3. Aplicación Teórica del Modelo

5.3.1. Metodología

Para llevar a cabo la aplicación teórica del modelo diseñado, se desarrolló un programa en lenguaje Python, el cual permite calcular las tablas de probabilidad condicional y las probabilidades de error humano para casos específicos, utilizando los siguientes *inputs*:

- Posibles estados de PSFs.
- Parejas referenciales de HEP y SLI.
- Ponderadores de PSFs.
- Distribuciones de probabilidad de PSFs.

Se desarrollaron tres casos diferentes de aplicación, con parámetros simulados y validados mediante la opinión de expertos. Los casos son:

- Caso 1: Se aplica un modelo gradual de mejora de factores a todos los PSFs simultáneamente. El objetivo de esto es determinar el funcionamiento global del modelo.
- Caso 2: Se aplica un modelo gradual de mejora de factores solo a los PSFs de la categoría “Organización”, mientras que las categorías “Tarea” y “Contexto” se mantienen constantes. El objetivo de esto es determinar la influencia específica de los factores asociados a la gestión de la organización, que corresponde al principal foco de la investigación.

- Caso 3: Se aplica un modelo gradual de mejora de factores solo al PSF “Formación por Competencias”, mientras que todos los otros se mantienen constantes. El objetivo de esto es determinar la influencia específica de este factor, dado que se reconoce por expertos como uno de los más relevantes en el desempeño de las personas.

Una vez ejecutado el código para cada uno, se agruparon y analizaron los resultados, los cuales se presentan más adelante.

5.3.2. Parámetros

A continuación, se presentan los parámetros utilizados como *input* en las diferentes aplicaciones teóricas del modelo, basados en el listado ya enseñado.

a) Posibles estados de PSFs

El método SLIM de primera generación contempla 9 estados o puntajes posibles para cada factor determinante del desempeño, donde el número 1 corresponde al peor estado en cuanto a su influencia en el error humano, y el 9 corresponde al ideal. En este caso, dada la incertidumbre existente respecto a los estados, se considerarán solo tres puntajes posibles, tal como lo hacen Abrishami, Khakzad, & Van Gelder (2019) en el ejemplo numérico del modelo BN-SLIM, presentado para el proyecto de la industria nuclear llamado NARSIS (New Approach to Reactor Safety Improvements). Por lo tanto, los posibles estados, utilizados en los tres casos, son:

Tabla 5-4. Posibles estados de PSFs.

Estado/Puntaje	Influencia en el error humano
1	Negativa
5	Neutral – Regular
9	Positiva

(Fuente: Elaboración propia)

b) Parejas referenciales de HEP y SLI

Abrishami et al. (2019) utilizan los siguientes datos como parejas referenciales para su ejemplo numérico de la industria nuclear: un HEP de 0.6 (60% de probabilidad

de error humano) para el SLI igual a 1 (peor condición), y un HEP de 0.001 (0.1% de probabilidad de error humano) para el SLI igual a 9 (mejor condición).

Dado que las condiciones de la industria nuclear y minera difieren en muchos sentidos, se tomó como supuesto un aumento de 10% y 15% en la peor y mejor condición, respectivamente. Por lo tanto, los datos utilizados para los tres casos son los siguientes:

Tabla 5-5. Parejas referenciales de HEP y SLI.

Referencia	SLI	HEP (%)
1	9	10
2	1	75

(Fuente: Elaboración propia)

Esto significa que se atribuye un 75% de probabilidad de error humano en la peor de las condiciones, y un 10% en la mejor. Respecto a este último dato, se da un margen de 10% debido a que el modelo no considera directamente la gestión de situaciones personales de cada trabajador que dificulten su desempeño. Cristian Gárate, Consultor Senior en Recursos Humanos con experiencia en proyectos de la industria minera, indica que este valor podría ser incluso mayor, considerando la realidad de las organizaciones en la minería chilena. El aumento de un 15% para el peor de los casos, respecto a la industria nuclear, se explica por el nivel de formación de los trabajadores y el margen de error permitido en la ejecución de las tareas.

c) Ponderadores de PSFs

La asignación de ponderadores diferenciados para cada tipo de actividad se basa en la siguiente hipótesis: la gestión de la organización cobra mayor importancia en las actividades más cognitivas y menos rutinarias. Esta hipótesis se justifica por el hecho de que las actividades no rutinarias y cognitivas son difícilmente reemplazables, y de que la tendencia muestra que el crecimiento en el número de posiciones se da para estas tareas, mientras que las rutinarias (manuales o cognitivas) van disminuyendo sustantivamente (CCM, 2018). Adicionalmente, expertos declaran lo siguiente:

(...) Sobre este escenario resulta claro que hay aspectos organizacionales que buscan regular y estandarizar el comportamiento humano dentro de las organizaciones. Las tareas no rutinarias cognitivas son aquellas que se mantendrán dentro de las funciones humanas no fácilmente automatizables y obviamente para ellas el camino de intervención proviene de una mirada organizacional sistémica que considere todos los factores que inciden en su logro. (C. Gárate⁹, comunicación personal, 8 de enero, 2021)

Efectivamente en las tareas cognitivas y no rutinarias cobra mayor relevancia la gestión de la organización dado que se debe entregar las condiciones para que las personas puedan usar sus potencialidades para el desarrollo de estas tareas, esto puede ser: ambiente de trabajo, entregar los recursos requeridos para ejecutar estas tareas (ejemplo: instrumentos, manuales, entrenamientos, etc.). También es muy importante seleccionar a las personas adecuadas para cada tipo de tareas, por ejemplo, no es convenientes para personas inquietas en el sentido de buscar desafíos, que se le asignen tareas rutinarias sin desafío cognitivo, por ejemplo: pañoleros, mantenedor de PM rutinarias. (V. Fierro¹⁰, comunicación personal, 12 de enero, 2021)

Considerando lo anterior, se asignaron los siguientes ponderadores a cada categoría de factores.

Tabla 5-6. Ponderadores por categoría.

Categoría	Ponderador		
	Rutinaria - Manual	Rutinaria - Cognitiva	No Rutinaria - Cognitiva
Tarea	0.3	0.25	0.2
Organización	0.4	0.5	0.6
Contexto	0.3	0.25	0.2

(Fuente: Elaboración propia)

El criterio de asignación se basa en considerar la categoría de actividades Rutinarias-Cognitivas nivel base, al cual se atribuye un 50% de la ponderación a Organización, dado el enfoque del modelo. Luego, teniendo en cuenta la hipótesis planteada, se asigna un 40% y 60% de la ponderación a Organización, para las tareas Rutinarias-

⁹ Cristian Gárate - Director en Moddos Consultorías Organizacionales, Consultor Senior en RRHH con experiencia en proyectos de la industria minera.

¹⁰ Vladimir Fierro - Ingeniero Senior Experto en Mantenimiento de Antofagasta Minerals.

Manuales y No Rutinarias-Cognitivas respectivamente. En todos los casos el restante se divide en partes iguales entre las categorías de Tarea y Contexto.

Profundizando, la ponderación asignada a las categorías Tarea y Contexto se dividen en partes iguales entre sus factores, es decir, para las actividades Rutinarias-Cognitivas la ponderación es de 12.5% para los siguientes PSF: Requerimientos tarea, Recursos, Condiciones Ambientales y Condiciones del Sistema. En cuanto a los factores de la categoría Organización, todos tienen la misma ponderación excepto Formación por Competencias, al cual se le atribuye el doble dada su importancia relativa, reconocida por las organizaciones. Por lo tanto, para las actividades Rutinarias-Cognitivas la ponderación es de 10% para Gestión del Conocimiento, Trabajo en Equipos y Gestión del Desempeño, y de un 20% para Formación por Competencias.

Tabla 5-7. Ponderadores por PSF.

Categoría	Factor	Ponderador		
		Rutinaria - Manual	Rutinaria - Cognitiva	No Rutinaria - Cognitiva
Tarea	Requerimientos tarea	0.15	0.125	0.1
	Recursos	0.15	0.125	0.1
Organización	Gestión del conocimiento	0.08	0.1	0.12
	Trabajo en equipos naturales	0.08	0.1	0.12
	Gestión del desempeño	0.08	0.1	0.12
	Formación por competencias	0.16	0.2	0.24
Contexto	Condiciones ambientales	0.15	0.125	0.1
	Condiciones del sistema	0.15	0.125	0.1

(Fuente: Elaboración propia)

Estos ponderadores son válidos para los tres casos propuestos inicialmente.

d) Distribuciones de probabilidad de PSFs

Con el objetivo de analizar la sensibilidad de los resultados, y considerando los estados de las distintas organizaciones, se desarrolló un modelo gradual de mejora de factores en el cual se transiciona desde el 100% en estado 1, al 100% en estado 9, a través de dieciocho diferentes fases. El modelo se presenta a continuación.

Tabla 5-8. Modelo gradual de mejora de factores.

Fase	Probabilidad (%)		
	1	5	9
1	100	0	0
2	90	10	0
3	80	20	0
4	70	30	0
5	60	40	0
6	50	50	0
7	40	60	0
8	30	70	0
9	20	70	10
10	10	70	20
11	0	70	30
12	0	60	40
13	0	50	50
14	0	40	60
15	0	30	70
16	0	20	80
17	0	10	90
18	0	0	100

(Fuente: Elaboración propia)

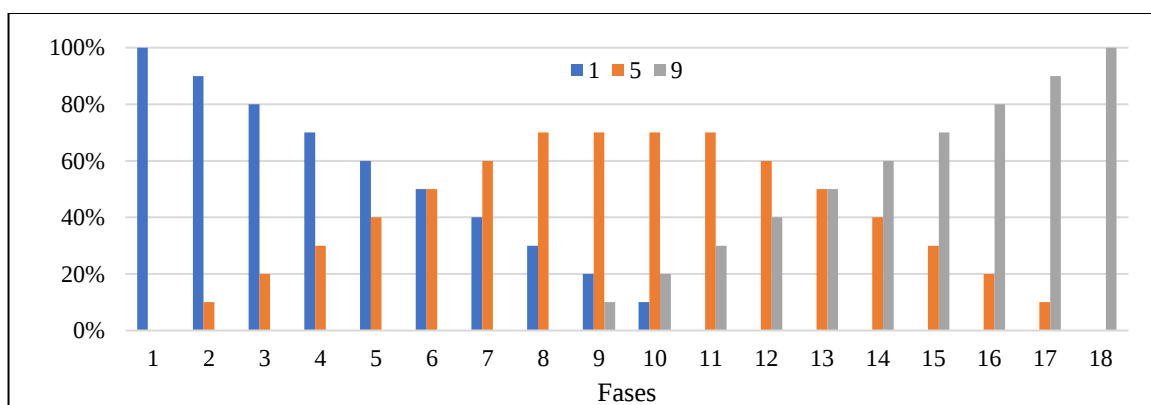


Figura 5-8. Modelo gradual de mejora de factores.

(Fuente: Elaboración propia)

Como se mencionó anteriormente, este modelo se aplica diferenciadamente en tres distintos casos de aplicación. En el primero, todos los estados pasan por las dieciocho fases de mejora simultáneamente. En el segundo, solo los factores de la categoría Organización pasan simultáneamente por el proceso de mejora, mientras

que los factores de Tarea y Contexto presentan un 50% de probabilidad en estado 5 y 50% en estado 9. En el tercer caso, todos los factores tienen un 50% de probabilidad en estado 5 y 50% en estado 9, excepto Formación por Competencias que pasa por las dieciocho fases del modelo de mejora.

5.3.3. Resultados

La ejecución del modelo con los parámetros señalados genera, para cada uno de los tres casos, y en cada una de las dieciocho fases, una matriz de 6,561 (3 estados y 8 factores, 3^8) índices SLI, y una tabla de probabilidades condicionales asociada, con el mismo número de elementos. Luego, utilizando las parejas referenciales, se transforma cada uno de los índices de probabilidad de éxito (SLI) de la matriz en una probabilidad de error humano, que deriva en un único valor por fase y categoría al ponderar por su probabilidad condicional de ocurrencia. Finalmente, utilizando los porcentajes de competencias asociados a cada categoría, se calcula una probabilidad total de error humano en cada fase del modelo de mejora, con la cual se analiza el potencial cambio en el MTBF respecto a un caso base de los factores. A continuación, se presentan, para cada caso, las probabilidades de error humano por fase y categoría de actividad, y su efecto relativo en el indicador estratégico (MTBF).

Caso 1: Se aplica el modelo gradual de mejora de factores a todos los PSFs simultáneamente.

Tabla 5-9. Resultados Caso 1.

Fase	HEP Rutinaria-Manual	HEP Rutinaria-Cognitiva	HEP No Rutinaria-Cognitiva	HEP Total	Delta MTBF
1	75.00%	75.00%	75.00%	75.00%	0.0%
2	68.22%	68.21%	68.23%	68.22%	3.3%
3	61.97%	61.96%	62.00%	61.98%	6.5%
4	56.22%	56.21%	56.26%	56.23%	9.6%
5	50.95%	50.93%	50.98%	50.95%	12.6%
6	46.10%	46.09%	46.14%	46.11%	15.6%
7	41.66%	41.65%	41.69%	41.67%	18.4%
8	37.60%	37.59%	37.62%	37.60%	21.1%
9	30.90%	30.89%	30.92%	30.90%	25.9%
10	25.26%	25.25%	25.28%	25.26%	30.2%
11	20.53%	20.53%	20.54%	20.53%	34.1%
12	18.60%	18.60%	18.62%	18.60%	35.7%
13	16.83%	16.83%	16.85%	16.83%	37.3%
14	15.21%	15.21%	15.22%	15.21%	38.7%
15	13.73%	13.72%	13.74%	13.73%	40.0%
16	12.37%	12.37%	12.38%	12.37%	41.3%
17	11.13%	11.13%	11.13%	11.13%	42.5%
18	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	43.5%

(Fuente: Elaboración propia)

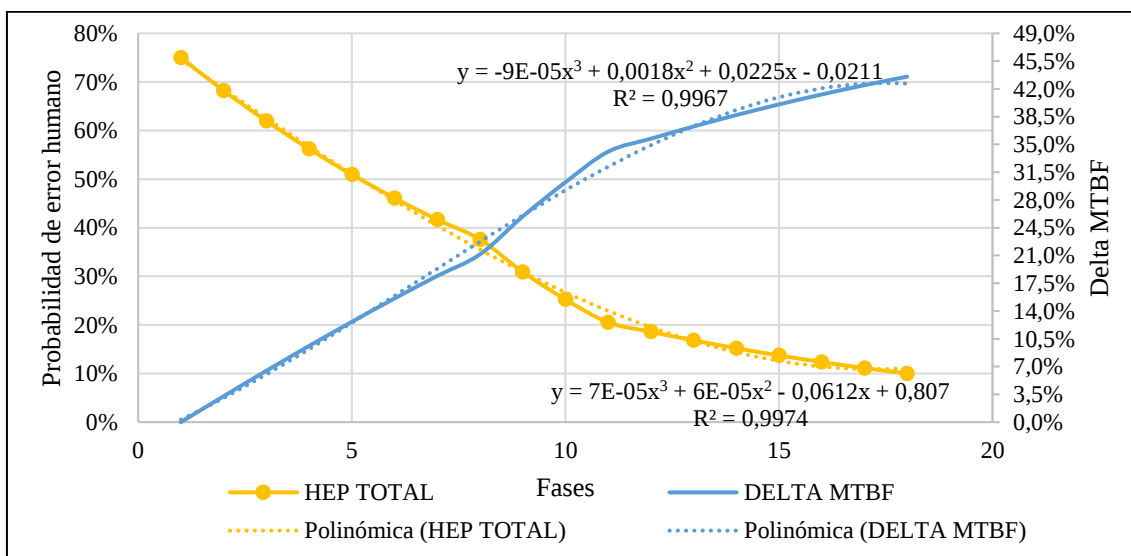


Figura 5-9. Resultados Caso 1
(Fuente: Elaboración propia)

Para este caso, los resultados son los mismos en todas las categorías de actividad, dado que no hay factores que permanezcan constantes. Utilizando las parejas referenciales definidas, los límites son un 75% de probabilidad de error humano en la fase 1 (peor condición) y un 10% en la fase 18 (mejor condición), con cambios porcentuales más significativos en la mejora de las primeras fases; por ejemplo, al pasar de la fase 2 a la 3 existe una mejora de 6.25% en la probabilidad de error humano, pero al pasar de la 16 a la 17 solo mejora un 1.24%. La curva HEP Total de la Figura 5-9 deja esto en evidencia, con una pendiente mucho más pronunciada en la primera mitad del proceso. La tendencia de la curva que caracteriza la probabilidad de error humano en las fases es de un decrecimiento exponencial.

Con las HEP calculadas, se asocia la mayor probabilidad de error humano (75%, fase 1) a un 100% de falla del sistema por causa de mantenimiento inadecuado, extrapolando linealmente para el resto de las fases, lo cual deriva en un 13% para el mejor de los casos (fase 18). Utilizando estos valores, y la fórmula de MTBF presentada, que asigna un 35% de ponderación a las fallas por causa de mantenimiento inadecuado, se obtiene la columna Delta MTBF de la Tabla 5-10, la cual indica que en la fase 18 puede mejorarse en un 43.5% el MTBF respecto a la situación en la fase 1; esto significa que si, por ejemplo, el MTBF base es de 65 horas, este podría aumentar a 93.3 horas si todos los factores pasan de su peor a su mejor estado. La curva de la Figura 5-9 muestra un crecimiento exponencial del Delta MTBF a lo largo de las fases, con mayor pendiente en un inicio, lo cual tiene lógica dado que se comparan todas con la situación base.

En la práctica, lo anterior significa que es conveniente enfocar mayores esfuerzos en aquellos factores que se encuentran en su peor estado, ya que el potencial de cambio es mucho mayor en la probabilidad de error humano, y por consiguiente en el indicador estratégico.

Caso 2: Se aplica el modelo gradual de mejora de factores solo a los PSFs de “Organización”, mientras que las “Tarea” y “Contexto” se mantienen constantes.

Tabla 5-10. Resultados Caso 2.

Fase	HEP Rutinaria-Manual	HEP Rutinaria-Cognitiva	HEP No Rutinaria-Cognitiva	HEP Total	Delta MTBF
1	30.64%	35.51%	41.19%	33.81%	0.0%
2	29.48%	33.87%	38.94%	32.32%	1.6%
3	28.36%	32.28%	36.78%	30.89%	3.1%
4	27.28%	30.75%	34.72%	29.52%	4.6%
5	26.22%	29.28%	32.73%	28.18%	6.2%
6	25.19%	27.85%	30.83%	26.89%	7.7%
7	24.19%	26.47%	29.02%	25.65%	9.2%
8	23.22%	25.15%	27.27%	24.44%	10.7%
9	21.46%	22.80%	24.26%	22.31%	13.5%
10	19.80%	20.61%	21.50%	20.31%	16.2%
11	18.23%	18.58%	18.97%	18.45%	18.9%
12	17.52%	17.69%	17.88%	17.63%	20.1%
13	16.83%	16.83%	16.85%	16.83%	21.3%
14	16.17%	16.00%	15.85%	16.07%	22.5%
15	15.52%	15.20%	14.90%	15.33%	23.7%
16	14.89%	14.43%	13.99%	14.61%	24.8%
17	14.28%	13.68%	13.12%	13.92%	25.9%
18	13.68%	12.97%	12.29%	13.25%	27.0%

(Fuente: Elaboración propia)

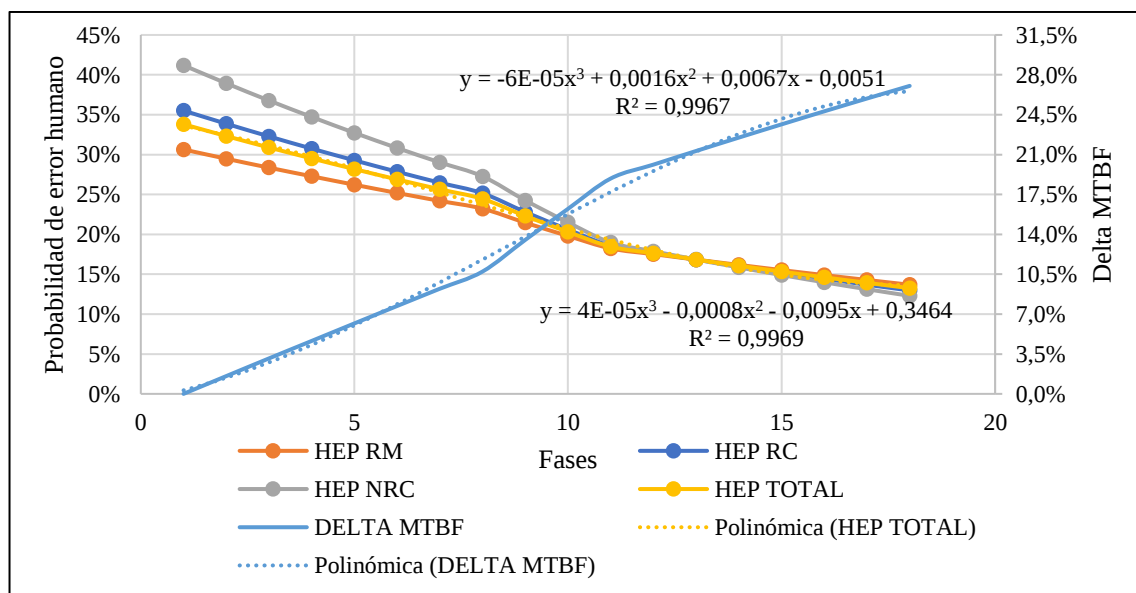


Figura 5-10. Resultados Caso 2.

(Fuente: Elaboración propia)

Para este caso, dado que solo se modifican los factores de la categoría Organización, el potencial de cambio es menor respecto al anterior. Las actividades Rutinarias-Manuales (63%) oscilan entre un 30.6% de HEP para la peor condición, y un 13.7% para la mejor, las Rutinarias-Cognitivas (13%) entre un 35.5% en la peor condición y un 13% en la mejor, y las No Rutinarias-Cognitivas (24%) entre un 41.2% en la peor condición y un 12.3% en la mejor. Lo anterior implica una probabilidad total de error humano que oscila entre un 33.8% y un 13.6%, con cambios porcentuales más significativos en la mejora de las primeras fases; por ejemplo, al pasar de la fase 2 a la 3 existe una mejora de 1.43% en la probabilidad de error humano, pero al pasar de la 16 a la 17 solo mejora un 0.69%. La curva HEP Total de la Figura 5-10 deja esto en evidencia, con una pendiente ligeramente más pronunciada en la primera mitad del proceso. La tendencia de la curva que caracteriza la probabilidad de error humano en las fases es de un decrecimiento levemente exponencial.

Con las HEP calculadas, se asocia la mayor probabilidad de error humano (33.81%, fase 1) a un 100% de falla del sistema por causa de mantenimiento inadecuado, extrapolando linealmente para el resto de las fases, lo cual deriva en un 39% para el mejor de los casos (fase 18). Utilizando estos valores, y la fórmula de MTBF presentada, que asigna un 35% de ponderación a las fallas por causa de mantenimiento inadecuado, se obtiene la columna Delta MTBF de la Tabla 5-11, la cual indica que en la fase 18 puede mejorarse en un 27% el MTBF respecto a la situación en la fase 1; esto significa que si, por ejemplo, el MTBF base es de 65 horas, este podría aumentar a 82.6 horas si los factores de Organización pasan de su peor a su mejor estado. La curva de la Figura 5-10 muestra un crecimiento ligeramente exponencial del Delta MTBF a lo largo de las fases, lo cual es lógico dado que se comparan todas con la situación base.

A diferencia del caso anterior, este revela que la gestión de la organización es relevante en todas las fases, con capacidad de impactar la probabilidad de error humano, y por consiguiente el indicador estratégico, en valores que pueden resultar significativos para la operación.

Caso 3: Se aplica el modelo gradual de mejora de factores solo al PSF “Formación por Competencias”, mientras que todos los otros se mantienen constantes.

Tabla 5-11. Resultados Caso 3

Fase	HEP Rutinaria-Manual	HEP Rutinaria-Cognitiva	HEP No Rutinaria-Cognitiva	HEP Total	Delta MTBF
1	21.37%	22.65%	24.04%	22.18%	0.0%
2	21.05%	22.24%	23.52%	21.80%	0.6%
3	20.73%	21.83%	23.00%	21.42%	1.2%
4	20.41%	21.41%	22.49%	21.04%	1.8%
5	20.10%	21.00%	21.97%	20.67%	2.4%
6	19.78%	20.59%	21.45%	20.29%	3.1%
7	19.46%	20.17%	20.94%	19.91%	3.7%
8	19.14%	19.76%	20.42%	19.53%	4.4%
9	18.55%	19.01%	19.50%	18.84%	5.6%
10	17.96%	18.26%	18.58%	18.15%	6.8%
11	17.38%	17.50%	17.66%	17.46%	8.0%
12	17.10%	17.17%	17.25%	17.15%	8.6%
13	16.83%	16.83%	16.85%	16.83%	9.2%
14	16.56%	16.49%	16.44%	16.52%	9.8%
15	16.29%	16.15%	16.04%	16.21%	10.4%
16	16.02%	15.82%	15.63%	15.90%	11.0%
17	15.75%	15.48%	15.23%	15.59%	11.6%
18	15.48%	15.14%	14.82%	15.28%	12.2%

(Fuente: Elaboración propia)

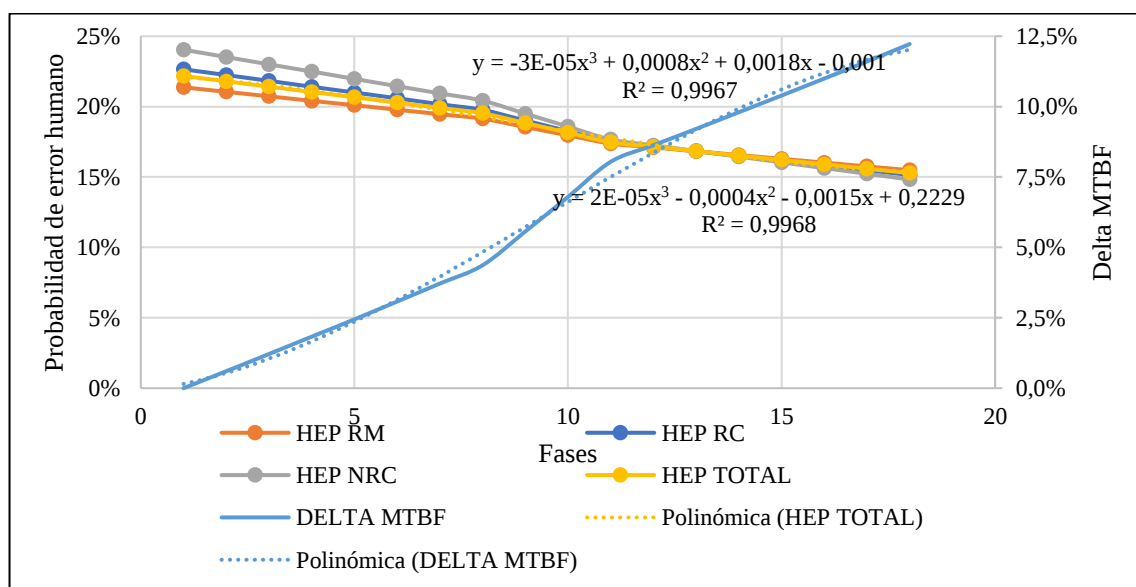


Figura 5-11. Resultados Caso 3.
(Fuente: Elaboración propia)

Para este caso, dado que solo se modifica el factor Formación por Competencias, el potencial de cambio es menor respecto al anterior. Las actividades Rutinarias-Manuales (63%) oscilan entre un 21.4% de HEP para la peor condición, y un 15.5% para la mejor, las Rutinarias-Cognitivas (13%) van entre un 22.7% en la peor condición y un 15.1% en la mejor, y las No Rutinarias-Cognitivas (24%) entre un 24% en la peor condición y un 14.8% en la mejor. Lo anterior implica una probabilidad total de error humano que oscila entre un 22.2% y un 15.3%, con cambios porcentuales muy similares entre fases, cuyo promedio es de un 0.41%. La curva HEP Total de la Figura 5-11 muestra que la tendencia es de un decrecimiento prácticamente lineal.

Con las HEP calculadas, se asocia la mayor probabilidad de error humano (22.2%, fase 1) a un 100% de falla del sistema por causa de mantenimiento inadecuado, extrapolando con para el resto de las fases, lo cual deriva en un 69% para el mejor de los casos (fase 18). Utilizando estos valores, y la fórmula de MTBF presentada, que asigna un 35% de ponderación a las fallas por causa de mantenimiento inadecuado, se obtiene la columna Delta MTBF de la Tabla 5-12, la cual indica que en la fase 18 puede mejorarse en un 12.2% el MTBF respecto a la situación en la fase 1; esto significa que si, por ejemplo, el MTBF base es de 65 horas, este podría aumentar a 73 horas si el factor Formación por Competencias pasa de su peor a su mejor estado. La curva de la Figura 5-11 muestra un crecimiento ligeramente lineal del Delta MTBF a lo largo de las fases, lo cual es lógico dado que se comparan todas con la situación base.

Este caso releva el potencial de una adecuada formación por competencias en el MTBF, que, si bien está sujeto al supuesto de que su importancia dobla los otros factores de Organización, efectivamente es reconocido en las operaciones como un punto estratégico para el desempeño de las personas.

En la norma vigente UNE 66173 (AENOR, 2003), se propone la gestión de competencias como medio para mejorar este factor, lo cual involucra las siguientes actividades: Identificar las competencias requeridas; Identificar las competencias

disponibles; Evaluar las desviaciones; Desarrollar competencias y su disponibilidad; Mantener y actualizar competencias; Desarrollar competencias a largo plazo. Adicionalmente es importante estar en tendencia respecto a los avances existentes en la formación por competencias, un ejemplo de esto son las mesas virtuales de aprendizaje y simuladores de práctica. El Anexo C presenta una propuesta de evaluación de eficacia de la acción formativa.

Se presentaron los resultados del modelo de confiabilidad humana para tres diferentes casos: en el primero todos los factores cambian a través de un proceso de mejora propuesto de 18 fases, en el segundo solo cambian los 4 factores asociados a la organización, y en el tercero solo cambia el factor de formación por competencias. Los resultados están sujetos a los parámetros y supuestos presentados en el apartado anterior, que son principalmente los posibles estados de PSFs, las parejas referenciales HEP-SLI, los ponderadores de PSFs y sus distribuciones de probabilidad. A pesar de que el enfoque es presentar la metodología propuesta, se obtienen las siguientes conclusiones de los resultados:

- A nivel general, una mejora en los factores determinantes del desempeño influye positivamente en el tiempo medio entre fallas de un sistema, a través de la disminución del error humano.
- Existe un gran potencial de cambio en aquellos factores que se encuentran en estados más deficientes respecto a su influencia en la probabilidad de error humano.
- Respecto a los factores organizacionales, su gestión puede generar cambios importantes en el MTBF de un sistema, independiente cual sea la fase de madurez de los factores en la organización.
- La formación por competencias es un factor que actualmente se busca gestionar en las organizaciones, y para aquellas que comienzan de un nivel base, el potencial de cambio en el MTBF es de hasta un 12%, lo cual evidencia la relevancia de contar con personas capacitadas para llevar a cabo sus tareas.

5.4. Implementación

La implementación del modelo propuesto tiene como principal foco la integración de los diferentes factores que condicionan el desempeño de las personas en el mantenimiento de equipos mineros, con influencia directa en la calidad de ejecución del mismo. Para esto, se planteó una serie de *inputs* que deben adaptarse a la situación o sistema específico bajo análisis, de modo de lograr una caracterización acabada el potencial escenario de falla humana.

La implementación de un modelo BN-SLIM aplicado al mantenimiento en minería cuenta con los siguientes **beneficios**:

- Cuantificación de aspectos considerados cualitativos: el modelo permite obtener resultados numéricos a partir de información que es habitualmente tratada como cualitativa por las organizaciones, permitiendo comprender de mejor forma la relevancia de los distintos factores en la operación.
- Flexibilidad en cuanto a parámetros seleccionados: la flexibilidad del modelo permite adaptar a la realidad de cada organización y área los parámetros ingresados como *input*. Los parámetros específicos a considerar para cada situación son:
 - Factores modeladores del desempeño: puede adaptarse el modelo utilizando distintos factores considerados relevantes para cada tarea y organización en específico, cuidando que sean lo más ortogonales posibles, pero que a la vez logren caracterizar adecuadamente la situación bajo análisis.
 - Estados: en caso de contar con información que permita reducir la incertidumbre respecto a los estados de cada factor, el modelo puede incorporar fácilmente una escala de puntajes más específica que no aplique necesariamente a todos los PSFs por igual, con la única condición de que los límites sean 1 y 9. Del mismo modo pueden generarse factores binarios, con solo dos estados posibles.

- Ponderadores de factores: dado que cada actividad puede tener una ponderación diferente de los factores, el modelo permite realizar una asignación específica para cada uno de ellos.
- Distribuciones de probabilidad: entre los estados seleccionados, el modelo permite asignar distintas distribuciones de probabilidad, utilizando data y/o la opinión de expertos.
- Parejas referenciales: en caso de contar con datos reales, o de que la opinión de expertos difiera de los valores considerados, pueden cambiarse las parejas referenciales utilizadas para transformar el índice SLI en las probabilidades de error humano, lo cual tiene una importante influencia en los resultados.
- Enriquecimiento del modelo mediante data: una de las mayores características del modelo es su flexibilidad en cuanto a la incorporación automática de datos disponibles. Su base contempla el uso de opinión de expertos, sin embargo, puede enriquecerse mediante datos, los cuales pueden incluirse solo para algunos o para todos los factores. Los resultados del modelo permiten evidenciar el potencial que utilizar datos en su implementación, lo cual puede realizarse gradualmente a partir de los datos disponibles en las organizaciones, y dando paso a la obtención de otros a medida que se genera consciencia. La data puede obtenerse y procesarse desde los diferentes repositorios de información (*data warehouse*) de las organizaciones, y se puede conectar con análisis causa raíz, análisis de accidentes, etc.
- Diagnósticos y análisis predictivos: las Redes Bayesianas, base lógica del modelo, permiten realizar análisis de diagnóstico y predictivos, utilizando distintos escenarios *what-if*, de modo de detectar los factores críticos en tareas dependientes. Dado que el modelo genera como resultado la probabilidad de error humano a partir de los factores que condicionan el desempeño, el análisis predictivo permite manejar el modelo en orden inverso, partiendo desde el evento de falla, y caracterizando el escenario que lo determina. Para esto, es necesario contar con información que describa específicamente los eventos de falla humana

y las diferentes dimensiones del escenario físico y psicológico en que se origina, lo cual, según la opinión de expertos, sigue siendo una dificultad en el mantenimiento minero en Chile.

Los beneficios se acompañan de ciertas **limitaciones** propias del modelo, tales como:

- Existe un nivel de riesgo de los resultados asociado al alcance y supuestos realizados en el modelo, motivo por el cual se presenta el potencial de enriquecer el modelo mediante data, de modo de reducir el nivel de incertidumbre.
- El modelo no incorpora la rápida identificación y remediación de la falla humana por parte del operador, cuyo potencial se asocia al monitoreo de parámetros posterior a la falla, a la existencia de procedimientos definidos para dar respuesta a la situación, y a la rapidez con que se asimila la llegada de nueva información (Ekanem, Mosleh & Shen, 2016).
- En el caso de no incorporar datos reales y robustos, la incertidumbre y subjetividad siguen siendo relevantes, generando resultados que estarán condicionados por la percepción del equipo experto. Lo mismo ocurre con el uso de PSFs indirectos, respecto a los directos, a pesar de que logren una mejor caracterización del escenario.
- La consideración de datos y mayores especificaciones del modelo pueden resultar en importantes esfuerzos computacionales.

Algunas **consideraciones** asociadas a la implementación del modelo se presentan a continuación:

- El modelo presentado es aplicable a la pequeña, mediana y gran minería, teniendo en cuenta que las organizaciones más maduras, que cuenten con más información (procesamiento de datos), estandarización de procesos y capacidad de gestión, optarán a resultados más precisos.
- Puede definirse como unidad de análisis del modelo una persona o un equipo de personas, adaptando la medición de factores determinantes del desempeño según

sea el caso. Sin embargo, mediante el análisis aplicado a un individuo es esperable obtener resultados más precisos, ya que la aplicación a equipos implica el uso del concepto de “individuo promedio”. Lo mismo ocurre en el caso de descomposición de tareas o actividades; mientras más específica sea la descomposición, más precisos pueden ser los resultados.

- La opinión de expertos debe constituirse mediante un comité que incluya profesionales de todas las áreas involucradas en los factores, trabajando en conjunto de modo de estandarizar los parámetros utilizados. Aunque el modelo se base en datos, es importante contar con un equipo multidisciplinario que interactúe directamente con todo el proceso de mantenimiento in situ.
- Puede implementarse un sistema de alerta que permita dar cuenta de un nivel crítico de probabilidad de error humano, dadas las condiciones de los factores determinantes del desempeño.
- La visión del potencial de aplicar datos en el modelo puede dar paso al desarrollo de una base de datos sobre el desempeño humano en minería, tanto en mantenimiento como en otras áreas de la industria. Este es el caso de SACADA Database Project (Chang et al., 2014), de la Comisión de Regulación Nuclear de EEUU (NRC), que reúne data e información sobre el desempeño humano para su aplicación en modelos de confiabilidad humana.
- El uso de datos implica modificar el código programado, de modo de reconocer las distribuciones de probabilidad de los datos ingresados y poder hacer *backtracking* para diagnósticos. Existen paquetes de datos disponibles para trabajar con Redes Bayesianas en Python.
- En línea con las estrategias de gestión del conocimiento, es de alta relevancia documentar los análisis realizados, y el proceso de mejora de la confiabilidad humana, de modo de que diferentes equipos de la cadena de valor puedan consultar la información (bases de datos, metodología, supuestos, etc.), abriendo paso a que se generen aportes desde diferentes áreas.

- Luego de la implementación el modelo puede validarse mediante cuatro criterios tomados del modelo HFACS (Patterson, 2009) para la taxonomía del error humano:
 - Confiabilidad: se refiere a la capacidad del modelo para obtener los mismos resultados independientemente de quién lleve a cabo la investigación y análisis.
 - Exhaustividad: es la capacidad del marco para identificar toda la información relacionada con un incidente.
 - Diagnósis: se refiere a la capacidad del modelo para identificar las relaciones entre errores junto con tendencias y causas.
 - Usabilidad: se refiere a la capacidad del marco para ser transferido desde usos teóricos y académicos para uso práctico dentro de la industria.

6. CONCLUSIONES

La presente investigación nace de la búsqueda por enfatizar la relevancia del capital humano en las organizaciones, desde una actividad que es estratégica para la industria minera: el mantenimiento de activos físicos.

Un diagnóstico realizado sobre el capital humano en el mantenimiento muestra que la tendencia en la industria es a la digitalización y automatización de las actividades, sobre todo aquellas de carácter manual. A su vez, las principales problemáticas identificadas son la búsqueda de calidad de ejecución y de la integración de los diferentes factores asociados a la gestión humana, la consideración del error humano en la planificación del mantenimiento, y las brechas en competencias requeridas para correcta la ejecución de las tareas.

Tomando en cuenta lo anterior, la oportunidad de desarrollo detectada es la necesidad de un modelo que integre sistemáticamente todos los factores asociados al capital humano en mantenimiento, con el objetivo de mejorar la calidad de ejecución de las actividades. Para esto, se propone la adaptación de un modelo cuantitativo de confiabilidad humana, proveniente del análisis probabilístico de riesgos en la industria nuclear, al mantenimiento mecánico de la industria minera.

El diseño del modelo adaptado tiene como base cualitativa la clasificación de actividades en rutinarias/no rutinarias y manuales/cognitivas, y la definición de ocho factores que determinan el desempeño humano en mantenimiento (PSFs), los cuales a su vez se agrupan en tres categorías; en la categoría “Tarea” se encuentran los factores “Requerimientos de la tarea” y “Recursos”, en la categoría “Organización” se encuentran los factores “Gestión del conocimiento”, “Trabajo en equipos naturales”, “Gestión del desempeño” y “Formación por competencias”, y finalmente en la categoría “Contexto” están las “Condiciones ambientales” y “Condiciones del sistema”. Cada factor a su vez tiene distintas consideraciones y métricas asociadas, tanto directas como indirectas. Es importante destacar que los factores de la categoría “Organización” calzan con las estrategias de confiabilidad humana definidas desde la teoría presentada por la literatura.

La asociación cuantitativa entre factores y actividades se realiza a través del método BN-SLIM, que fusiona el *Success Likelihood Index Methodology* (SLIM) y Redes Bayesianas. En concreto, para cada PSF el modelo toma distribuciones de probabilidad entre sus diferentes estados posibles, y calcula una matriz de índices de probabilidad de éxito (SLI) utilizando ponderadores asignados a cada factor, los cuales representan su influencia en la probabilidad de error humano. De forma conjunta, se calculan tablas de probabilidad condicional asociadas a cada elemento de la matriz de SLI. Luego, mediante parejas referenciales SLI-HEP, se traduce cada elemento SLI a una probabilidad de error humano (HEP), obteniéndose una única HEP luego de conectar cada elemento de la matriz con su probabilidad condicional. Este procedimiento se realiza con ponderadores diferentes para cada categoría de actividad, por lo que es posible obtener una HEP general del sistema, que engloba todas las categorías existentes. Finalmente, esta HEP se traduce en un diferencial del tiempo medio entre fallas del sistema (MTBF), respecto a un caso base inicial, obteniéndose un resultado significativo para toda la cadena de gestión de activos. Entre los principales beneficios del modelo se encuentra la cuantificación de aspectos considerados cualitativos por las organizaciones, su flexibilidad y versatilidad en cuanto a *inputs* y aplicaciones, el enriquecimiento del modelo mediante data, y la posibilidad de realizar diagnósticos y análisis predictivos.

A pesar de que el enfoque del estudio está en la presentación de la metodología adaptada, se llevó a cabo una aplicación teórica del modelo en 3 casos diferentes, a través de simulaciones, considerando un modelo gradual de mejora de los factores de 18 fases y una serie de supuestos definidos.

En el primer caso se aplica el modelo gradual de mejora de factores a todos los PSFs simultáneamente, obteniéndose una ventana de HEP que va desde el 75% en la peor condición de los factores (fase 1) y 10% en la mejor (fase 18), con porcentajes de cambio más significativos en las primeras fases; la traducción de estos valores al MTBF implica un diferencial de mejora de hasta un 43.5%.

En el segundo caso se aplica el modelo gradual de mejora de factores solo a los PSFs de la categoría Organización, manteniéndose constante el resto en un 50% nivel medio y 50%

nivel alto. Como resultado, se obtuvo una ventana de HEP que va desde el 33.8% en la peor condición de los factores (fase 1) y 13.3% en la mejor (fase 18), lo cual se traduce en un diferencial de mejora del MTBF de hasta un 27%.

En el tercer caso se aplica el modelo gradual de mejora de factores solo a Formación por Competencias, manteniéndose constante el resto en un 50% nivel medio y 50% nivel alto. Como resultado, se obtuvo una ventana de HEP que va desde el 22.2% en la peor condición de los factores (fase 1) y 15.3% en la mejor (fase 18), lo cual se traduce en un diferencial de mejora del MTBF de hasta un 12.2%.

Los resultados anteriores evidencian el potencial de aplicar una metodología que asocie los factores determinantes del desempeño en las actividades de mantenimiento minero, permitiendo, a través de un modelo versátil y flexible, aumentar el MTBF de un sistema a través de la gestión del capital humano, independiente de la etapa de madurez de la organización.

BIBLIOGRAFÍA

Abrishami, S., Khakzad, N. & Mahmoud, S. (2020a). A data-based comparison of BN-HRA models in assessing human error probability: An offshore evacuation case study. *Reliability Engineering and System Safety*, 202, 1-13.

<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107043>

Abrishami, S., Khakzad, N. & Van Gelder, P. (2019). Del2.8 – Methods to incorporate human factors within a multi-hazard approach. NARSIS Project (Grant Agreement No. 755439). Recuperado de

http://www.narsis.eu/sites/default/files/upload/documents/narsis_d2.8.pdf

Abrishami, S., Khakzad, N., Mahmoud, S. & Van Gelder, P. (2020b). BN-SLIM: A Bayesian Network methodology for human reliability assessment based on Success Likelihood Index Method (SLIM). *Reliability Engineering and System Safety*, 193, 1-10.

<https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106647>

Amendola, L. (2005). Modelo de Confiabilidad Humana en la Gestión de Activos. Recuperado de <http://www.mantenimientomundial.com/notas/0604AmendConf.pdf>

Amendola, L. (2016). Modelos Mixtos de Confiabilidad. España: PMM Institute for Learning.

Arata, A., & Furlanetto, L. (2005). Consideraciones generales de la gestión de activos y el mantenimiento. En A. Arata & L. Furlanetto (Eds.), *Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento* (1ra ed., pp. 3-46). Santiago, Chile: RIL Editores.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2003). *Los recursos humanos en un sistema de gestión de calidad: Gestión de las competencias* (UNE 66173). Madrid, España: Autor.

Banco Central de Chile. (2020). Base de Datos Estadísticos. Disponible en <https://si3.bcentral.cl/Siete/secure/cuadros/home.aspx>

Bieder, C., Le-Bot, P., Desmares, E., Bonnet, J. & Cara, F. (1998). MERMOS: EDF's New Advanced HRA Method, in *Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 4)*. New York, USA: Springer-Verlag.

Boring, R. (2010). How Many Performance Shaping Factors are Necessary for Human Reliability Analysis?. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/How-Many-Performance-Shaping-Factors-are-Necessary-Boring/3255adeaf0e9686a74f35fbebfb0ce>

Boring, R., Griffith, C. & Joe, J. (2007). The Measure of Human Error: Direct and Indirect Performance Shaping Factors. En *IEEE 8th Human Factors and Power Plants and HPRCT 13th Annual Meeting* (pp.170-176). Idaho, EEUU: Idaho National Laboratory.

Cáceres, M. (2004). Cómo Incrementar la Competitividad del Negocio mediante Estrategias para Gerenciar el Mantenimiento. Recuperado de <http://www.mantenimientomundial.com/notas/competitividad.pdf>

Calixto, E., Alves, G. & Alves, R. (2013). Comparing SLIM, SPAR-H and Bayesian Network Methodologies. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 3(2), 31-41. <http://dx.doi.org/10.4236/ojsst.2013.32004>

Cárcel Carrasco, F. (2016). La incidencia del factor humano en el mantenimiento. *3C Tecnología*, 5(1), 1-12. <http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno.2016.v5n1e17.1-12>

Chang, Y. & Mosleh, A. (2007). Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents. Part 2: IDAC performance influencing factors model. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(8), 1014-1040. <https://doi.org/10.1016/j.res.2006.05.010>

Chang, Y., Bley, D., Criscione, L., Kirwan, B., Mosleh, A., Madary, T., Nowell, R., Richards, R., Roth, E., Sieben, S., & Zoulis, A. (2014). The SACADA database for human reliability and human performance. *Reliability Engineering and System Safety*, 125(1), 117-133. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.07.014>

Consejo de Competencias Mineras (CCM). (2017). Marco de Cualificaciones para la Minería: Procesos de Mantenimiento. Recuperado de https://www.ccm.cl/wp-content/uploads/2017/04/4.-CCM2017_Cuadernillo_mantenimiento-2.pdf

Consejo de Competencias Mineras (CCM). (2018). Impacto de las nuevas tecnologías en las competencias requeridas por la industria minera. Recuperado de <https://fch.cl/publicacion/impacto-de-las-nuevas-tecnologias-en-las-competencias-requeridas-por-la-industria-minera/>

Consejo de Competencias Mineras (CCM). (2019). Fuerza laboral de la gran minería chilena 2019-2028: Diagnóstico y Recomendaciones. Recuperado de <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/fuerzalaboral2019-2028.pdf>

Cooper, S., Ramey-Smith, A., Wreathall, J., Parry, G., Bley, D., Luckas, W., Taylor, J. & Barriere, M. (1996). *A Technique for Human Error Analysis (ATHEANA)* (NUREG-6359). Washington, D.C: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Daniels, A. (1993). *Gerencia del Desempeño*. (3ra Ed.). Bogotá, Colombia: Editorial McGraw Hill.

Di Pascuale, V., Iannone, R., Miranda, S. & Riemma S. (2013). An Overview of Human Reliability Analysis Techniques in Manufacturing Operations. <http://dx.doi.org/10.5772/55065>

Díaz Povedano, G. & Díaz Serrano, G. (2015a). La Terotecnología (El Mantenimiento Clase Mundial) I Parte. *Predictiva* 21, 2(9), 34-38. Recuperado de

<https://predictiva21.com/wp-content/uploads/2019/03/Predictiva21-A2N9-2015-Abr-May.pdf>

Díaz Povedano, G. & Díaz Serrano, G. (2015b). La Terotecnología (El Mantenimiento Clase Mundial) II Parte. *Predictiva 21*, 2(10), 68-75. Recuperado de <https://predictiva21.com/wp-content/uploads/2019/03/Predictiva21-A2N10-2015-Jun-Jul-min.pdf>

Ekanem, N., Mosleh, A. & Shen, S. (2016). Phoenix – A model-based Human Reliability Analysis methodology: Qualitative Analysis Procedure. *Reliability Engineering and System Safety*, 145, 301-315.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.07.009>

Electrical Power Research Institute. (1992). *SHARP1 – A Revised Systematic Human Action Reliability Procedure* (EPRI TR-101711). Palo Alto, California, USA.

Embrey, D. (1986). A systematic approach for assessing and reducing human error in process plants. Dalton, England: Human Reliability Associates Ltd.

Embrey, D., Humphreys, P., Rosa, E., Kirwan, B. & Rea, K. (1984). SLIM-MAUD: an approach to assessing human error probabilities using structured expert judgment. Volume II: Detailed analysis of the technical issues. Brookhaven National Lab: USA.

Espinosa, L., Rebolledo, A., Irausquín, I. & Quiroga, A. (2012). Study of Human Reliability in Aircraft Maintenance. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 35(3), 270-278.

Estupiñan, E. & Atibiche, R. (diciembre, 2019). *Análisis sobre las tendencias, avances y desafíos del mantenimiento en la industria minera de Chile*. Presentación en 16° Congreso Internacional de Mantenimiento Minero MAPLA MANTENIM, Santiago, Chile.

Forester, J., Kolaczowski, A., Cooper, S., Bley, D. & Lois, E. (2007). *ATHEANA user's guide* (NUREG-1880). Washington, D.C: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Fundación Chile. (2018). Marco de Cualificaciones Mantenimiento 4.0. Recuperado de <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/07/marco-de-cualificaciones-mtto-4-0.pdf>

Galizia, A., Duval, C., Serdet, E., Weber, P., Simon, C. & Iung, B. (2015). Advanced investigation of HRA methods for probabilistic assessment of human barriers efficiency in complex systems for a given organizational and environmental context. Recuperado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01237119>

Galyean, W. (2006). Orthogonal PSF taxonomy for human reliability analysis. <https://doi.org/10.1115/1.802442.paper207>

Gárate, C. (2020). Desafíos y evolución de las competencias en Chile. Recuperado de <https://www.moddos.cl/desafios-y-evolucion-de-las-competencias-en-chile/>

García, O. (2006). La Confiabilidad Humana en la Gestión del Mantenimiento. Recuperado de <http://www.verriveritatis.com.br/Toro/outubro2010/Confiabilidad-Humana.pdf>

García, O. (2012). La Confiabilidad Humana elemento esencial de la Gestión de Activos. Recuperado de <https://es.slideshare.net/OliverioGarciaPalencia/confiabilidad-humana-elemento-esencial-de-la-gestin-de-activos-ogp-2012>

García, O. (2013). La Confiabilidad Humana Clave de la Sostenibilidad Industrial. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/320540275>

García, O. (s.f.). Gestión Integral de Mantenimiento Basada en Confiabilidad. Recuperado de <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/gestion-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/>

- Gertman, D., Blackman, H., Marble, J., Byers, J. & Smith, S. (2005). *The SPAR-H human reliability analysis method* (NUREG-6883). Washington, D.C: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Groth, K. & Mosleh, A. (2012). A data-informed PIF hierarchy for model-based Human Reliability Analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 108, 154-174.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2012.08.006>
- Groth, K. (2009). *A Data-Informed Model of Performance Shaping Factors for Use in Human Reliability Analysis*. (Tesis Doctoral, University of Maryland, College Park, EEUU). Recuperado de <http://hdl.handle.net/1903/9975>
- Groth, K., Smith, C. & Swiler, L. (2014). A Bayesian method for using simulator data to enhance human error probabilities assigned by existing HRA methods. *Reliability Engineering and System Safety*, 128, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.03.010>
- Guttman, H., Swain, A. (1983). *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- Hallbert, B., Whaley, A., Boring, R., McCabe, P. & Chang, Y. (2007). *Human Event Repository and Analysis (HERA): The HERA Coding Manual and Quality Assurance* (NUREG-6903). Washington, D.C: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Hannaman, G., Spurgin, A. & Lukic, Y. (1985). A model for assessing human cognitive reliability in PRA studies. *IEEE Third Conference on Human Factors and Power Plants*. Monterey, USA.
- Hollnagel, E. (1993). *Human reliability analysis: context and control*. Michigan, USA: Academic press.
- Hollnagel, E. (1998). *Cognitive reliability and error analysis method*. Oxford, UK: Elsevier.

International Electrotechnical Commission (IEC). (2010). *International Standard: Guidance on human aspects of dependability* (IEC 62508). Geneva, Switzerland: Autor.

International Organization for Standardization (ISO). (2015). *International Standard: Quality management systems — Fundamentals and vocabulary* (ISO 9000). Geneva, Switzerland: Autor.

Kim, M., Seong, P. & Hollnagel, E. (2006). A probabilistic approach for determining the control mode in CREAM. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(2), 191-199. <https://doi.org/10.1016/j.res.2004.12.003>

Kirwan, B. (1997). The development of a nuclear chemical plant human reliability management approach: HRMS and JHEDI. *Reliability Engineering and System Safety*, 56(2), 107-133. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(97\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00006-9)

Kirwan, B., Gibson, H., Kennedy, R., Edmunds, J., Cooksley, G. & Umbers, I. (2005). Nuclear action reliability assessment (NARA): a databased HRA tool. *Safety & Reliability*, 25(2), 38-45.

Kolaczowski, A., Forester, J., Louis, E. & Cooper, S. (2005). *Good Practices for Implementing Human Reliability Analysis* (NUREG-1792). Washington, D.C: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Kosmowski, K., Degen, G., Mertens, J. & Reer, B. (1994). Development of advanced methods and related software for human reliability evaluation within probabilistic safety analyses.

Labrin, M. & Lomuscio, C. (diciembre, 2019). *Desarrollo de competencias en la ingeniería del mantenimiento en Codelco*. Presentación en 16° Congreso Internacional de Mantenimiento Minero MAPLA MANTENIM, Santiago, Chile.

Latino, C. (2002). Definición y Logro de la Cultura de Confiabilidad. Recuperado de <http://www.mantenimientomundial.com/notas/11cultura.pdf>

Leal, V. (2017). Confiabilidad en el Talento Humano para Organizaciones Exitosas. *Predictiva2*, 1(20), 16-23. Recuperado de <https://predictiva21.com/wp-content/uploads/2019/03/Predictiva21-A4N20-2017-Feb-Mar-min.pdf>

Li, W., & Harris, D (2006). Pilot Error and Its Relationship with Higher Organizational Levels: HFACS Analysis of 523 Accidents. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 77(10), 1056-1061.

Louit, D. (julio, 2012). Mantenimiento: Un proceso estratégico. Presentación en 6° Seminario de Acercamiento Tecnológico, Calama, Chile.

Mining & Heavy Industry Robotics (MIRS). (2018). Soluciones robóticas para la minería e industria pesada. Recuperado de <http://mirsrobotics.com/wp-content/uploads/2018/03/Palmetas-Trommel.pdf>

Neyra, J. (s.f.). Extracto Confiabilidad Humana.

Nilo, E. (2005). El negocio de la mantención. En A. Arata & L. Furlanetto (Eds.), *Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento* (1ra ed., pp. 49-67). Santiago, Chile: RIL Editores.

Palady, P. (1995). *Failure modes and effects analysis*. West Palm Beach, Florida, USA: PT Publications.

Pascual, R. (2005). *El Arte de Mantener*. (2ª ed.). Santiago, Chile: [s.n.].

Patterson, J. (2009). Human error in mining: a multivariable analysis of mining accidents/incidents in Queensland, Australia and the United States of America using the human factors analysis and classification system framework. Recuperado de https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1464&context=all_dissertations

Petrella, C. & Joyanes, L. (2011). Gestionar el conocimiento: Una necesidad empresarial para sobrevivir en el siglo XXI. *Ventana Informática*, 1(25), 189-216.

<https://doi.org/10.30554/ventanainform.25.118.2011>

Quispe, J. (2018). Mantenimiento, un factor estratégico. Presentación en el curso Gestión de Equipos Mineros PUC, Santiago, Chile.

Skinner, R. (2015). Confiabilidad en la formación del recurso humano. *Predictiva 21*, 2(10), 48-49. Recuperado de <https://predictiva21.com/wp-content/uploads/2019/03/Predictiva21-A2N10-2015-Jun-Jul-min.pdf>

Swain, A. (1987). *Accident Sequence Evaluation Program: Human Reliability Analysis Procedure* (NUREG/CR-4772). Washington, D.C: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Symnetics. (2018). Estudio de Casos: Agenda 2020 de Productividad y Costos Codelco. Recuperado de https://www.symnetics.cl/wp-content/uploads/2019/10/CODELCO_Agenda_2020.pdf

Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7-39. doi: <http://dx.doi.org.pucdechile.idm.oclc.org/10.1108/13552510210420577>

Tvaryanas, A. P., W. T. Thompson, et al. (2006). Human Factors in Remotely Piloted Aircraft Operations: HFACS Analysis of 221 Mishaps Over 10 Years. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 77(7), 724-732.

US Nuclear Regulatory Commission. (2000). *Technical basis and implementation guidelines for a technique for human event analysis (ATHEANA)* (NUREG-1624). Washington, DC, USA.

Valamis. (s.f.). Human Resource Analytics. Recuperado de <https://www.valamis.com/hub/hr-analytics>

Vázquez, M. & Valbuena, F. (2010). La Pirámide de Necesidades de Abraham Maslow. Recuperado de

<http://cleuadistancia.cleu.edu.mx/cleu/flash/PAG/lecturas/poligrafia/Piramide%20necesidades%20Maslow.pdf>

Williams, J. (1992). Toward an improved evaluation analysis tool for users of HEART. *International Conference on Hazard Identification and Risk Analysis, Human Factors and Human Reliability in Process Safety* (pp. 261-280). Orlando, Florida, USA.

ANEXOS

ANEXO A: UNIDADES DE COMPETENCIA LABORAL EN MANTENIMIENTO MECÁNICO

Rutinarias-Manuales	Rutinarias-Cognitivas	No rutinarias-Cognitivas
• Mantener frenos mecánicos. • Mantener sistemas de lubricación. • Mantener sistemas neumáticos. • Apoyar la instalación y desinstalar correas transportadoras. • Apoyar la vulcanización de correas. • Instalar y desinstalar correas transportadoras. • Mantener bombas centrífugas. • Mantener correas transportadoras y alimentadores. • Mantener en forma básica correas transportadoras y alimentadores. • Mantener motores diésel. • Mantener sistemas de piping de acero. • Mantener sistemas de piping de polímeros. • Mantener sistemas de transmisión. • Mantener sistemas hidráulicos. • Mantener válvulas. • Mantener ventiladores. • Monitorear funcionamiento de equipos mina con herramientas eléctricos electrónicas. • Realizar ensayos de partículas magnéticas. • Realizar ensayos mecánicos de espesor y control dimensional.	• Mantener sistema de regulación de temperatura. • Operar puente grúa (mtto. mecánico). • Realizar análisis e interpretación de ensayos NDT. • Diagnosticar y reemplazar bombas de desplazamiento positivo. • Mantener elementos de desgaste. • Realizar ensayos mecánicos de dureza.	• Coordinar y supervisar actividades de vulcanización/ cambios de correas transportadoras. • Mantener sistemas hidráulicos (especialista). • Realizar cambio de parámetros de motores de equipos mina con herramientas electrónicas. • Coordinar actividades de ensayos NDT. • Coordinar actividades de mantenimiento. • Diagnosticar y reemplazar bombas de desplazamiento positivo (especialista). • Mantener frenos mecánicos (especialista). • Mantener motores diésel (especialista). • Mantener sistemas de transmisión (especialista). • Mantener sistemas neumáticos (especialista). • Mantener válvulas (especialista).

• Realizar ensayos mecánicos de lubricantes. • Realizar ensayos mecánicos de radiografías. • Realizar ensayos mecánicos de ultrasonido. • Realizar ensayos mecánicos de vibraciones. • Realizar ensayos mecánicos eléctricos armónicos. • Realizar mantenimiento mecánico básico de equipos fijos. • Realizar mantenimiento mecánico básico de equipos móviles. • Realizar soldadura al arco (convencional), mig y tig. • Realizar soldadura con arco (convencional). • Realizar vulcanización de correas.		
--	--	--

(Fuente: Consejo de Competencias Mineras, 2018)

ANEXO B: CONSIDERACIONES PRÁCTICAS ASOCIADAS A LOS PERFORMANCE SHAPING FACTORS

(Hallbert, Whaley, Boring, McCabe & Chang, 2007)

Human Event Repository & Analysis (HERA) Worksheet, Part B

Section 3: Positive Contributory Factors / PSF Details

Indicate any positive factors beyond what is nominally expected that contributed to the subevent. Check all that apply; if no details apply for a PSF category, check None. Indicate whether the detail is selected based on evidence directly from the source or if it is coder inference. Leave a detailed comment, with reference to the source document. This information is used to determine the Performance Shaping Factor (PSF) level in Section 5. This table continues on the next page.

PSF	Positive Contributory Factor	Source / Inference	Comment
Available Time	☐ More than sufficient time given the context	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Stress & Stressors	☐ Enhanced alertness / no negative effects	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Complexity	☐ Failures have single vs. multiple effects	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Causal connections apparent	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Dependencies well defined	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Few or no concurrent tasks	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Action straightforward with little to memorize	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ and with no burden		
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Experience & Training	☐ Frequently performed / well-practiced task	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Well qualified / trained for task	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Procedures & Reference Documents	☐ Guidance particularly relevant and correctly directed the correct action or response	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Ergonomics & HMI	☐ Unique features of HMI were particularly useful to this situation	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Fitness for Duty / Fatigue	☐ Optimal health / fitness was key to the success	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Work Processes	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	

PSF	Positive Contributory Factor	Source / Inference	Comment
Planning / Scheduling	☐ Correct work package development important to the success	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Work planning / staff scheduling important to the success	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Supervision / Management	☐ Clear performance standards	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Supervision properly involved in task	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Supervision alerted operators to key issue that they had missed	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Pre-task briefing focused on failure scenario that actually occurred / discussed response plans that were directly applicable	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Pre-task briefing alerted operators to potential problems in a way that made them alert to the situation that developed	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Conduct of Work	☐ Quick identification of key information was important to success	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Error found by 2nd checker, 2nd crew, or 2nd unit	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Important information easily differentiated	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Determining appropriate procedure to use in unique situation was important to success	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Complex system interactions identified and resolved	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Remembered omitted step	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Difficult or potentially confusing situation well understood	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Safety implications identified and understood in a way that was important to success	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Acceptance criteria understood and properly applied to resolve difficult situation	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Proper post-modification testing identified and ensured resolution of significant problem	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Problem Identification & Resolution (PIR) / Corrective Action Plan (CAP)	☐ Good trending of problems was important in correct diagnosis / response plan revision	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Adaptation of industry notices / practices was key to correct diagnosis / response plan verification	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Good corrective action plan avoided serious problems	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Communication	☐ Communications practice was key to avoiding severe difficulties	☐ Source ☐ Inferred	

PSF	Positive Contributory Factor	Source / Inference	Comment
	☐ Other: _____	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Environment	☐ Environment particularly important to success	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other: _____	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Team Dynamics / Characteristics	☐ Extraordinary teamwork and / or sharing of work assignments was important to success	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Exceptional coordination / communications clarified problems during event	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other: _____	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	

Section 4: Negative Contributory Factors / PSF Details

Indicate any negative factors that contributed to the subevent. Check all that apply; if no details apply for a PSF category, check None. Indicate whether the detail is selected based on evidence directly from the source or if it is coder inference. Leave a detailed comment, with reference to the source document. This information is used to determine the Performance Shaping Factor (PSF) level in Section 5. This table continues over the next three pages.

PSF	Negative Contributory Factor	Source / Inference	Comment
Available Time	☐ Limited time to focus on tasks	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Time pressure to complete task	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Inappropriate balance between available and required time	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other: _____	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Stress & Stressors	☐ High stress	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other: _____	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Complexity	☐ High number of alarms	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Ambiguous or misleading information present	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Information fails to point directly to the problem	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Difficulties in obtaining feedback	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ General ambiguity of the event	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Extensive knowledge regarding the physical layout of the plant is required	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Coordination required between multiple people in multiple locations	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Scenario demands that the operator combine information from different parts of the process and information systems	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Worker distracted / interrupted (W2 198)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Demands to track and memorize information	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Problems in differentiating important from less important information	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Simultaneous tasks with high attention demands	☐ Source ☐ Inferred	

PSF	Negative Contributory Factor	Source / Inference	Comment
	☐ Components failing have multiple versus single effects	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Weak causal connections exist	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Loss of plant functionality complicates recovery path	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ System dependencies are not well defined	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Presence of multiple faults	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Simultaneous maintenance tasks required or planned	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Causes equipment to perform differently during the event	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Subevent contributes to confusion in understanding the event	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Experience & Training	☐ Fitness for Duty (FFD) training missing / less than adequate (LTA) (F 124)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Training LTA (T 100)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Training process problem (T 101)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Individual knowledge problem (T 102)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Simulator training LTA (T4 103)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Work practice or craft skill LTA (W2 188)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Not familiar with job performance standards	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Not familiar / well practiced with task	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Not familiar with tools	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Not qualified for assigned task	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Training incorrect	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Situation outside the scope of training	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Procedures & Reference Documents	☐ No procedure / reference documents (P 110)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Procedure / reference document technical content less than adequate (LTA) (P 111)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Procedure / reference document contains human factors deficiencies (P 112)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Procedure / reference document development and maintenance LTA (P 113)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Procedures do not cover situation	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Ergonomics & HMI	☐ Alarms / annunciators less than adequate (LTA) (H1)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Controls / input devices LTA (H2)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Displays LTA (H3)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Panel or workstation layout LTA (H4)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Equipment LTA (H5)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Tools and materials LTA (H6)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Labels LTA (H7)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	

PSF	Negative Contributory Factor	Source / Inference	Comment
Fitness for Duty / Fatigue	☐ Working continuously for considerable number of hours	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Working without rest day for considerable time	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Unfamiliar work cycle	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Frequent changes of shift	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Problem related to night work	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Circadian factors / individual differences (F 127)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Impairment (F 129)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other: _____	☐ Source ☐ Inferred	
Work Processes	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other: _____	☐ Source ☐ Inferred	
Planning / Scheduling	☐ Work planning does not control excessive continuous working hours (F 125)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Inadequate staffing / task allocation (W1 181)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Scheduling and planning less than adequate (LTA) (W1 180)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Work package quality LTA (W1 182)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other: _____	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Supervision / Management	☐ Administrative assurance of personnel ability and qualification to perform work less than adequate (LTA) (F 120-122)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Inadequate supervision / command and control (O1 130)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Management expectations or directions less than adequate (O1 131)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Duties and tasks not clearly explained / work orders not clearly given	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Progress not adequately monitored	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Inadequate control of contractors	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Frequent task re-assignment	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Pre-job activities (e.g., pre-job briefing) LTA (W1 183)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Safety aspects of task not emphasized	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Informally sanctioned by management	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Formally sanctioned workarounds cause problem	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other: _____	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Self-check less than adequate (LTA) (W2 197)	☐ Source ☐ Inferred	
Conduct of Work	☐ Improper tools or materials selected / provided / used	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Necessary tools / materials not provided or used	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Information present but not adequately used	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Failure to adequately coordinate multiple tasks / task partitioning / interruptions	☐ Source ☐ Inferred	

PSF	Negative Contributory Factor	Source / Inference	Comment
	☐ Fitness for Duty self-declaration LTA (F 123)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Fitness for Duty non-compliance (F 128)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Control room sign off on maintenance not performed	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Tag outs LTA (W1 184)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Second independent checker not used or available	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Work untimely (e.g., too long, late) (W2 192)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Housekeeping LTA (W2 194)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Logkeeping or log review LTA (W2 195)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Independent verification / plant tours LTA (W2 196)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Procedural adherence LTA (W2 185)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Failure to take action / meet requirements (W2 186)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Action implementation LTA (W2 187)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Recognition of adverse condition / questioning LTA (W2 189)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Failure to stop work / non conservative decision making (W2 190)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Non-conservative action (W2 193)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Failure to apply knowledge	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Failure to access available sources of information	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Post-modification testing inadequate	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Post-maintenance testing inadequate	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Retest requirements not specified	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Retest delayed	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Test acceptance criteria inadequate	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Test results review inadequate	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Surveillance schedule not followed	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Situational surveillance not performed	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Required surveillance / test not scheduled	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Incorrect parts / consumables installed / used	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Failure to exclude foreign material	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Incorrect restoration of plant following maintenance / isolation / testing	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Independent decision to perform work around or circumvention	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Problem Identification & Resolution (PIR) / Corrective Action Plan (CAP)	☐ Problem not completely or accurately identified (R1 140)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Problem not properly classified or prioritized (R1 141)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Operating experience review less than adequate (LTA) (R1 142)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Failures to respond to industry notices or follow industry practices	☐ Source ☐ Inferred	

PSF	Negative Contributory Factor	Source / Inference	Comment
	☐ Tracking / trending LTA (R1 143)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Root cause development LTA (R2 145)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Evaluation LTA (R2 146)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Corrective action LTA (R3 147)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Action not yet started or untimely (R3 148)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ No action planned (R3 149)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ CAP Programmatic deficiency (R4 150)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Willingness to raise concerns LTA (R5 151)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Preventing and detecting retaliation LTA (R5 152)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Failure to resolve known problems in a prompt fashion	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Failure to maintain equipment in accordance with licensing basis	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Audit / self-assessment / effectiveness review LTA (R1 144)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Communication	☐ No communication / information not communicated (C 160)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Misunderstood or misinterpreted information (C 51)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Communication not timely (C 52)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Communication content less than adequate (LTA) (C 53)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Communication equipment LTA (C 162)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Environment	☐ Temperature / humidity less than adequate (LTA) (H10 71)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Lighting LTA (H10 72)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Noise (H10 73)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Radiation (H10 74)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Work area layout or accessibility LTA (H10 75)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Postings / signs LTA (H10 76)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Task design / work environment LTA (F 126)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Fire / smoke	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	
Team Dynamics / Characteristics	☐ Supervisor too involved in tasks, inadequate oversight	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Crew interaction style not appropriate to the situation	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Team interactions less than adequate (W2 191)	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ Other:	☐ Source ☐ Inferred	
	☐ None / Not Applicable / Indeterminate	☐ Source ☐ Inferred	

ANEXO C: EVALUACIÓN DE EFICACIA DE UNA ACCIÓN FORMATIVA

(Fuente: AENOR, 2003)

Para reflejar un reparto en seris etapas (por ejemplo) de una acción formativa:

- Detección, identificación de la necesidad;
- Definición del objetivo de la formación;
- Definición del objetivo pedagógico;
- Evaluación de la formación “en caliente” (en la teoría: formación pedagógica);
- Evaluación de la formación “en frío” (en la práctica: transferencia del conocimiento en el trabajo);
- Explotación de las evaluaciones.

Para evidenciar la eficacia de la acción formativa, se puede diseñar por ejemplo una matriz como la que se indica a continuación.

Evaluación y seguimiento de la formación																																				
Criterio o campo de la evaluación	Objetivos (cualitativos y cuantitativos)	Evaluación en caliente	Evaluación en frío	Observaciones																																
Personal afectado o implicado	Personal + Directivos + Responsable de formación	Personal	Personal + Directivos + Responsable de formación	Responsable de Formación + Dirección de Recursos Humanos																																
Organización material A B C D	Para cada criterio (A a D) describase el objetivo o las expectativas	Para cada epígrafe márquese la casilla correspondiente A <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> B <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> C <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> D <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	Para cada epígrafe márquese la casilla correspondiente A <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> B <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> C <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> D <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
Desarrollo de la acción A Planificación B Amenidad C		A <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> B <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> C <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> D <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	A <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> B <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> C <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> D <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
Contenido de la acción formativa		A <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> B <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> C <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> D <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	A <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> B <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> C <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> D <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
1	2	3	4																																	
Conocimientos teóricos esperados		¿Se han alcanzado los objetivos esperados <table><tr><td>SI</td><td>NO</td></tr></table> Si no ¿cuáles?	SI	NO	¿Se han alcanzado los objetivos esperados <table><tr><td>SI</td><td>NO</td></tr></table> Si no ¿cuáles?	SI	NO																													
SI	NO																																			
SI	NO																																			

(Continúa)

Evaluación y seguimiento de la formación				
Criterio o campo de la evaluación	Objetivos (cualitativos y cuantitativos)	Evaluación en caliente	Evaluación en frío	Observaciones
<i>Personal afectado o implicado</i>	<i>Personal + Directivos + Responsable de formación</i>	<i>Personal</i>	<i>Personal + Directivos + Responsable de formación</i>	<i>Responsable de Formación + Dirección de Recursos Humanos</i>
Nuevas competencias esperadas		¿Se han alcanzado los objetivos esperados ☐ SÍ ☐ NO Si no ¿cuáles?	¿Se han alcanzado los objetivos esperados ☐ SÍ ☐ NO Si no ¿cuáles?	
Aplicación de nuevos conocimientos		¿Se han alcanzado los objetivos esperados ☐ SÍ ☐ NO Si no ¿cuáles?	¿Se han alcanzado los objetivos esperados ☐ SÍ ☐ NO Si no ¿cuáles?	
*) 1 = mal; 2 = medio; 3 = bien; 4 = muy bien.				