

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
VALPARAÍSO – CHILE



DESARROLLO EXPLORATORIO DE MODELOS DE
CONCEPTOS ANALITICOS DE CONFIABILIDAD
HUMANA

MATIAS ANDRES ESPINOZA URZUA

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

PROFESOR GUÍA:

Dr. Ing. Pedro Sarego Pasten

PROFESOR CORREFERENTE:

Ing. Luis Guzmán Bonet

SEPTIEMBRE – 2018

**DESARROLLO EXPLORATORIO DE MODELOS DE
CONCEPTOS ANALITICOS DE CONFIABILIDAD
HUMANA**

2018

Agradecimientos

A mis padres.

Resumen

La Confiabilidad Humana como la capacidad de desempeño efectivo de las personas en un entorno laboral específico, se puede analizar por múltiples metodologías, que permiten definir las brechas y las debilidades que obstaculizan la mejora de la productividad industrial.

Cada cierto tiempo, alguna catástrofe nos recuerda que el eslabón más débil de un sistema de producción es el hombre, y por consiguiente, es a su vez el que tiene en sus manos la garantía y la confiabilidad de su funcionamiento. Se habla de error humano, se dice que la falta de confiabilidad en un sistema se debe a que, al fin y al cabo, está manejado por hombres.

Es necesaria una reflexión sobre este problema. El error humano es tratado como lo inevitable, lo que escapa siempre a lo controlable y medible, lo que parece titularse "de la imposibilidad de prever la estupidez y la torpeza humana".

El objetivo principal de esta tesis fue el desarrollo analítico exploratorio de modelos de conceptos fundamentales en materia de la confiabilidad humana. La finalidad fue acercar y proveer una visión conceptual y analítica de que el error humano es medible en cuanto a los límites y capacidades del hombre, así como los métodos usualmente aceptados en estas materias.

Abstract

Human Reliability as the capacity of effective performance of people in a specific work environment, can be analyzed by multiple methodologies, which allow to define the gaps and weaknesses that hinder the improvement of industrial productivity.

Every so often, some catastrophe reminds us that the weakest link in a production system is man, and therefore, in turn, he has the guarantee and reliability of its operation. There is talk of human error, it is said that the lack of reliability in a system is due to the fact that, after all, it is handled by men.

A reflection on this problem is necessary. Human error is treated as the inevitable, which always escapes controllable and measurable, which seems to be subtitled "of the impossibility of foreseeing stupidity and human clumsiness".

The main objective of this thesis was the exploratory analytical development of models of fundamental concepts in the field of human reliability. The purpose was to bring and provide a conceptual and analytical view that human error is measurable in terms of the limits and capabilities of man, as well as the methods usually accepted in these matters

Índice

Agradecimientos	3
Resumen.....	4
Abstract	5
Índice	6
1. Introducción	8
2. Objetivos	9
3. Desarrollo del tema.....	10
3.1 Estado del arte de la confiabilidad humana.....	10
3.1.1 Confiabilidad Humana con enfoque integral. (1).....	10
3.1.2 Etapas de un análisis de confiabilidad humana.	11
3.1.3 Causas de falla y neurofisiología de la conducta. (1)	13
3.1.4 Indicadores para medición y análisis neurofisiológico de la conducta.(4).....	15
3.1.5 Métodos actuales de Análisis de Confiabilidad Humana.	16
3.2 Marco teórico.....	23
3.2.1 Confiabilidad humana. (10).....	23
3.2.2 El error humano (8)	24
3.2.3 Estrategias de confiabilidad humana. (9).....	25
3.2.4 Cultura de confiabilidad humana. (9).....	29
3.2.5 Políticas de confiabilidad. (7)	30
3.2.6 La Gestión del Conocimiento. (3,5)	32
3.2.7 Organizaciones del conocimiento. (4).....	34
3.2.8 Evaluación de fallas humanas. (3)	35
3.2.9 Comportamientos humanos. (3)	35
3.2.10 Índices de evaluación y desempeño. (4)	36
3.2.11 Clasificación de fallas humanas. (4,5)	36
3.3 Análisis Cuantitativo de Confiabilidad Humana	40
3.3.1 Introducción al Análisis Cuantitativo de Confiabilidad Humana.....	40

3.3.2	Elementos de probabilidad. (10)	40
3.3.3	Cuantificación de Fallas Humanas.....	47
3.3.4	Principales ocurrencias de fallas.	49
3.3.5	Confiabilidad humana en eventos binarios.....	52
3.3.6	Tareas con baja tasa de falla.	57
3.3.7	Aplicación modelo de análisis de confiabilidad humana en planta térmica.....	59
4.	Conclusiones.....	64
5.	Referencias.....	65

1. Introducción

Dentro del campo de la gestión de activos, son múltiples los factores que afectan a la confiabilidad de los sistemas. Uno de los elementos principales y fundamentales que influyen en la confiabilidad de cualquier sistema de gestión de mantenimiento de activos, es lo que se conoce como “Factores Humanos”.

El interés y estudio de la influencia de los factores humanos dentro del campo del mantenimiento, se ha realizado principalmente en aquellos campos en los cuales la seguridad y confiabilidad son las normas principales, ya que los factores humanos juegan un papel principal en lo referente a la confiabilidad de los sistemas.

En este contexto, en las organizaciones actualmente no existen modelos que planteen la confiabilidad humana de forma concreta y cuantitativa, es decir, vista como una probabilidad contable, de tal forma de realizar análisis más matemáticos e ingenieriles. Es más, en la mayoría de las organizaciones corporativas ni siquiera se utilizan herramientas de confiabilidad tradicionales.

En esta tesis se pretende realizar una exploración en el ámbito de confiabilidad de sistemas, más profundamente en sistemas que relacionen los talentos humanos con la confiabilidad total. Se pretende proponer diversos modelos de análisis de confiabilidad humana, con los cuales sea posible de manera cuantitativa establecer probabilidades de falla humana, y con estos métodos mejorar y hacer más fiables los procesos.

En este sentido el trabajo a realizar será un aporte, debido a que la mayoría de la literatura disponible sobre el capítulo de la confiabilidad humana viene principalmente desde la psicología e incluso desde la sociología, por lo que se pretende entregar nuevas herramientas cuantitativas a la materia de confiabilidad humana, proveniente desde los campos de la Estadística.

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo de titulación es la propuesta y desarrollo exploratorio de modelos de conceptos analíticos de confiabilidad humana. Principalmente estos modelos están enfocados al análisis cuantitativo de la confiabilidad humana, imponiendo nuevas formas de análisis que no se ven actualmente en el estado del arte en esta materia, el cual está conformado por contenidos provenientes de los campos de la psicología y sociología.

Para lograr los objetivos generales se especifican a continuación los objetivos específicos a cumplir:

- Identificar los modelos conceptuales usualmente aceptados.
- Desarrollar la conceptualización analítica base sobre confiabilidad humana. (Error humano, Fallas humanas previstas y cuantificables, calificación humana para el rendimiento funcional y operacional en una organización.
- Estimar factores limitantes para el desempeño.
- Desarrollar métodos predictivos de confiabilidad humana
- Proponer métodos cuantitativos de confiabilidad humana.

3. Desarrollo del tema

3.1 Estado del arte de la confiabilidad humana.

3.1.1 Confiabilidad Humana con enfoque integral. (1)

La confiabilidad humana actualmente usada en distintas organizaciones se basa principalmente en soluciones del punto de vista integral, es decir, basando las hipótesis de análisis en materias provenientes de la psicología y sociología.

Además, tradicionalmente considera el aspecto de la confiabilidad y mantenibilidad de activos, así como también la confiabilidad en el proceso. En todos estos casos, en el centro de estos aspectos se relaciona la confiabilidad humana (Ilustración 1).

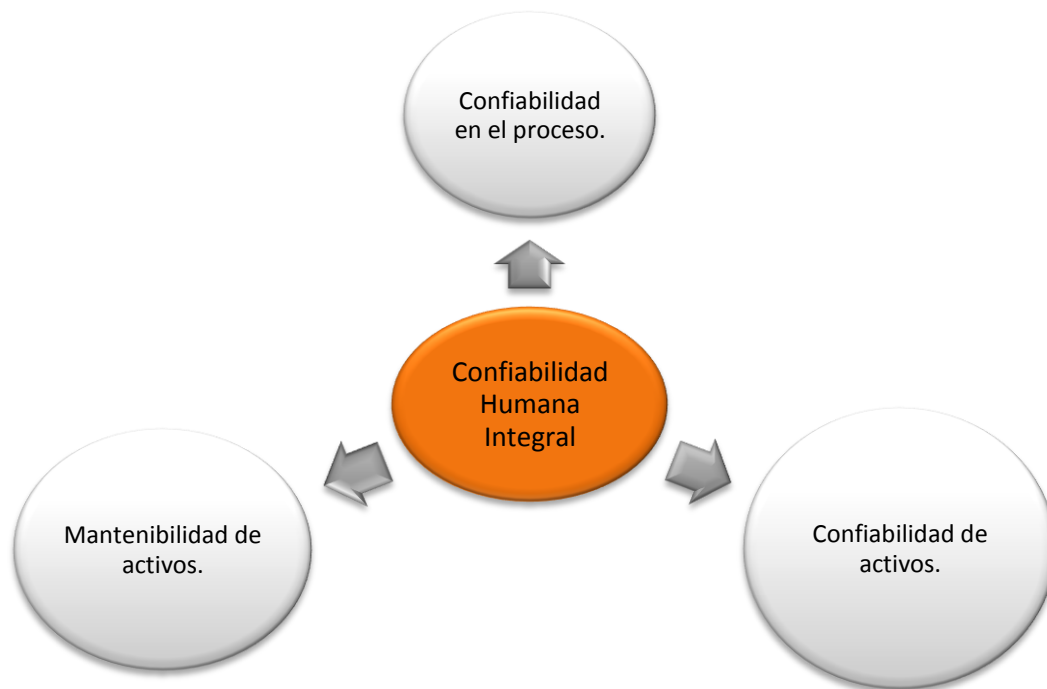


Ilustración 1: Elementos de la confiabilidad humana integral.(1)

En este modelo de confiabilidad se propone que los fundamentos para la aplicación en concreto, es que el ser humano es quien da vida a todos los elementos en un proceso productivo, por ende, es la mayor influencia en la confiabilidad total. (1)

Para este desarrollo, se estipula que la confiabilidad humana se soporta en tres pilares elementales en las organizaciones para la integración de la destreza del factor humano al modelo de confiabilidad humana:

- **Confiabilidad de procesos:** La confiabilidad de procesos viene siendo un factor clave en el éxito de las organizaciones. En mercados globalizados y cada vez más

competitivos, la misión de la fiabilidad en los procesos de producción es ofrecer una solución final que se reconozca como de valor superior. Para esto, la fiabilidad de los procesos y productos debe ser alta, es decir, los procesos deben ser estables, sin variaciones significativas, la información y los datos recogidos deben ser seguros y precisos, que permitan un buen análisis y la toma de decisiones gerenciales, además de promover transparencia y trazabilidad

- **Mantenibilidad de activos:** La mantenibilidad representa la probabilidad de que un activo (o conjunto de activos) en fallo, sea restaurado a su estado operativo, dentro de un tiempo determinado, cuando la acción de corrección se efectúa acorde a los procedimientos pre-establecidos, por ende, representa la capacidad de un activo para ser modificado efectiva y eficientemente, debido a necesidades evolutivas, correctivas o perfectivas.
- **Confiabilidad de activos:** Es la probabilidad de que un activo (o conjunto de activos) desempeñe su función, libre de fallos, y bajo determinadas condiciones, durante un periodo de tiempo también determinado. En definiciones más concisas se puede decir que, desde el punto de vista del mantenimiento, confiabilidad es una medida de la seguridad y del riesgo. Es un grado de confianza de que un activo cumplirá su función, bajo ciertas condiciones, durante un tiempo dado. Es la probabilidad de un desempeño libre de fallos, bajo condiciones especificadas.

3.1.2 Etapas de un análisis de confiabilidad humana.

Actualmente, para el estudio específico de confiabilidad humana se cuentan con varias etapas fundamentadas en una serie de acciones que se realizan dentro del sistema de producción (Ilustración 2).

Lo primero es conocer el principal problema que se tiene, para ello se inician dos etapas de diagnóstico:

- **Etapas N°1:** Medición y jerarquización de errores, identificación de las causas raíces de las fallas.
- **Etapas N°2:** Diagnóstico de actitud y aptitud del elemento humano y de la organización.

Luego, el procedimiento considera una tercera etapa de relación de acciones, la cual va dirigida al entendimiento del problema:

- **Etapas N°3:** Relación entre indicadores de conducta y las causas raíces, es decir una correlación entre la etapa uno y la etapa dos.

El estudio de confiabilidad humana continúa con una etapa que tiene que ver con la aceptación e integración del problema:

- **Etapa N°4:** Diseño de un plan de soluciones, es decir, plantear una serie de acciones a emprender que involucran al elemento humano que permiten mejorar, mitigar y desaparecer las causas que provocan fallas en el sistema.

Por último, el estudio comprende una última fase que es el actuar sobre el diseño planteado en la etapa N°4:

- **Etapa N°5:** Elaboración del programa de implantación estableciendo compromisos y cuantificando recursos.
- **Etapa N°6:** Implantación y validación.

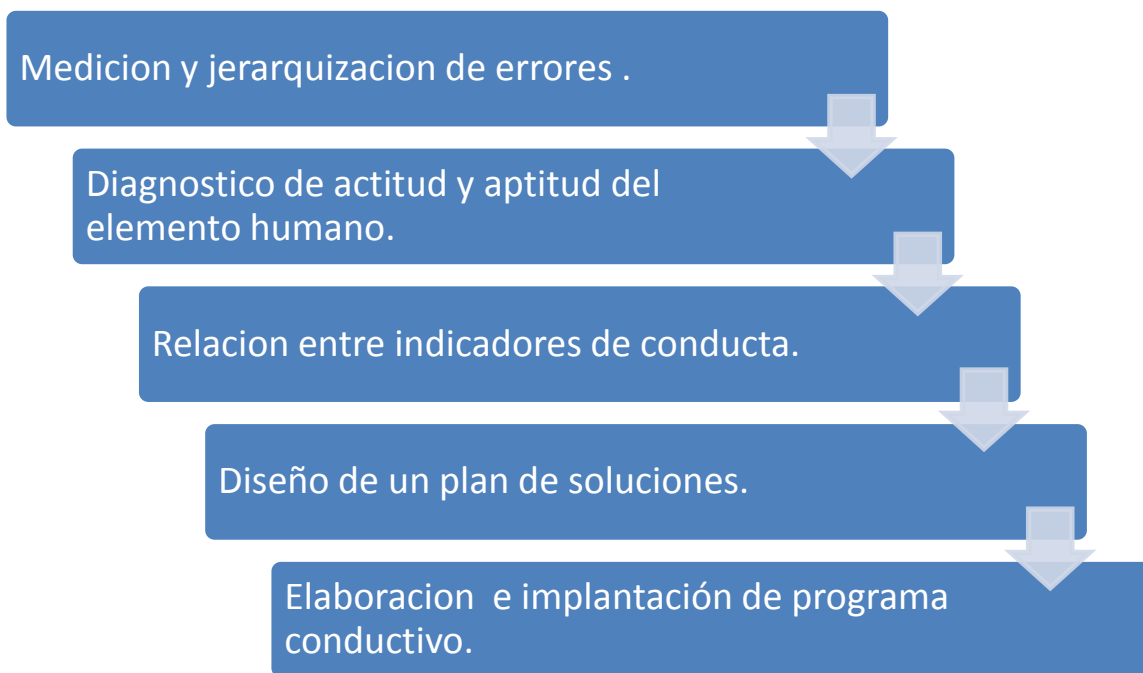


Ilustración 2: Etapas del desarrollo de confiabilidad humana en la actualidad. (1)

3.1.3 Causas de falla y neurofisiología de la conducta. (1)

Para ejecutar los análisis y hipótesis correspondientes, lo usual es rastrear las razones de falla, las que luego provocan la No-confiabilidad.

Como se mencionó anteriormente, las materias actuales en confiabilidad humana vienen dadas por conceptos psicológicos, es por esto que cuando se habla de fallas en el sistema de producción, se asume que una gran parte de ellas está asociada a la conducta del ser humano, es decir que están relacionadas directamente con las versiones de la psicología tradicional (Ilustración 3).

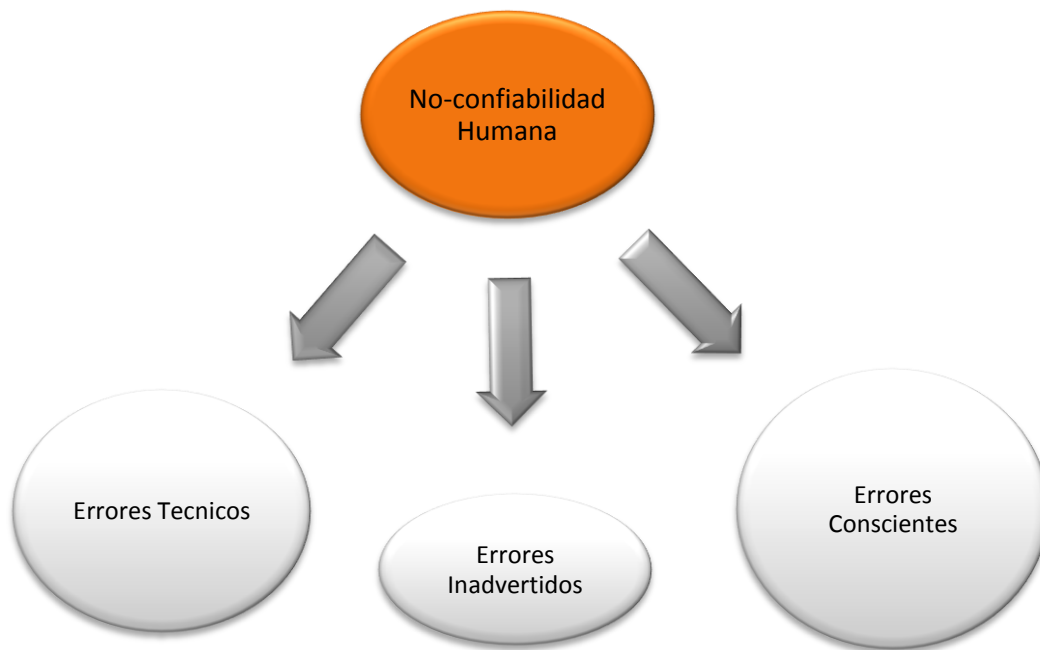


Ilustración 3: Elementos para el estudio de fallas humanas.(1)

En el estudio de las causas de fallas humanas, se tienen tres grandes campos de clasificación:

- **Errores Técnicos:** Se relacionan con la falta de formación, escasa capacidad o habilidad para realizar un trabajo determinado (Destreza).
- **Errores Inadvertidos:** Se caracterizan por ser inconscientes en el momento que se cometen. Es decir, los implicados no tienen la voluntad ni el deseo de equivocarse. Se relaciona con los vacíos mentales, la falta de atención y el exceso de confianza.

- **Errores Conscientes:** existe intencionalidad al cometer el error y con frecuencia es un reflejo que responde a decisiones desacertadas del personal de dirección. También, pueden deber su aparición a actitudes relacionadas con el ocultamiento de resultados pobres, o fraude para recibir favores derivados, desviaciones éticas para culpar a otros, sabotajes, etc.

Según estadísticas e historiales de organizaciones, la siguiente distribución es la que más se da:



Ilustración 4: Distribución normal de causas de fallas humanas. (1)

De acuerdo a la Ilustración 4, más del 50% de las fallas humanas provienen de causas en donde se notan faltas de destrezas y habilidades (pericia), es decir errores técnicos. Luego vienen las fallas por conocimiento, las cuales presentan una tendencia a la baja a medida que transcurre el tiempo (Aprendizaje). (5)

La tercera causa de falla es debido a la personalidad y motivación (errores conscientes), esta se da en menor medida, ya que se asume que las personas que trabajan en una organización determinada lo hacen por desarrollo personal y profesional más que por incentivos monetarios, esto claro, en la teoría. Luego, la motivación esta mediada en los circuitos de recompensa del cerebro, y depende del grado de satisfacción de las necesidades. En tanto, la personalidad está mediada entre circuitos de la emoción y de la razón, en el cerebro y se define gradualmente desde etapas tempranas de la vida, en función de sexo-genero, memoria-aprendizaje y experiencia emocional.

3.1.4 Indicadores para medición y análisis neurofisiológico de la conducta.(4)

Para la mejor y más eficiente evaluación de las variables neurofisiológicas, actualmente se utilizan indicadores sobre los individuos, en donde interactúan las medidas de Actitud (Personalidad y motivación) y Aptitud (Conocimiento y destrezas). (Ilustración 5) (4)

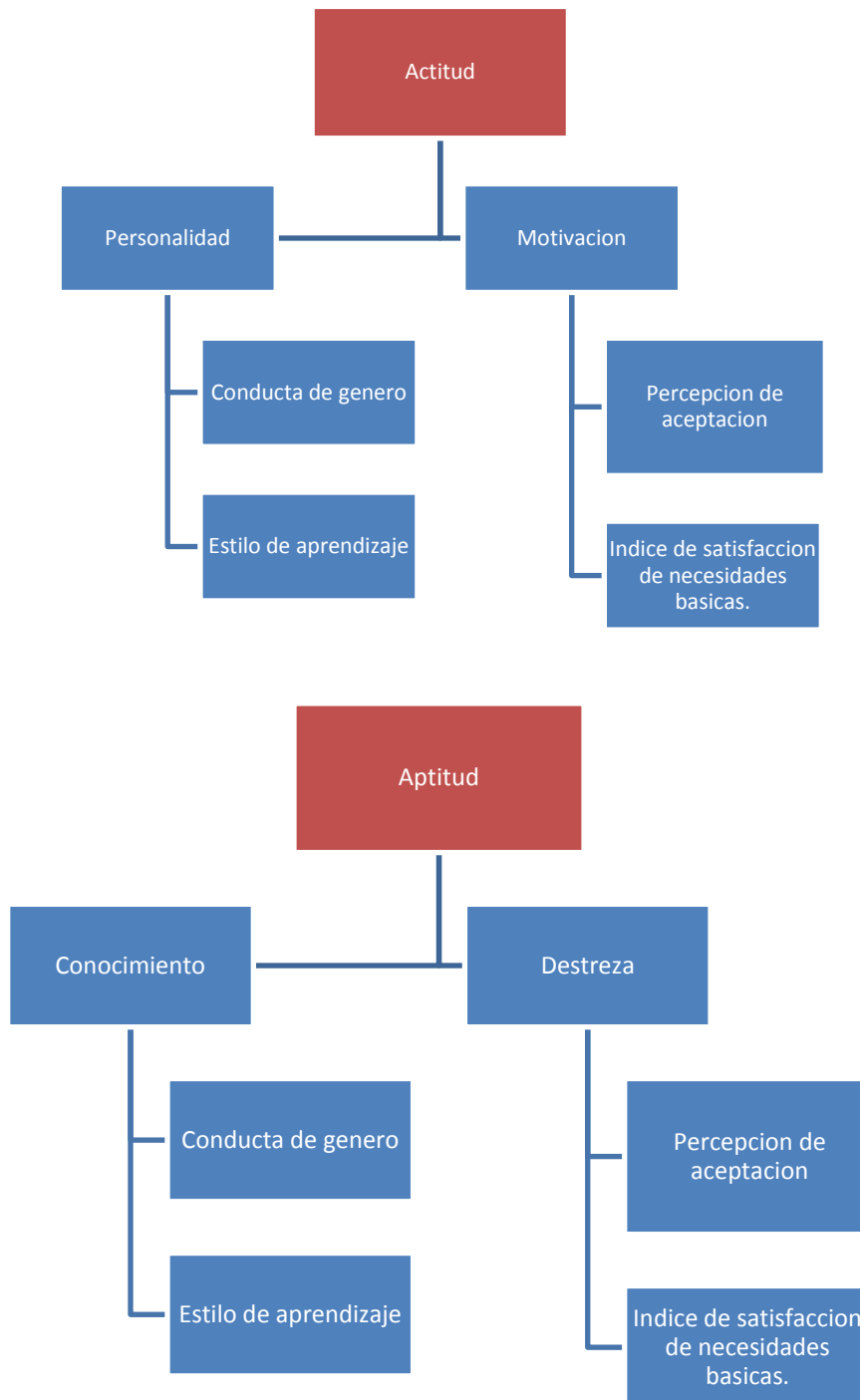


Ilustración 5: Indicadores para medición y análisis neurofisiológico de la conducta.(4)

3.1.5 Métodos actuales de Análisis de Confiabilidad Humana.

En la actualidad existen métodos de análisis para la confiabilidad humana que, si son ejecutados de manera óptima y metódica, dan buenos resultados.

A continuación se nombran algunos métodos analíticos que se usan con frecuencia en organizaciones corporativas:

- Análisis de Confiabilidad Humana (HRA)

El Análisis de Confiabilidad Humana (HRA) es una técnica usada para identificar, analizar y documentar sistemáticamente los posibles modos de falla humanos dentro de un proyecto, y los efectos de las fallas sobre la confiabilidad global de los activos. Los análisis del comportamiento y las necesidades de los seres humanos están entre las más polémicas de las ciencias; no es extraño que existan múltiples enfoques compitiendo por el manejo y la tipificación de los problemas humanos. Como se dijo anteriormente, la técnica cuantitativa de HRA más ampliamente usada es la “Technique for Human Error Rate Prediction” (THERP). (3)

- Método THERP (Technique for Human Error Rate Prediction):

El método THERP es uno de los más antiguos y más ampliamente utilizado en los análisis de confiabilidad humana en organizaciones recientes. Se define como:

"Un método para predecir las probabilidades de error humano y evaluar la posible degradación del sistema hombre-máquina debida a errores humanos aislados o en conexión con el funcionamiento del equipo, a procedimientos o prácticas operacionales, o a otras características humanas o del sistema que influyen en la conducta de éste".

La situación ideal para el desarrollo del THERP y de cualquier otro método es la disponibilidad de datos cuantitativos de respuestas humanas en situaciones específicas que avalaran el desarrollo de modelos de las tareas.

Sin embargo, debido a la escasez de datos sobre tareas, para el método THERP se optó por utilizar un modelo genérico y descriptivo del hombre como un componente del sistema hombre-máquina y emplearlo como referente de modelos de ejecución humana específicos (de pequeñas acciones o aspectos concretos del comportamiento) de los que sí se disponía de ciertos datos. Para ello el método descompone las acciones humanas en el sistema en tareas, sub-tareas y pasos, emplear los datos existentes y finalmente combinarlos para obtener la probabilidad de fallo total en una tarea, prestando especial atención a que los resultados fueran coherentes con el conocimiento que de la actividad humana se tiene en los campos de la Psicología y Sociología.

La utilización del método THERP implica la realización de las cuatro actividades siguientes:

- **Familiarización con el entorno de trabajo:** Implica una primera etapa de conocimiento del trabajo realizado por los analistas de sistemas (diagramas de sucesos y de fallos, visita a la instalación, conocer los procedimientos de operación, mantenimiento, emergencia disponibles, sistema de control administrativo, nivel de experiencia de los operadores...).
- **Análisis cualitativo:** Consiste en la realización de una evaluación de la interacción hombre-máquina mediante un análisis que consta de los siguientes pasos:
 - Descripción de las funciones y objetivos del sistema. La finalidad es detectar las intervenciones humanas.
 - Descomposición de las tareas en sub-tareas y pasos, describir sus características (instrumentos utilizados, señales para su iniciación y finalización...) y seleccionar los pasos y tareas con posible incidencia en la falla humana.
 - Identificar las situaciones que puedan dar lugar a errores humanos en las tareas (factores externos e internos que influyen en el comportamiento), para seleccionar los pasos en que pueden producirse errores o falencias.
- **Análisis cuantitativo:** Consiste en la asignación de probabilidades nominales a los errores detectados como posibles en las tareas, subtareas y pasos analizados. Posteriormente se modifican por la influencia de los FIC relevantes (experiencia, estrés, dependencia y otros que se consideren con incidencia); se obtiene la probabilidad total de fallo en la tarea y se asignan los límites de incertidumbre. Finalmente se evalúan los efectos de los factores de recuperación.
- **Incorporación:** La realización de análisis de sensibilidad, si se requiere, y del suministro de la información obtenida a los analistas de sistemas de la organización correspondiente.

El THERP facilita una herramienta para la utilización en las fases de análisis cualitativo y cuantitativo denominada árbol de sucesos de fiabilidad humana (HRA Event Tree). El árbol comienza en cualquier punto de una actividad desarrollada por el hombre en el sistema, siguiendo una lógica temporal (del inicio de la tarea al final de la misma), mostrándose gráficamente sólo los pasos de la tarea con incidencia en las fallas.

El THERP modela los pasos de la tarea en una secuencia de nudos de decisión binaria. En cada nudo se plantean dos supuestos: la sub-tarea puede realizarse correcta o incorrectamente. Las probabilidades de acierto y de fallo deben sumar 1. Las probabilidades asignadas a todas las actividades humanas representadas en el árbol son condicionales, excepto la correspondiente al primer nudo de decisión, a no ser que ésta dependa de otro árbol o sea una tarea basada en la probabilidad de algún suceso previo.

En la Ilustración 20 se aprecia el árbol de sucesos de fiabilidad humana. Se ilustra un ejemplo muy simple de un árbol en el que están representadas dos tareas "A" y "B". Las probabilidades de acierto son notadas con letras minúsculas (a y b) y las probabilidades de fallo con letras mayúsculas: A y B. Debido a que la tarea "A" es siempre realizada en primer lugar, la probabilidad asociada con la tarea "B" está siempre condicionada al resultado de la tarea "A". La interdependencia de las tareas "A" y "B" se representa por los símbolos b/a, B/a, b/A y B/A.

Una vez realizada la representación (construido el árbol) y atribuidas a cada nudo de decisión las probabilidades de éxito o fallo, se calcula la probabilidad final para cada una de las ramas en que el árbol se ha subdividido. Las tareas representadas en un árbol HRA pueden constituir un sistema en serie o en paralelo:

- Un sistema en serie es aquel cuyo éxito total depende de que se realicen acertadamente, en el caso de la Ilustración 4, las tareas "A" y "B". El éxito está representado en una única rama del árbol cuya probabilidad es igual al producto de a y b/a.
- Un sistema en paralelo es aquel cuyo éxito depende tan sólo de que se realice, en el caso del ejemplo, acertadamente cualquiera de las dos tareas estudiadas. En este supuesto existe más de una rama final de éxito, calculando el éxito total a partir de la suma de las probabilidades de cada una de las ramas de éxito finales del árbol. Debido a que la probabilidad final de fallo es igual a 1 menos la probabilidad final de éxito y viceversa, únicamente el éxito o fallo necesita ser calculado, dado que su complemento es calculado fácilmente.

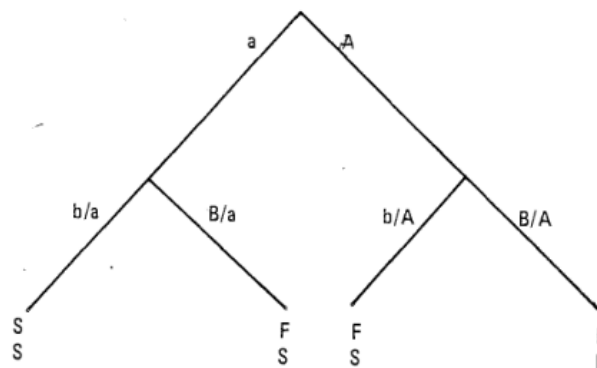


Ilustración 6: Árbol de sucesos para Análisis de confiabilidad humana.

Tarea A: Primera Tarea.

Tarea B: Segunda Tarea.

a: Probabilidad de ejecución acertada de tarea A.

A: Probabilidad de ejecución errónea de tarea A.

b: Probabilidad de ejecución acertada de tarea B.

B: Probabilidad de ejecución errónea de tarea A.

En la literatura normativa existen numerosas bases de datos para la cuantificación de los errores probables. Estos generalmente están basados en datos de comportamiento humano, en tareas convencionales complementado por modelos teóricos psicológicos existentes y por las estimaciones realizadas por diversos autores.

- El procedimiento ASEP (Accident Sequence Evaluation Program):

La aplicación del método THERP implica un alto costo de tiempo y de recursos humanos. Por ello, se requirió la elaboración de una versión reducida, la cual tuviera el propósito de completar el método sin entrar en un gasto de recursos tan alto. Para ello, se implementaron las siguientes mejoras:

- Incorpora un procedimiento y un programa computarizado para propagar los límites de incertidumbre.
- Perfecciona el modelo de diagnóstico.
- Suministra dos procedimientos denominados "screening" y "nominal" que se aplican en el orden expuesto como técnicas de barrido para seleccionar las acciones humanas merecedoras de un estudio más profundo. En el método THERP sólo se proporcionaban para las acciones post erróneas de diagnóstico.

La complementación del método THERP y el procedimiento ASEP terminan en los siguientes procedimientos:

- Fases de Familiarización con la planta de la organización:
 - Familiarización con la planta.
 - Aplicación de procedimiento "Screening".
 - Aplicación de procedimiento "Nominal"
- Fases restantes:
 - Aplicación de THERP a partir de la etapa de análisis cualitativo para tareas que sobrevivan procedimiento nominal y Screening.

Los procedimientos Nominal y Screening son usados para el mejoramiento efectivo del modelo THERP:

- Procedimiento Screening: El procedimiento "screening" da valores muy conservadores para la primera fase de barrido de un análisis de confiabilidad humana. Este procedimiento, tras haber dado directrices respecto a qué material utilizar en la fase de familiarización con la planta, prescribe la asignación de un HEP de 0,03 a cada uno de los pasos de las tareas seleccionadas. El HEP es la suma de la probabilidad de un error de omisión: HEP 0,01 y de un error de comisión: HEP 0,02. Posteriormente el HEP 0,03 debe ser modificado por un valor de probabilidad más alto si se aprecia una deficiente interacción hombre-máquina. El HEP obtenido es multiplicado por los valores asignados a las probabilidades de fallo que se consideren en la recuperación del mismo. Los

factores de recuperación contemplados en ASEP son limitados. Por último, y tras identificar si el sistema al que está asignada la tarea es en serie o en paralelo, se determina el nivel de dependencia (el modelo de dependencia de ASEP es una versión simplificada del suministrado en THERP).

- Procedimiento Nominal: Gran parte del procedimiento "nominal" es semejante al de "screening". Las principales diferencias de este último respecto al primero es el mayor crédito otorgado a los factores de recuperación y una consideración más detallada de los efectos de las dependencias.
- Modelo HCR (Human Cognitive Reliability Model):

El modelo HCR fue el resultado de un proyecto de investigación desarrollado por parte de un programa de desarrollo y mejoras de los Análisis de probabilidad en confiabilidad humana.

La finalidad que se pretendió con su elaboración fue la creación de un modelo para mejorar la evaluación de la probabilidad de fallo de los equipos de operación en situaciones accidentales.

La hipótesis que lo fundamenta es la siguiente: la probabilidad de no respuesta ante un accidente o fallo de una tarea por un equipo de operación está fundamentalmente determinada por el tiempo disponible y por el proceso cognitivo dominante.

El HCR se basa esencialmente en unas curvas normalizadas de fiabilidad-tiempo cuya forma está determinada por el tipo de proceso cognitivo dominante (Ilustración 23). La probabilidad de no respuesta o de No-Confiabilidad humana puede ser obtenida a través de dichas curvas o mediante el uso de la formulación matemática siguiente:

$$P(t) = \exp - \left\{ \frac{\left(\frac{t}{\overline{T_1}} - C_i \right)}{\frac{2}{C_{ni}}} \right\}^{\beta_i}$$

Ecuación 1: Probabilidad de No-Confiabilidad humana.

Donde:

- P(t): Probabilidad de no respuesta del equipo de operación en un tiempo t al ejecutar una tarea en la cual el proceso cognitivo dominante es del tipo "i".
- t: Tiempo máximo disponible por el equipo de operación para realizar la tarea en estudio. Dicho tiempo es estimado por un estudio de parte de Analistas de sistema en la Organización.

- $T_{1/2}$: Tiempo promedio tomado por los equipos de operación respectivos en la realización de la tarea.
- C_{ni} , C_i , β_i : Coeficientes de correlación asociados con el tipo de proceso cognitivo dominante “i”.

Para la obtención de la probabilidad de no respuesta debe en primer lugar determinarse el nivel de proceso cognitivo dominante. Este modelo recomienda para ello la utilización del diagrama expuesto en la Ilustración 21. La selección del nivel de proceso cognitivo es necesaria para elegir los coeficientes de correlación.

Para la determinación del tiempo máximo disponible (t) se debe realizar un análisis de planta, para luego estimar el tiempo promedio nominal $T_{1/2}$ y concretar una corrección de acuerdo con los FIC considerados en el análisis de confiabilidad humana:

- Estrés.
- Calidad de la interacción Hombre-máquina.
- Nivel de experiencia.

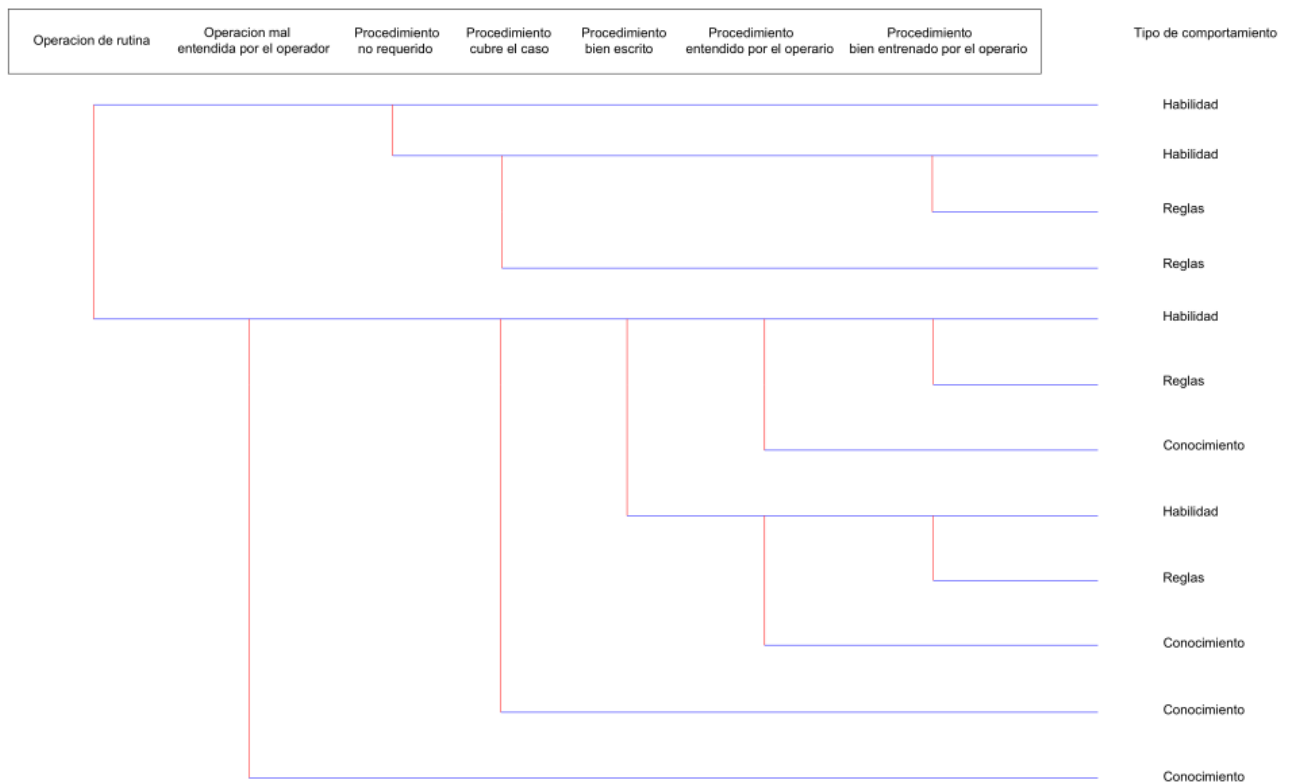


Ilustración 7: Diagrama nivel de proceso cognitivo.

Tipo de Proceso cognitivo	B_i	C_i	C_{ni}
<i>Habilidad</i>	1,2	0,7	0,407
<i>Reglas</i>	0,9	0,6	0,601
<i>Conocimiento</i>	0,8	0,5	0,791

Tabla 1: Coeficientes de correlación cognitivos.

Se ha dicho que la utilización del HCR proporciona la probabilidad de no respuesta $P(t)$ ante una falla dada. Sin embargo, para obtener la probabilidad de fallo han de calcularse además la probabilidad de un diagnóstico erróneo y de una mala ejecución y sumarla a la probabilidad de no respuesta. Sin embargo, en aquellos casos en que se estimen muy bajas la probabilidad de diagnóstico erróneo y de ejecución, la probabilidad de no respuesta puede ser asimilada a la de fallo total. La consideración final es que debe estudiarse cuidadosamente la conveniencia de utilizar el HCR en el caso de que el tiempo de ejecución sea muy superior respecto al tiempo de diagnóstico.

Además, otros métodos de predicción de fallas humanas, que a su vez se dividen en simples y complejos, son los siguientes:

Métodos simples:

- **TESEO** (Technique for Empirical Simulation of Errors in Operations): Modelo simplificado, basado en cinco factores, para evaluación empírica de estimación de errores en operaciones (acciones).
- **HEART** (Human Error Assessment and Reduction Technique): Modelo simplificado, basado en el esfuerzo requerido en las condiciones de ejecución y en los factores de influencia.

Métodos complejos:

- **MPPS** (Maintenance Personnel Performance Simulation): Análisis de probabilidad de éxito, el tiempo requerido y el nivel de estrés. (3)

3.2 Marco teórico

3.2.1 Confiabilidad humana. (10)

La Confiabilidad del Talento Humano o Confiabilidad Humana se define como la probabilidad de desempeño eficiente y eficaz de todas las personas, en todos los procesos, sin cometer errores o fallas derivados del conocimiento y actuar humano, durante su competencia laboral, dentro de un entorno organizacional específico. El sistema de Confiabilidad Humana incluye varios elementos de proyección personal, que permiten optimizar los conocimientos, habilidades y destrezas de los miembros de una organización con la finalidad de generar el llamado Capital Humano.

El Capital Humano representa el incremento en la capacidad de producción alcanzado mediante el desarrollo de las competencias de los trabajadores de la organización. Está formado por el conocimiento y el ingenio que hacen parte de las personas, su salud mental y la calidad de sus hábitos de trabajo. También es común señalar al Capital Humano como indispensable para la competitividad de las economías modernas ya que su productividad se basa en la generación, difusión y utilización del conocimiento.

La optimización y mejora de la Confiabilidad Humana se puede lograr integrando de manera efectiva los cuatro elementos mediante la relación de estrategias que incluyan una adecuada gestión del conocimiento, la consolidación de los equipos naturales de trabajo, aplicación de modelos de competencias y la creación de comunidades del conocimiento para desarrollo del mantenimiento, gestionando su desempeño, con el fin de asegurar la competitividad y poder preservar el conocimiento de la organización.

Potenciar las estrategias anteriores sería imposible si no se cuenta con el necesario talento humano, que sirva de soporte organizacional. Dentro de esta perspectiva se tienen estrategias referidas a la gente, su conocimiento, las competencias industriales, los factores críticos de éxito, que impulsan la competitividad y la hacen permanente. Estas estrategias integran elementos vitales para manejar el activo principal de la corporación llamado Capital Intelectual.

Para que el aprendizaje individual sea provechoso debe ir acompañado del aprendizaje corporativo, que representa el Capital Intelectual Estructurado de la organización. El primero es propiedad de la gente y reside en la memoria de cada uno; el segundo siempre es propiedad de la organización y reside en un sistema o en la memoria corporativa, donde el uso creativo de la tecnología informática y sus diversas posibilidades de comunicación (Internet, Intranet, Extranet, Videoconferencias), integran el factor decisivo para controlar el conocimiento. Esto implica establecer mecanismos que permitan el auto-aprendizaje y el auto-desarrollo de competencias.

El aspecto primordial de esta filosofía es el necesario cambio cultural de las organizaciones, que conlleva a aumentar el auto-estima del personal, cuando sus opiniones son importantes y generan valor, adicional a la comprensión y entendimiento de la utilidad que tiene la correcta toma de decisiones. (3)

3.2.2 El error humano (8)

Todos los seres humanos en mayor o menor grado están sujetos a cometer errores. “Es de humanos equivocarse”, es una frase muy frecuente que no debe volverse norma; los procesos de capacitación, entrenamiento y formación de habilidades técnicas, buscan minimizar los riesgos de errores humanos, y esto constituye uno de los objetivos primordiales de la Confiabilidad Humana. Cuando se considera la interacción entre las personas y los sistemas productivos, los factores de los errores humanos se pueden clasificar en cuatro categorías (Ilustración 6). (8)

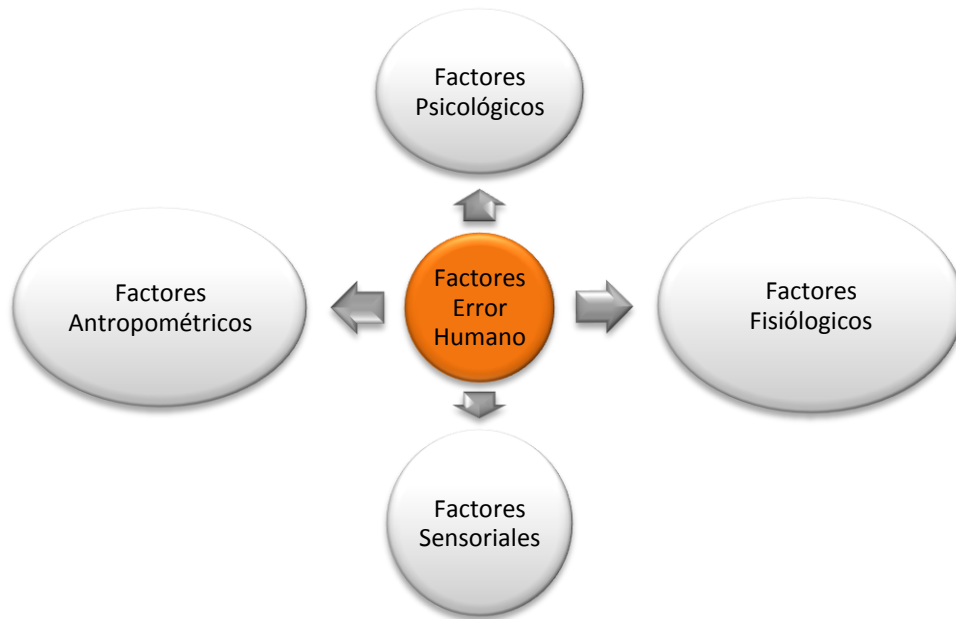


Ilustración 8: Elementos de confiabilidad humana. (8)

- **Factores Antropométricos:** Son los relacionados con el tamaño y la resistencia física del operario que va a realizar una tarea, cuando no puede acomodarse físicamente a las condiciones del sistema o equipo; estos errores no constituyen la causa del problema, en la mayoría de los casos son el efecto de una falla del sistema, que requiere una modificación o rediseño.
- **Factores Sensoriales:** Se relacionan con la pericia con que las personas usan los sentidos para ver lo que está ocurriendo en su entorno. Tienen que ver con aspectos como buena visibilidad o nivel de ruido, que requieren para mitigarlos de una acción correctiva.
- **Factores Fisiológicos:** Se refieren a las tensiones medioambientales que afectan el desempeño humano, pues generan fatiga. Para reducirlos se deben efectuar cambios en el clima organizacional, o en los procesos a realizar.

- **Factores Psicológicos:** Se refieren a los aspectos internos que tienen raíz en lo psíquico de las personas. Pueden generar errores intencionales o no intencionales y en la mayoría de los casos requieren de tratamiento especializado.

Los principales tipos de errores que se contemplan en los procesos industriales son: el desliz, debido a la falta de atención, los lapsos, debidos a la falta de memoria, el engaño como una respuesta impropia o la aplicación imprecisa de una regla, y la violación intencional de rutina o como un acto de sabotaje. El último grupo de errores son aquellos que se comenten por falta de conocimiento. (8)

3.2.3 Estrategias de confiabilidad humana. (9)

La “Gestión de Activos”, es hoy la estrategia con la cual muchas compañías a escala universal están maximizando su productividad y su rentabilidad para seguir siendo competitivas y permanecer dentro del mercado internacional. A su vez, los procesos de apoyo soportados en la Confiabilidad Operacional, son la base de todas las estrategias que se generan para alcanzar la excelencia en las actividades de mantenimiento. Como se señaló anteriormente las estrategias vitales en la orientación y mejoramiento de la Confiabilidad Humana, son las cuatro que se muestran en la Ilustración 7: (9)

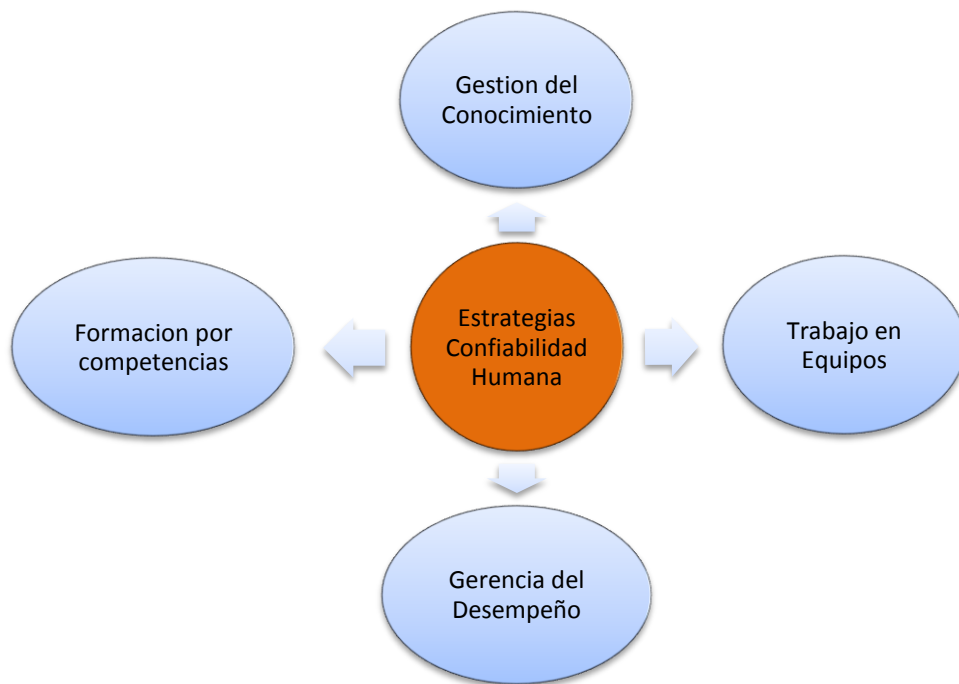


Ilustración 9: Estrategias de la confiabilidad humana. (9)

- **Gestión del Conocimiento:** La Gestión Eficaz del Conocimiento es el proceso sistémico que provee el talento humano capacitado para ejercer las labores industriales y preservar el “Capital Intelectual” de la organización. Desde el punto de vista industrial, se puede definir el conocimiento como la información que posee valor para ella, es decir la información que permite 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. Así pues, es evidente la importancia de obtener información de utilidad, de manera sistemática, y determinar cuáles son los instrumentos de hoy, para la localización y obtención de esa información. Esa es la labor de la Gestión del Conocimiento.

La fuerza de trabajo como capital intelectual, es quien resuelve los problemas y provee las actividades que aseguran el éxito. Pero se requiere el compromiso de la alta gerencia para liderar procesos de capacitación, motivación e incentivación de los trabajadores, para generar nuevas actitudes, aptitudes, reconocimiento y confianza, en el mediano y largo plazo. Bajo estos preceptos, gestionar estrategias para generar nuevo conocimiento, es de vital importancia para las empresas, y sin la asociación efectiva de la información que le sirva de soporte, no se logra una buena administración y generación de valor.

- **Gestión por Competencias:** Herramienta estratégica indispensable para enfrentar los desafíos del entorno. El Modelo de Competencias es una de las estrategias principales en el desarrollo del Talento Humano, busca impulsar al más alto nivel de calidad las competencias individuales, acordes con las necesidades operativas, y garantiza el desarrollo y administración del potencial intelectual de todos los miembros de la organización. El desarrollo tecnológico, la globalización de los mercados y el aumento de la productividad ponen de manifiesto, que la ventaja competitiva de las organizaciones depende de su Capital Humano. Esto justifica la necesidad de un nuevo enfoque de la Gestión del Talento Humano, que posibilite un mejor alcance de los objetivos industriales. La Gestión de Competencias es el modelo para gestionar el talento, que promueve a su vez la identificación, adquisición, potenciación y desarrollo de competencias que añaden valor a la organización. Un perfil de competencias depende básicamente de las funciones que se desarrollen en el puesto de trabajo, y por supuesto de las estrategias y la cultura organizacional. El Modelo de Competencias tiene como objetivo impulsar la innovación para el liderazgo, donde los trabajadores conocen su perfil de competencias y lo requerido para el cargo, identificando las acciones necesarias para conseguirlo. Se incentiva así la innovación y el auto – aprendizaje. En la era actual, donde la información y la tecnología están al alcance de todos, la principal ventaja competitiva es la capacidad personal de adaptarse al cambio. Esto se logra mediante el impulso que genera la formación para toda la vida del Talento Humano,

donde se mide y valora la formación y experiencias, de acuerdo con patrón del sistema de competencias.

- **Equipos Naturales de Trabajo:** Un equipo natural de trabajo es un conjunto de personas de diversas funciones dentro de la organización que trabajan juntas por un período de tiempo determinado, en un clima de potenciación de energía, para analizar los problemas comunes de distintos departamentos, apuntando al logro del objetivo común. Los miembros de un Equipo Natural de Trabajo, no deben ser más de diez personas y deben formarse típicamente como se observa en la Ilustración 8, con uno o dos representantes por las funciones disímiles.

Los roles se describen de la siguiente manera:

- **Operador:** Proporciona la experiencia en cuanto al manejo y operatividad de sistemas y equipos.

- **Planificador / Programador:** Proporciona la visión holística del proceso, y ofrece la visión sistémica de la actividad.

- **Mantenedor:** Experiencias de aprendizaje en la reparación y mantenimiento de sistemas y equipos.

- **Especialistas:** Expertos en áreas específicas.

- **Diseñador / Ingeniero de Procesos:** Proveer los elementos del diseño y operación de los activos.

- **Facilitador:** Asesor técnico o metodológico.

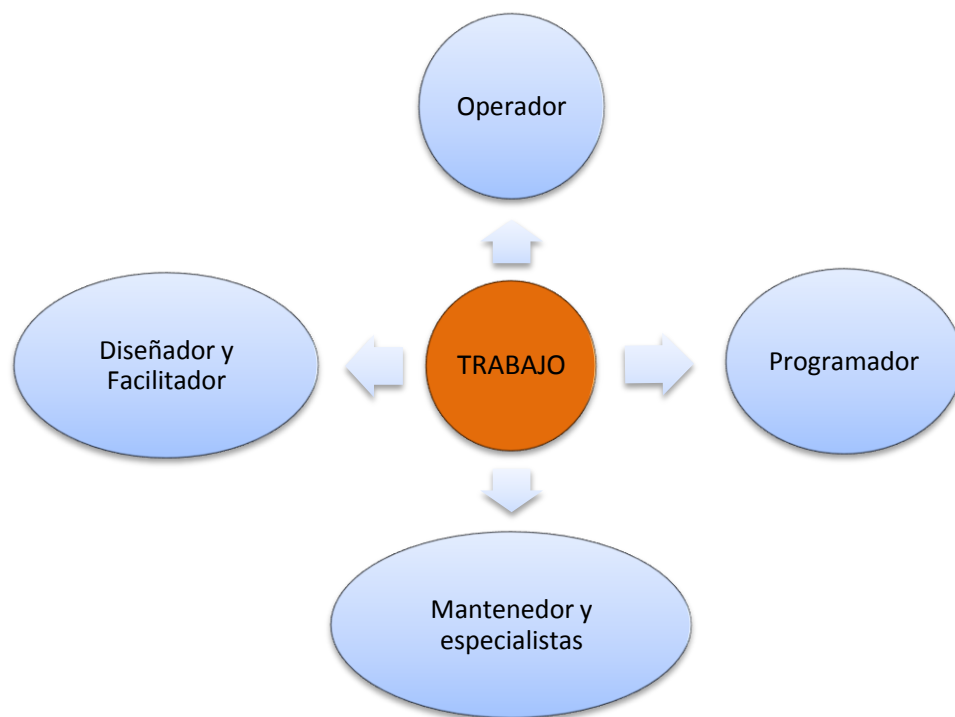


Ilustración 10: Equipo natural de trabajo. (9)

Una de las características principales en la industria moderna es la conciencia sobre la visión que guía las acciones de los Equipos Naturales de Trabajo, con el objeto de asegurar la implementación de las estrategias de confiabilidad, la sincronización de actividades, el establecimiento de planes integrales de acción y la optimización integral de los costos de producción y mantenimiento de la organización.

- **Gerencia del Desempeño:** Es el 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. La clave para alcanzar la excelencia organizacional se centra en las personas y su gestión. Las empresas se están dando cuenta de que más allá de las tecnologías y los procesos, son el saber y el conocimiento de sus trabajadores, cada vez más preparados, los que aportan el Capital Intelectual a la organización. Por tanto, la responsabilidad principal no consiste en crear expertos, sino en lograr el aprendizaje de habilidades sociales y la mejora de las relaciones interpersonales.

Para gestionar eficazmente el desempeño es necesario además, vencer “la resistencia al cambio”, que es una conducta natural del ser humano ante cada situación novedosa, cada propuesta diferente, o todo aquello que transforma el

esquema de pensamiento y acción vigente. Gestionar el cambio es una tarea fundamental de la alta dirección. Para superar con éxito las explosiones tecnológicas, el gerente general debe afrontar el proceso de cambio, desarrollando un clima organizacional donde técnicos, facilitadores y líderes, asuman riesgos y orienten nuevas iniciativas, mirando el equilibrio entre lo informal y una clara búsqueda de los objetivos comunes.

3.2.4 Cultura de confiabilidad humana. (9)

La Cultura Organizacional está conformada por el conjunto de principios y creencias básicas de una empresa que son compartidos por todos sus miembros y que la diferencian de otras organizaciones. La Confiabilidad Humana implica grandes cambios en la organización, exige una cultura del desafío y el cuestionamiento de muchos procesos administrativos, junto con el gerenciamiento efectivo de las comunicaciones y la responsabilidad para el registro sistemático de la información. (9)

Los procesos de la Confiabilidad Humana necesitan satisfacer ciertos criterios:

- Se debe trabajar con enfoque sistémico simple, no burocrático, que sea comprendido por todos.
- Debe haber un “Líder de Confiabilidad” del más alto nivel, con dedicación total al desempeño de su función.
- Los roles individuales conocidos por todos, deben ser alcanzables y con metas claras que pueden ser medidas fácilmente.
- Cuando no se logran las metas, la gerencia debe decidir las acciones correctivas y los ajustes al programa.
- El Kaizen, Kairyo, Innovación y Reingeniería deben ser herramientas de uso continuado.
- Cada falla humana debe ser vista como una oportunidad de aprendizaje, o de mejoramiento.

La formación integral del Talento Humano se considera de vital importancia, pues permite mejorar las aptitudes, capacidades, conocimientos y destrezas del personal, aumentar su auto-estima y la adaptación al entorno laboral, para poder entregar lo mejor a su trabajo, en ambiente colaborativo y de satisfacción individual.

Es ineludible por tanto, una gestión eficaz del Talento mediante la dirección por valores, el empleo de modelos de competencias, el entrenamiento (Coaching), empoderamiento (Empowerment), el trabajo en grupo (Groupware y Wokflow) y la inteligencia emocional;

porque se requiere que cada una de las personas se comprometa e involucre en la misión de la organización. Capturar y aprovechar las nuevas potencialidades en beneficio de la organización, permite convertir capital intelectual en capital financiero, lo cual constituye un nuevo paradigma organizacional. (9)

3.2.5 Políticas de confiabilidad. (7)

Para optimizar la Confiabilidad Humana es necesario contar con una buena “Política de Confiabilidad” fijada por la alta gerencia, donde se tenga en cuenta las necesidades substanciales del Talento Humano de la Organización. Primero se deben precisar las brechas tecnológicas y proveer la capacitación mínima. Luego, establecer los roles y responsabilidades, y desarrollar los medios para darle vigencia. Finalmente, establecer las recompensas o formas de reconocimiento para quienes demuestren nuevos comportamientos. Puede que hoy no sea agradable pensar que somos criaturas que responden a premios y castigos, pero el hecho es que funciona.

Para lograr alta Confiabilidad Humana, son fundamentales los procesos de capacitación y formación de habilidades. Si el personal desconoce cómo realizar las tareas, no las pueden desempeñar. Es tan simple como eso. Una buena política de capacitación, debe integrarse con la política general de la empresa, y debe aunar la formación interna con la externa. Por tanto, la educación se convierte en vehículo de difusión no sólo de conocimientos, sino de la cultura propia de la organización. El nivel directivo de la empresa debe colaborar con el desarrollo de su gente, impulsando la capacitación, delegando tareas, exigiendo elevados niveles de desempeño, y generando múltiples oportunidades de participación. Todo lo anterior debe ir acompañado de las necesarias políticas de motivación e incentivación para que el personal realice sus labores con agrado y satisfacción.

Algunos de los elementos básicos de una política para generar Confiabilidad Humana se muestran en la Ilustración 9. (7)



***Ilustración 11:** Políticas de la confiabilidad humana. (7)*

El proveer la necesaria motivación al trabajador es otra función que corresponde a la alta dirección; todo plan de incentivos exitoso, necesita ser bien planeado y administrado, y tener un alcance razonablemente completo. En mantenimiento, un plan de motivación bien hecho puede no seguir un patrón determinado; para que sea eficaz, requiere el más alto desempeño del Talento Humano, promover buenas relaciones de trabajo y estimular la iniciativa de las personas; además, debe ser equitativo y justo, y lo bastante flexible para adaptarse al cambio.

Todo programa de incentivos debe tener presente las expectativas de la empresa, de los trabajadores y del público. La empresa desea la más alta producción posible, siempre acorde con una buena calidad, seguridad del trabajador y una gestión adecuada de sus activos fijos. Los trabajadores desean que se evalúe con acierto su desempeño, que el incentivo que se les brinde sea atractivo con una cobertura racionalmente amplia, y que lo puedan entender con facilidad. El público (clientes) por su parte, desea un producto de máxima calidad, a precio razonable y que satisfaga sus necesidades. (7)

Para implementar un programa de mejoramiento de la Confiabilidad Humana dentro de la organización, con el fin de buscar donde están los errores y poder mejorar el desempeño del hombre de mantenimiento, el trabajo se debe enfocar desde las tres perspectivas siguientes:

- Aplicar las Técnicas de Confiabilidad que más se ajusten a las necesidades de la planta.
- Desarrollar programas de Seguridad Industrial basados en el comportamiento humano.

- Implementar las normas de seguridad y de gestión ambiental que garanticen la calidad y la integridad de los procesos productivos.

3.2.6 La Gestión del Conocimiento. (3,5)

Como se mencionó la sección 3.2.4, la gestión del conocimiento organizacional usada como estrategia competitiva en los mercados globales, regidos por el cambio permanente y la incertidumbre, se ha convertido hoy en factor crítico de éxito. La Gestión del Conocimiento se puede definir como un conjunto de procesos (tecnológicos, sociales, estructurales, institucionales) orientados a la adquisición, administración, organización, transferencia, gestión, generación y distribución del saber, en un entorno colaborativo cualquiera sea su propósito o misión.

La Gestión del Conocimiento está directamente ligada al Capital Intelectual, como resultado de la interacción de los Activos Intangibles y el Conocimiento Explicito de las empresas. El Capital Intelectual está formado por los activos intangibles, como son la organización, los valores esenciales, los conocimientos, las habilidades gerenciales, el espíritu de equipo, el plan de cumplimiento de la competitividad, el uso dado al software, las rutinas y procesos operacionales, las bases de datos e infinidad de cosas más.

La Gestión del Conocimiento representa uno de los elementos vitales para identificar oportunidades de negocios y responder a las coyunturas del ambiente económico mundial, a través de la ejecución de tecnologías y la motivación hacia un entorno que propicie y reconozca el trabajo en equipo como uno de los instrumentos para generar valor agregado a la corporación. Estar en la Sociedad del Conocimiento supone dar una importancia capital al “saber” y a las experiencias de las personas como factor clave de la economía.

La Gestión del Conocimiento es mucho más que tecnología y bases de datos. Es conectar la gente con los expertos y con la información, es gestionar la información para aprovecharla como ventaja competitiva, para interpretarla y aplicarla de modo que soporte la toma de decisiones. Los elementos que integran la Gestión del Conocimiento se muestran en la Ilustración 10. (3)



Ilustración 12: Elementos de la gestión del conocimiento. (3)

La gestión del conocimiento tiene sentido en el marco de compañías dinámicas, que no se asustan ante el cambio. Es factible en empresas que aprenden, ayudando a gestionar el cambio. Es posible en organizaciones que integran la estrategia, la estructura, los procesos, la cultura, la gestión de la información y la innovación. Sin embargo, para que el conocimiento se convierta en fuente de ventaja competitiva no basta con que exista. Es necesario que se pueda usar, capturar, distribuir, almacenar, crear y compartir por todos de manera continua y en el momento justo.

Por otra parte, una buena gestión permite mejorar el desempeño de las competencias claves, soportadas en la experiencia y aplicación de las habilidades disponibles en la empresa. Se requiere por tanto, establecer un contexto donde las nuevas ideas y el pensamiento creativo fluyan libremente, el análisis de coyunturas para la innovación en el entorno de trabajo, y crear círculos de solución de problemas usando lecciones aprendidas y procesos de la calidad total.

Las empresas que aprovechen su capital intelectual, que incrementen su capacidad de aprendizaje, que potencien la innovación constante y la generación de nuevos conocimientos, y que diseñen los sistemas y usen la tecnología necesaria, tendrán la posibilidad de afrontar los retos venideros.

La Gestión del Conocimiento es la gran oportunidad de hoy para transformar las organizaciones, pero no se puede olvidar que las personas tienen emociones y sentimientos, además de conocimientos. Se deben convertir las empresas en entornos agradables de trabajo, con salas de reuniones, áreas de descanso y zonas sociales que conlleven

satisfacción y mejora de las relaciones interpersonales. En últimas se debe “humanizar la organización” como requisito número uno para alcanzar el éxito. (5)

3.2.7 Organizaciones del conocimiento. (4)

El devenir industrial de hoy ha hecho que las organizaciones traten de seguir el ritmo de las Nuevas Tecnologías de Información y Comunicación en un entorno de cambio e incertidumbre, en el cual la investigación para generar o aprovechar los conocimientos ha dejado de ser una actividad elitista o un patrimonio de las compañías de Clase Mundial, para tornarse en una estrategia de sobrevivencia y de competitividad en los mercados globales.

Cuando las empresas son conscientes del alcance de una gestión eficiente y eficaz del conocimiento, y aplican para ello nuevas tecnologías, se puede hablar de lo que hoy se denomina “Organizaciones que Aprenden”, que luego evolucionan a las “Organizaciones del Conocimiento”, las cuales se definen como empresas 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 conocimientos en continua retroalimentación.

Las organizaciones donde el conocimiento es el activo más importante son empresas muy especiales. No todas están preparadas para usar efectivamente este activo. El aprovechamiento del conocimiento es el fin que persigue la Gestión del Conocimiento. Entendiendo como fin, alinear los conocimientos individuales y colectivos con los objetivos de la organización. Una organización que aprende la constituyen esencialmente las personas y sus relaciones. Las organizaciones basadas en una efectiva Gestión del Conocimiento son aquellas que poseen como características comunes:

- Dirigidas hacia el Cliente, buscan su satisfacción total.
- Dirigidas hacia la Excelencia, donde el Capital Intelectual es su mayor activo.
- Alta flexibilidad y adaptación mediante el uso continuo de las NTICs.
- Alto nivel de competencia y gestión eficaz del conocimiento.
- Elevado nivel de aprendizaje en equipo, basado en innovación permanente.
- Auto-dirección y auto-gestión, para determinar sus competencias esenciales.
- Proactivas y Futuristas, para lo cual basan su crecimiento en planes de Visión Compartida.

Otra característica esencial de las organizaciones que aprenden, es el uso del conocimiento para innovar en la empresa, aunque no siempre se utiliza en la forma correcta. Gestionar el conocimiento impulsa la innovación y asegura los logros, siempre que la cultura corporativa estimule la difusión y el manejo proactivo de la información y del

conocimiento. El dominio del saber constituye el fundamento básico para la innovación, la cual siempre está situada entre el conocimiento y la productividad, y a través de su interacción la empresa se desarrolla y progresa.

Las Organizaciones que Aprenden deben asegurar la conservación del conocimiento y que se permita su consulta permanente por parte de los integrantes de la empresa. Se debe crear una cultura, en la que el conocimiento sea compartido entre todos. Se debe premiar y estimular al personal que ofrece sus conocimientos para que sean aprovechados por otros.

La clave radica en el empeño de todos los integrantes de la organización, que presupone un mayor sentido de pertenencia e involucramiento con la misión de la compañía. Para lograrlo y transformar el conocimiento tácito en explícito, y en productos y resultados viables, se necesitan directivos que creen visión. Esta visión se apoya en la idea de que la empresa es un organismo vivo, con identidad, que evoluciona y que tiene objetivos claros, y por tanto está abierta a la innovación y al cambio. Como organismo vivo, la generación de nuevos conocimientos es una tarea que compete al Talento Humano con ideas e ideales.

Finalmente, las diversas estrategias para lograr la Confiabilidad Humana buscan esencialmente recuperar el valor de las personas en la organización. En una sociedad cada vez más tecnificada y automatizada, se requiere como punto de partida que también sea más humana. (4)

3.2.8 Evaluación de fallas humanas. (3)

Los métodos de evaluación corresponden a dos situaciones básicas:

- En la realización de actividades relacionadas con la tarea.
- En los periodos de aprendizaje para las tareas.

Durante los periodos de aprendizaje se admite que las cantidades de fallas sean decrecientes a lo largo de la duración del entrenamiento, y que durante la ejecución cotidiana de tareas las fallas son aleatorias.

La cuantificación de fallas humanas puede ser obtenida por dos procedimientos básicos:

- Métodos de predicción
- Métodos de evaluación de tareas ejecutadas. (3)

3.2.9 Comportamientos humanos. (3)

El análisis de la confiabilidad humana debe considerar principalmente los siguientes asuntos y procedimientos:

- Las actividades sensoriales y cognitivas.

- La relación hombre-máquina. (3)

3.2.10 Índices de evaluación y desempeño. (4)

Los principales índices que aplican y verifican el desempeño humano en la ejecución de diversas tareas son:

- Factor de aprendizaje (FAP): El desarrollo de aprendizaje corresponde generalmente a dos etapas como se muestra en la Ilustración 13, correspondientes a un entrenamiento básico y uno complementario.
Se puede admitir que exista un conocimiento previo, 20% en el caso de la Ilustración 13 y que la formación básica corresponde a la cantidad de conocimientos y procedimientos necesarios para una buena ejecución de la tarea (90%).
- Índice de performance de actividades (IPE): Es bien conocida la influencia de los factores ambientales y personales en el rendimiento humano en la ejecución de tareas. El estrés físico y mental influyen significativamente en el desempeño de las tareas, como se presenta en la Ilustración 13. Sin estrés ni presión existe un acomodo en el humano y por ende un menor desempeño, por lo que un pequeño estrés mejora el rendimiento. Para un mayor estrés, a partir de un valor máximo, el rendimiento comienza a reducirse, pudiendo llegar a valores que significan baja eficiencia, hasta llegar a un rendimiento prácticamente nulo (0%). Bajos valores de IPE es una de las principales causas de accidentes por causas humanas, por alterar procedimientos que normalmente serían plenamente ejecutados.
- Índice de vigilancia o alerta (IVI): Las funciones de vigilancia son bastante afectadas por su duración prolongada, como se ve en Ilustración 14. A partir de un valor inicial, asumiendo toda la preparación para la tarea (100%), la función es decreciente. Requiere una rotación de la guardia, por ejemplo, cuando el índice alcanza el valor 99%. Algunas funciones de inspección de componentes o equipos también caen en esta función. Para grandes duraciones de vigilancia puede ser completamente anulado (0%). (4)

3.2.11 Clasificación de fallas humanas. (4,5)

Las fallas humanas, como se presentan en la Ilustración 15 pueden ser clasificadas como errores o transgresiones, que ocurren durante la ejecución de tareas. Los errores a su vez pueden ser clasificados en deslices o engaños y las transgresiones en intencionales o no intencionales. (Ilustración 11)

Esta clasificación sirve para facilitar y codificar los eventos en una base de datos, por su simplicidad y aplicación generalizada.

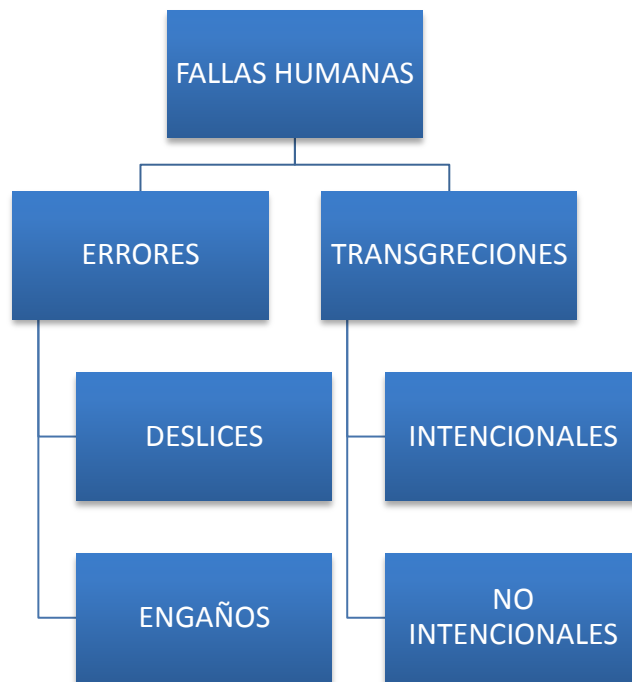


Ilustración 13: Clasificación de fallas humanas. (4)

Los errores humanos, debidos principalmente a la falta de conocimiento, lógica o razonamiento, como se ve en la Ilustración 12, corresponden a deslices y engaños. Estos constituyen la principal parte de las fallas humanas, pues dependen fundamentalmente de las capacidades para ejecutar tareas, del estrés, de las condiciones ambientales y sociales, de la motivación en la ejecución de la tarea, entre otros factores.

Los deslices ocurren incluso cuando se tienen las capacidades requeridas para ejecutar la determinada tarea. La capacidad total nunca es alcanzada por el ser humano, por la natural complejidad de las acciones involucradas, incluso con una excelente preparación (aprendizaje básico y continuado). Estos son causados principalmente por:

- Estrés, que aunque se desea en niveles adecuados, debe ser diferenciado del cansancio debido a acciones prolongadas en ambientes inadecuados en jornadas prolongadas. La senilidad, degradación o envejecimiento mental es otro factor para la inducción de los deslices, debido a la reducción de la capacidad neuronal por la degradación continua y progresiva.
- Incapacidad, física o mental, generadora de gran parte de las fallas humanas para tareas no concordantes con sus capacidades innatas, incluso después de sucesivos entrenamientos. Para ilustrarlo, se puede pensar en un jugador de Básquetbol de pequeña estatura y obeso, siendo entrenado por un tiempo prolongado. Ningún procedimiento sería capaz de transformarlo en un campeón.

Los engaños corresponden a fallas humanas en la ejecución de una determinada tarea o acción conforme a patrones o normas establecidas, principalmente en actividades

complejas, con una secuencia de acciones y procedimientos. Las principales causas de los engaños corresponden a las siguientes condiciones:

- Falta de aptitud, que conduce a frecuentes errores de procedimientos.
- Falta de entrenamiento por aprendizaje inadecuado o insuficiente, que genera engaños en las decisiones.
- Falla en diagnósticos debido a aspectos cognitivos.

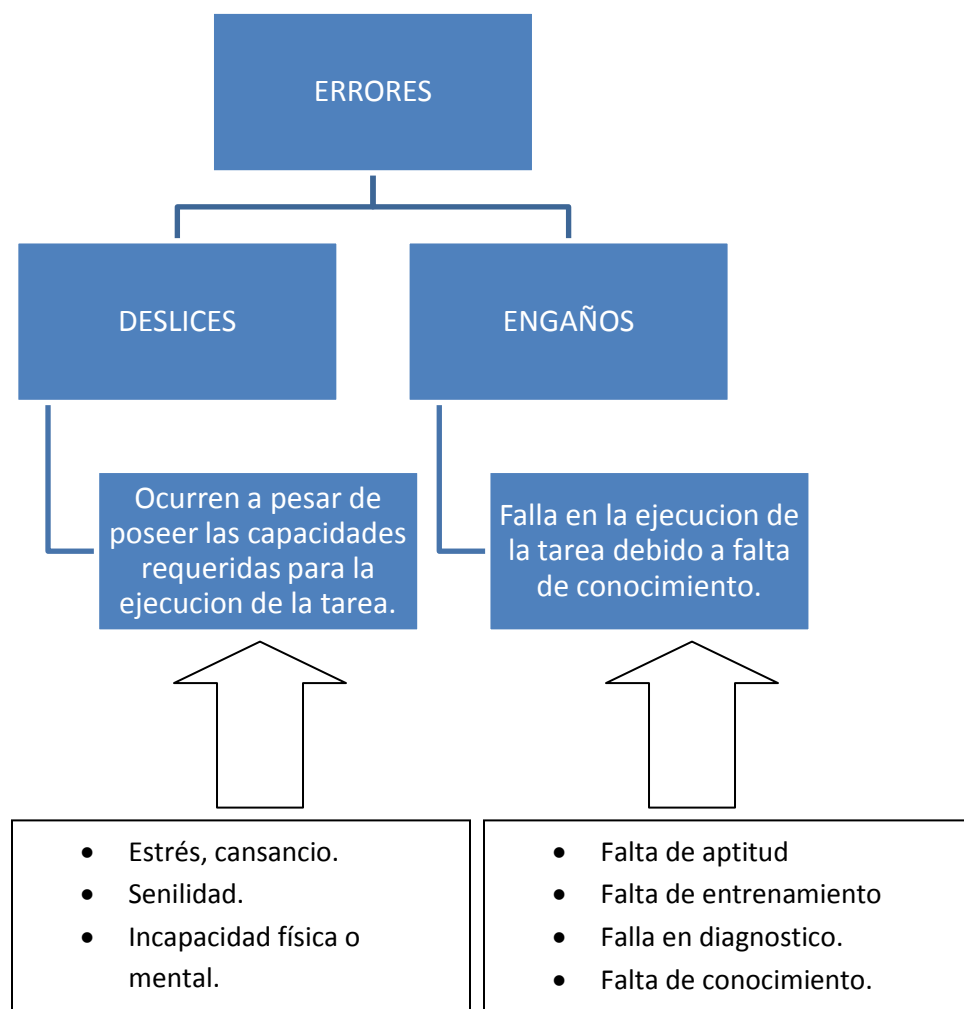


Ilustración 14: Clasificación de errores humanos.(4)

Por otro lado, las transgresiones son debidas a fallas de comportamiento, clasificadas en intencionales y no-intencionales, como se ve en la Ilustración 13.

Cuando sea posible, se deben separar las transgresiones de los errores para los análisis cuantitativos, porque básicamente dependen de factores especiales y muchas veces difíciles de ser identificados, pues representan más las molestias humanas que propiamente la capacidad física y mental para la ejecución de labores.

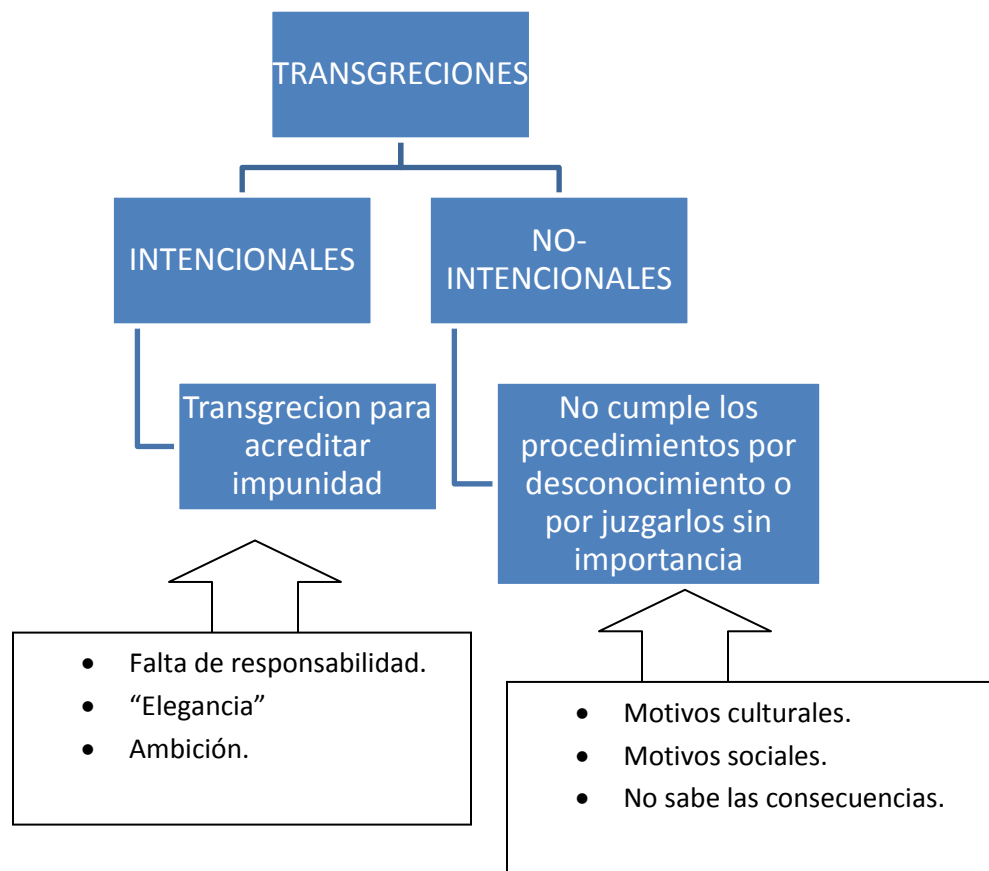


Ilustración 15: Clasificación de Transgresiones humanas. (4)

Las transgresiones intencionales son ocurrencias fundamentalmente debidas a la certeza de la impunidad del acto practicado, o una sanción leve de la acción indebidamente realizada. El autor tiene plena conciencia de la acción, y se debe principalmente a los siguientes factores:

- Falta de responsabilidad, pues acredita que la consecuencia de la acción puede ser transferida a otra persona o a la organización.
- Elegancia, por juzgar que la acción pasara desapercibida.
- Ambición, por creer que generara una ganancia personal o financiera.

Por otra parte, las transgresiones no-intencionales son debidas a la falta de conocimiento de las reglas inherentes a la misión o al comportamiento esperado en el curso de las acciones, generadas por:

- Motivos culturales y sociales, en ambientes diferentes de su vivencia anterior.
- No sabe juzgar las consecuencias de sus actos. (5)

3.3 Análisis Cuantitativo de Confiabilidad Humana.

3.3.1 Introducción al Análisis Cuantitativo de Confiabilidad Humana.

Siempre que se habla de la confiabilidad humana se aprecia que tanto en la literatura actual sobre el tema como en las organizaciones empresariales, hay un acercamiento y un análisis desde el punto de vista de las materias provenientes de la Psicología, incluso de la Sociología. Dado que estas materias, si bien abarcan de forma precisa los análisis cognitivos del desempeño humano dentro de organizaciones, es difícil obtener parámetros concretos de predicción que simplifiquen de mejor manera los errores humanos. Es por esto que se hace necesario un análisis matemático, más bien estadístico de esta materia. En este apartado se explora de forma cuantitativa la confiabilidad humana. Para esto se hace necesario tomar algunos elementos de probabilidad clásica.

3.3.2 Elementos de probabilidad. (10)

Definición de probabilidad.

Sea una prueba en la cual un evento “A” puede ser generado. Al suponer que se repite la prueba “n” veces, donde el evento “A” es generado “k” veces (Ecuación 1). En este caso resulta que:

$$k = \text{Frecuencia absoluta}$$
$$k/n = \text{Frecuencia relativa}$$

Ecuación 2: Frecuencia relativa.

Si la frecuencia relativa, referida a un evento aleatorio, oscila alrededor de un cierto valor, este es denominado como la probabilidad del evento considerado. Si la cantidad de pruebas tiende a infinito, la frecuencia relativa es igual a la probabilidad del evento.

Suponiendo que un evento “A” puede acontecer “k” veces, dentro de un total de “n” ocurrencias, la probabilidad del evento “A” viene dado por la Ecuación 2:

$$P(A) = \frac{k}{n}$$

Ecuación 3: Probabilidad de un evento A.

a su vez, la probabilidad de que no ocurra el evento “A” viene dado por la Ecuación 3:

$$P(A *) = \frac{n - k}{n} = 1 - \frac{k}{n} = 1 - P(A)$$

Ecuación4: Probabilidad del evento complementario A.

satisfaciendo la Ecuación 4:

$$P(A) + P(A *) = 1$$

Ecuación 5: Probabilidad total.

Distribución de frecuencias.

Cuando una cantidad razonable de datos (fallas) representa una dada distribución estadística, se pueden distribuir los datos en clases o categorías, y determinar los valores en clases de frecuencias. La tabulación de los datos se denomina como distribución o tabla de frecuencias. El grafico correspondiente a la variación de las frecuencias, en función de las clases, es denominado Histograma de frecuencias.

La forma del histograma de frecuencias tiene un importante significado en la interpretación de la evaluación de las fallas observadas en la muestra durante las acciones, como se muestra en los Gráficos 1 y 2, correspondiente a diferentes tipos de distribuciones:

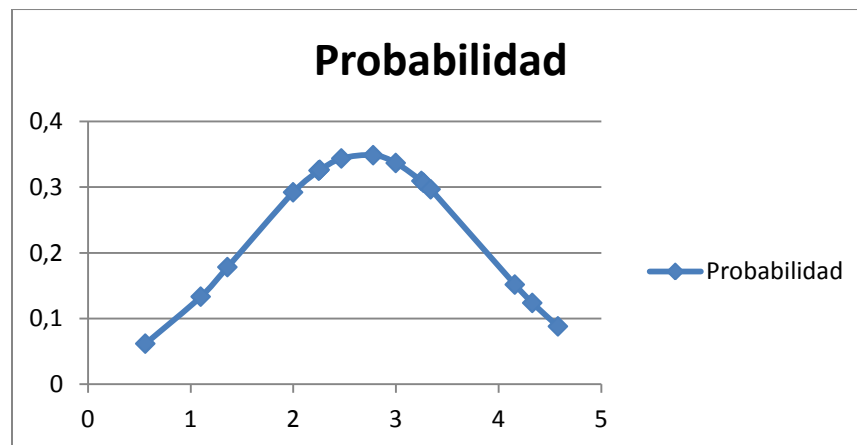


Gráfico 1: Distribución de probabilidad Normal

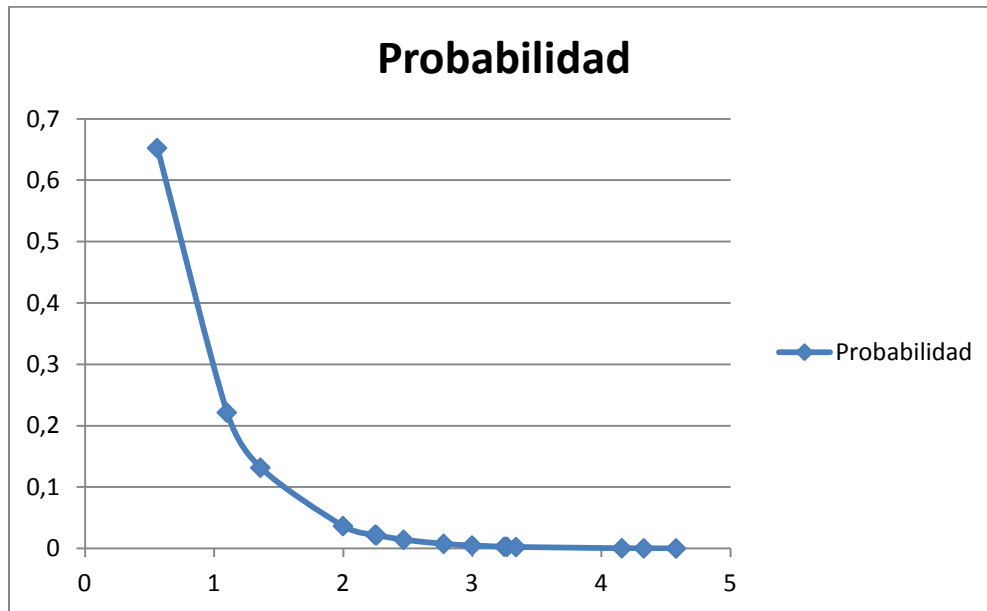


Gráfico 2: Distribución de probabilidad Exponencial.

La metodología del análisis de las probabilidades de falla por medio de histogramas, puede ser substancialmente mejorada y con gran ventaja, esto utilizando distribuciones continuas (Weibull, Exponencial, etc) y programas computacionales, que permiten verificar cual es la mejor distribución a adoptar.

Variables Aleatorias Discretas.

En el caso de las distribuciones discretas, la densidad de frecuencia en cada clase viene dada por la Ecuación 5:

$$f_i(t) = \frac{k_i}{\Delta r_j * n}$$

Ecuación 6: Densidad de probabilidad variable discreta.

donde Δt_i es el valor adoptado para cada intervalo de clase (i), satisfaciendo las condiciones $k_i \geq 0$ y $\sum k_i = n$.

La frecuencia acumulada absoluta es obtenida mediante la suma progresiva de las frecuencias absolutas anteriores a cada una de las clases en que se ha dividido la muestra

total. La frecuencia acumulada relativa, o porcentaje de frecuencia acumulada, corresponde al valor de la frecuencia acumulada dividido por la frecuencia total. El polígono de frecuencias es la curva trazada a partir de dos puntos correspondientes a valores medios en cada clase de frecuencia. Para una gran cantidad de puntos, la curva correspondiente se aproxima a una función continua.

Un parámetro relevante en el estudio y análisis de confiabilidad y desconfiabilidad humana corresponde al concepto de **Tasa instantánea de fallas** $\lambda(t)$, que simplifícadamente viene dada por la Ecuación 6:

$$\lambda(t) = \frac{K_i}{(n - \sum K_i) * \Delta r_j}$$

Ecuación 7: Tasa instantánea de fallas.

la cual es medida en [Fallas/acción], donde K_i es la cantidad (frecuencia absoluta) de acciones con fallas y $(n - \sum K_i)$ es la cantidad de acciones realizadas de manera correcta (sin fallas). De estas relaciones se deduce la Ecuación 7:

$$R_i = \frac{f_i(t)}{\lambda(t)}$$

Ecuación 8: Confiabilidad.

El valor medio de una distribución de probabilidad discreta corresponde al momento de 1° orden dado por la Ecuación 8:

$$\text{Media} = \sum_{i=1}^n r_{mi} * \frac{k_i}{n} = \sum_{i=1}^n r_{mi} * F_i$$

Ecuación 9: Valor medio de una distribución discreta.

Variables aleatorias continuas

Las distribuciones continuas, $f(r)$ corresponden a probabilidades de que la variable aleatoria (r) pertenezca al intervalo $[a, b]$, correspondiendo al área bajo la curva (Gráfico 3) de la variación de la función de densidad, entre a y b , o sea:

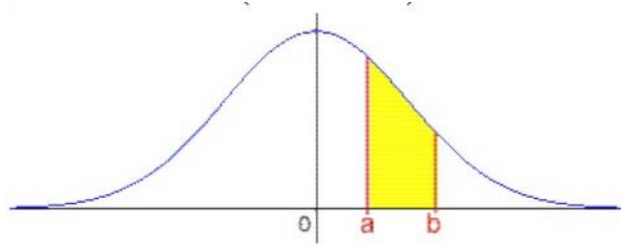


Gráfico 3: Distribución continua Normal.

El área bajo la curva viene dada por la Ecuación 9:

$$F(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx$$

Ecuación 10: Área bajo la curva.

Para todo el recorrido, es decir, en el intervalo $0 \leq x \leq \infty$ resulta el valor (Ecuación 10):

$$F(\infty) = \int_0^{\infty} f(x) dx = 1$$

Ecuación 11: Ecuación fundamental de probabilidad.

Para un valor dado acotado, $x \leq \infty$, siempre se cumple que: (Ecuación 11)

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx < 1$$

$$f_i(t) = \frac{dF(x)}{dx}$$

Ecuación 12: No-Confiablez matemática de distribución continua.

es decir, corresponde a la inclinación de la tangente a la curva de variación de No-Confiable F(x). Como se ve en la Ilustración 21, el inicio en la curva de densidad de probabilidad puede ser tanto creciente como decreciente. En el caso de ser creciente ocurre una inflexión en la inclinación de la tangente a la curva de F(x), que corresponde al valor máximo de f(x). En el caso de distribuciones decrecientes, no ocurre punto de inflexión.(Gráfico 4)

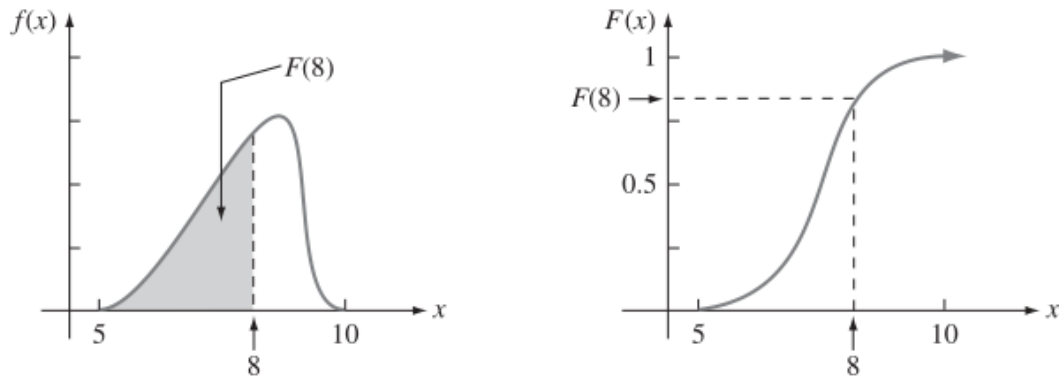


Gráfico 4: Monotonía de funciones de probabilidad.

Para las variables aleatorias continuas, se define la Tasa de falla $\lambda(r)$ en función de la variable r (acciones) como: (Ecuación 12)

$$\lambda(r) = \frac{f(r)}{R(t)}$$

Ecuación 13: Tasa de falla para distribuciones continuas.

que significa la cantidad de fallas ocurridas en unidades de duración continuas. (Tiempo, kilómetros, ciclos, etc.)

Siendo la desconfiabilidad humana (F_i) y la confiabilidad (R_i), relacionadas por la ecuación 13:

$$R_i + F_i = 1$$

Ecuación 14: Ecuación fundamental de Probabilidad.

Resulta una confiabilidad $R_i(r)$ dada por la ecuación 14:

$$R_i(r) = 1 - F_i(r) = 1 - \int_0^r f(r)dr = \int_r^\infty f(r)dr$$

Ecuación 15: Confiabilidad Total distribución continua.

Que a su vez se puede relacionar de esta forma (Ecuación 15):

$$R_h(r) = \frac{f(r)}{\lambda(r)}$$

Ecuación 16: Confiabilidad Total distribución continua.

Esta ecuación tiene una importancia trascendental en muchos aspectos. En ella se ve que $\lambda(r)$ es una función condicional de $f(r)$, relacionada con Probabilidades de éxito. Físicamente, significa que $f(r)$ permite la evaluación de las probabilidades de falla en cualquier cantidad de acciones futuras.

En el caso de las funciones continuas, el valor medio corresponde a la esperanza matemática $E(t)$, dado por la Ecuación 16:

$$E(t) = \int_0^\infty r * f(r)dr = \int_0^\infty R(r)dr$$

Ecuación 17: Esperanza matemática distribución continua.

donde $f(r)$ es la densidad de probabilidad de falla y $R(r)$ es la confiabilidad.

Confiabilidad condicional

La función de confiabilidad condicional corresponde al valor de confiabilidad $R_h(r, \Delta r)$ para una nueva tarea de valor Δr , cuando se ha acumulado una cantidad r , o sea: (Ecuación 17)

$$R_h(r, \Delta r) = \frac{R_h(r + \Delta r)}{R_h(r)}$$

Ecuación 18: Confiabilidad condicional.

También se cumple para la No-Confiabilidad: (Ecuación 18)

$$F_h(r, \Delta r) = 1 - R_h(r, \Delta r)$$

Ecuación 19: Confiabilidad condicional.

Valor mediano de distribución.

El valor mediano (r_{med}) corresponde al valor de la variable aleatoria (r) que está precisamente en la mitad del área bajo la curva de la función de densidad de probabilidad de falla, cumpliéndose la siguiente relación: (Ecuación 19) (10)

$$\int_r^{\infty} f(r) dr = 0,5$$

Ecuación 20: Valor mediano de la distribución continua.

3.3.3 Cuantificación de Fallas Humanas.

La determinación de la confiabilidad humana es una consecuencia lógica del estudio de confiabilidad de los equipos y máquinas, reconociendo que el hombre falla, y que estos fallos pueden clasificarse, cuantificarse y analizarse matemáticamente utilizando una distribución estadística apropiada. (10)

La confiabilidad humana (R_H) es la probabilidad de que una persona no falle en el cumplimiento de una tarea requerida en un determinado periodo de tiempo, con condiciones ambientales apropiadas y con recursos disponibles para ejecutarla.

Por ser una probabilidad, esta puede ser cuantificada, o sea tomar valores de 0 a 1, con una correspondiente probabilidad de falla (F_H), como se presenta en la Ecuación 20 y en la Ilustración 14 y 15:

$$R_H = 1 - F_H$$

Ecuación 21: Confiabilidad Humana.

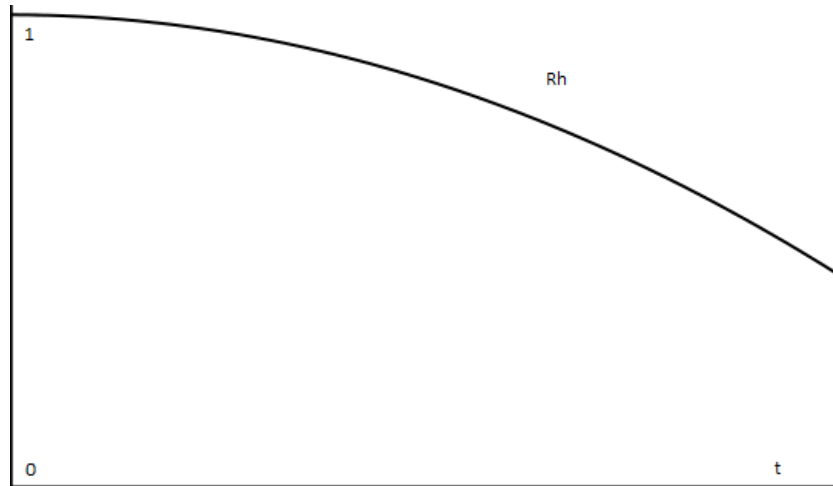


Gráfico 5: Variación de la confiabilidad a lo largo del tiempo de una tarea.

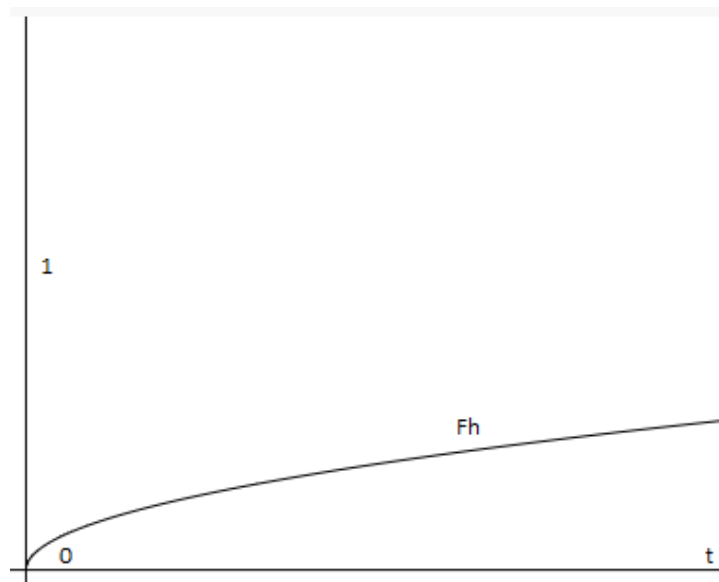


Gráfico 6: Variación de la No-Confiabilidad a lo largo del tiempo de una tarea.

Como principio básico, se expone que no existen personas a prueba de fallas, es decir, todos fallan (mucho o poco) en el cumplimiento de una tarea o trabajo.

A diferencia de los equipos, que se degradan con el paso del tiempo, se espera que:

- La aptitud.
- La formación.
- La experiencia.
- La idoneidad correcta de las personas.

reduzcan las fallas humanas en el tiempo. (Ilustración 16)

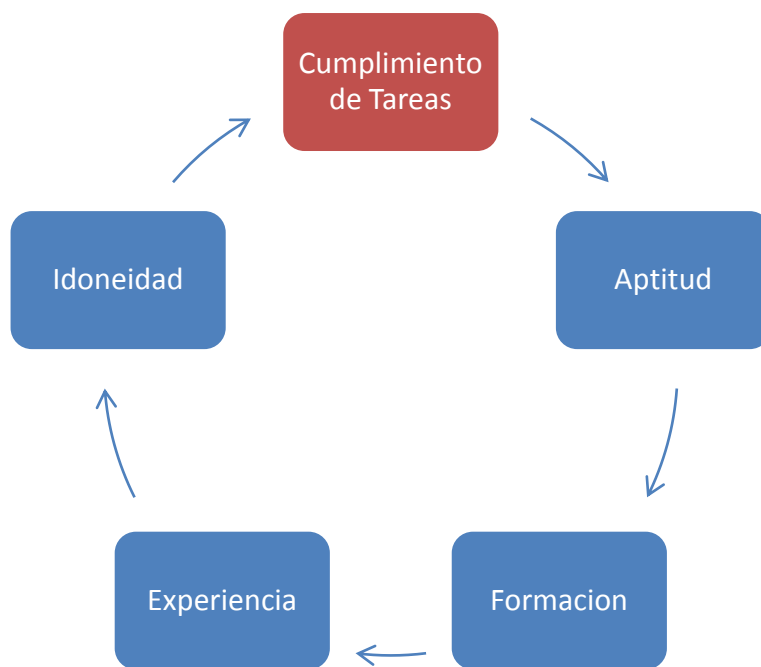


***Ilustración 16:** Condiciones para el cumplimiento de tareas.*

Estas condiciones derivan a las siguientes premisas básicas:

- Error es humano.
- Las fallas pueden ser previstas y cuantificadas.
- La calificación humana para las funciones es un elemento básico para el rendimiento funcional y operacional de las tareas a ser cumplidas.
- Los factores limitantes para el desempeño (personal, ambiental, social, etc) deben ser considerados.

3.3.4 Principales ocurrencias de fallas.

En el día cotidiano de las empresas es común la ocurrencia de fallas humanas debido a varias causas y razones, como se muestra en la Ilustración 17 y 18:

- Inspección (25%)
- Mantenimiento (22%)
- Operación (15%)
- Gerenciamiento (13%)

que corresponden al 75% de las causas directas, y otro 25% de causas indirectas a la acción humana (Ilustración 11), tales como:

- Diseño (11%)
- Materiales (8%)
- Ambientales (5%)
- Otras (1%)



Ilustración 17: Causas directas de fallas.

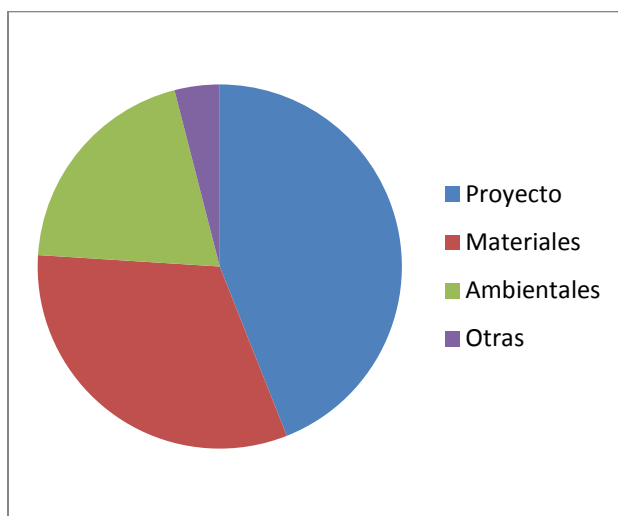


Ilustración 18: Causas indirectas de fallas.

Las principales causas directas de los accidentes en las empresas son debido a fallas humanas, como se ve en Ilustración 19, son debido principalmente a:

- Falta de conocimiento (35%)

- Procedimientos técnicos incorrectos (20%)
- Causas personales (15%)

correspondiendo al 70% de las causas de forma directa y el otro 30% de causas indirectas a la acción humana, por errores de concepción y ejecución del proyecto.

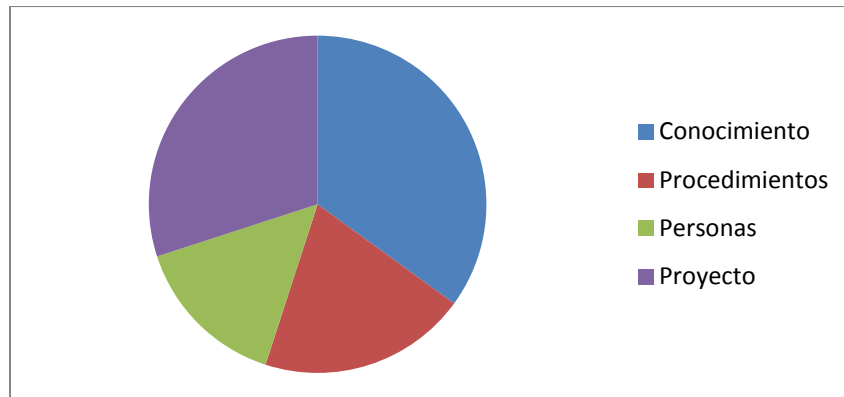


Ilustración 19: Principales causas de fallas humanas en empresas.

La cuantificación de las fallas humanas es realizada de modo análogo a los equipos. A partir de esto, se menciona que las fallas humanas son básicamente clasificadas en Error o Transgresión.

1. Los errores siempre siguen una distribución de probabilidad dada, pero las transgresiones, al ser imprevista e impredecibles, pueden inducir a modelos matemáticos complejos.. Por lo tanto, las fallas observadas en distintas tareas deben ser separadas de las transgresiones, por ser ocurrencias bastante diferentes, que deben ser consideradas en las bases de datos. La mezcla de esas ocurrencias no permite un correcto análisis de confiabilidad humana, principalmente en cuanto a la verificación de aprendizaje, la eficiencia del ejecutante, las condiciones ambientales, y otros. Los deslices no deben ser confundidos con las transgresiones.

De modo análogo a los equipos, las actividades humanas, referidas a tasas de fallas pueden ser encuadradas en 3 distintos periodos:

- Fallas en el periodo inicial (Aprendizaje), con cantidades de fallas decrecientes.
- Fallas aleatorias (distribución tipo exponencial), luego de concluido el periodo de aprendizaje.
- Fallas crecientes, caracterizadas por estrés prolongado, incapacidad progresiva y otros factores generados por la degradación física, ambiental y otras condiciones de modo acumulativo.

En este sentido, asume una especial importancia el periodo de aprendizaje (Índices de evaluación y desempeño).

La probabilidad de falla (desconfiabilidad) humana (F_H) de modo simplificado, viene dada por la siguiente relación (Ecuación 21):

$$F_H = \frac{\# \text{ Errores}}{\# \text{ Total de acciones}} = \frac{k}{n}$$

Ecuación 22: Desconfiabilidad Humana.

La confiabilidad total (Maquina + hombre) se calcula como un sistema en serie, dada por la relación (Ecuación 22):

$$R_t = R_{maq} * R_H$$

Ecuación 23: Confiabilidad Total.

Con R_H dado por: (Ecuación 23) (10)

$$R_H = 1 - F_H$$

Ecuación 24: Confiabilidad Humana.

3.3.5 Confiabilidad humana en eventos binarios.

Este modelo cuantitativo de confiabilidad humana propone a un operador el cual está a cargo de ejecutar una tarea determinada, falle o tenga éxito, o sea, corresponde a una operación binaria. En estos casos se deben asumir las siguientes condiciones básicas para el análisis de confiabilidad humana:

- El operador es observado y corregido en la ejecución de las tareas hasta que la ejecución sea plenamente correcta.
- Cualquier procedimiento de mejora para una tarea ejecutada debe alterar (o no) la confiabilidad de la misión respectiva, o sea se tienen valores para $R=0$ y $R=1$.
- Cuando ocurre un suceso de éxito, no se aplica corrección a los procedimientos utilizados.
- Si el operador falla en un evento, se debe plantear una corrección para mejorar la confiabilidad del trabajador.
- Cuando la tarea es modificada, se asume que existe una probabilidad (a) de incorporación de ajuste, antes del próximo intento.
- La probabilidad de error antes del primer intento corresponde a $P_1 = 0$ (falla) y luego de varios intentos (n), corresponde la probabilidad $P_n = 1$ (éxito).

El valor para la confiabilidad humana corresponde a la Ecuación 24:

$$R_n = 1 - F_0 * p(1 - ap)^{n-1}$$

Ecuación 25: Confiabilidad Humana para Evento Binario.

Donde:

n = Cantidad de intentos de mejora (Número entero)

F_0 = No – confiabilidad en el primer intento.

a = Probabilidad de ajuste.

p = Probabilidad de fracaso en $(n - 1)$ – esimo intento de mejora.

Como ejemplo de aplicación, se desea determinar la confiabilidad de un soldador para ejecutar una operación definida de soldadura, después de 12 intentos. Los parámetros son:

$$F_0 = 0,5.$$

$$a = 0,6.$$

$$p = 0,3.$$

Sustituyendo los valores en la ecuación *, se tiene:

$$R_n = 1 - 0,5 * 0,3(1 - 0,6 * 0,3)^{12-1} = 0,9831.$$

O sea, aproximadamente 98% de certeza de una correcta ejecución de la tarea.

Ahora bien, si se desea determinar la cantidad de intentos a realizar para una confiabilidad dada, se tiene una ecuación de la forma: (Ecuación 25)

$$n = \frac{\ln(1 - R_n) - \ln(F_0 * p)}{\ln(1 - ap)} + 1$$

Ecuación 26: Número de intentos para una confiabilidad dada.

Como ejemplo de aplicación (Ejemplo 1), se desea determinar la cantidad de intentos para que un soldador, en una definida operación de soldadura, le sea atribuida una confiabilidad de $R_n = 0,99$. Los parámetros son:

$$F_0 = 0,5.$$

$$a = 0,6.$$

$$p = 0,3.$$

$$n = \frac{\ln(1 - R_n) - \ln(F_0 * p)}{\ln(1 - ap)} + 1 = \frac{\ln(0,01) - \ln(0,15)}{\ln(0,82)} + 1 = 14,6$$

Es decir, aproximadamente el soldador requiere 15 intentos para lograr una confiabilidad del 99%.

La cantidad de intentos para llegar a una confiabilidad determinada (R_n), depende directamente de los parámetros F_0, p, a .

La influencia para el valor deseado de confiabilidad para que un operador desarrolle y ejecute una determinada tarea se muestra en la Tabla 1 y Gráfico 5:

Probabilidad Inicial	Probabilidad de ajuste	Probabilidad de fracaso	Confiabilidad deseada	Cantidad necesaria de intentos
0,5	0,5	0,5	0,5	0
0,5	0,5	0,5	0,7	0
0,5	0,5	0,5	0,8	2
0,5	0,5	0,5	0,9	4
0,5	0,5	0,5	0,95	7
0,5	0,5	0,5	0,99	11
0,5	0,5	0,5	0,999	20

Tabla 2: Variaciones de probabilidad para confiabilidad deseada.

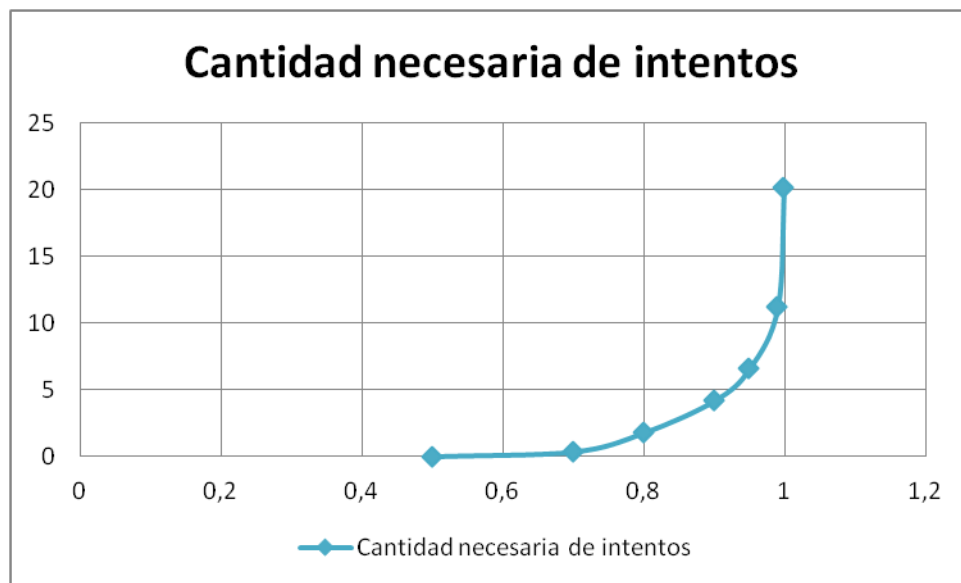


Gráfico 5: Variación de Intentos Necesarios.

En el grafico adjunto se aprecia que:

- El valor de la confiabilidad deseada influye significativamente en la cantidad de intentos de error y aciertos.
- En el caso analizado, para confiabilidades $R_n < 0,7$, no se requiere ningún intento de mejora, mientras que para $R_n > 0,999$ se tienen $n > 20$.

En cuanto al valor de parámetro de ajuste y su variabilidad con el número de intentos para lograr una determinada confiabilidad, se tiene en la Tabla 2 y Gráfico 6:

Probabilidad Inicial	Confiabilidad deseada	Probabilidad de fracaso	Probabilidad de ajuste	Cantidad necesaria de intentos
0,5	0,5	0,5	0	inf
0,5	0,7	0,5	0,1	63
0,5	0,8	0,5	0,3	21
0,5	0,9	0,5	0,5	12
0,5	0,95	0,5	0,7	7
0,5	0,99	0,5	0,8	7
0,5	0,999	0,5	0,8	6
0,5	0,999	0,5	0,95	5
0,5	0,999	0,5	0,99	6
0,5	0,999	0,5	1	6

Tabla 3: Variaciones de Cantidad de Intentos para confiabilidad deseada.

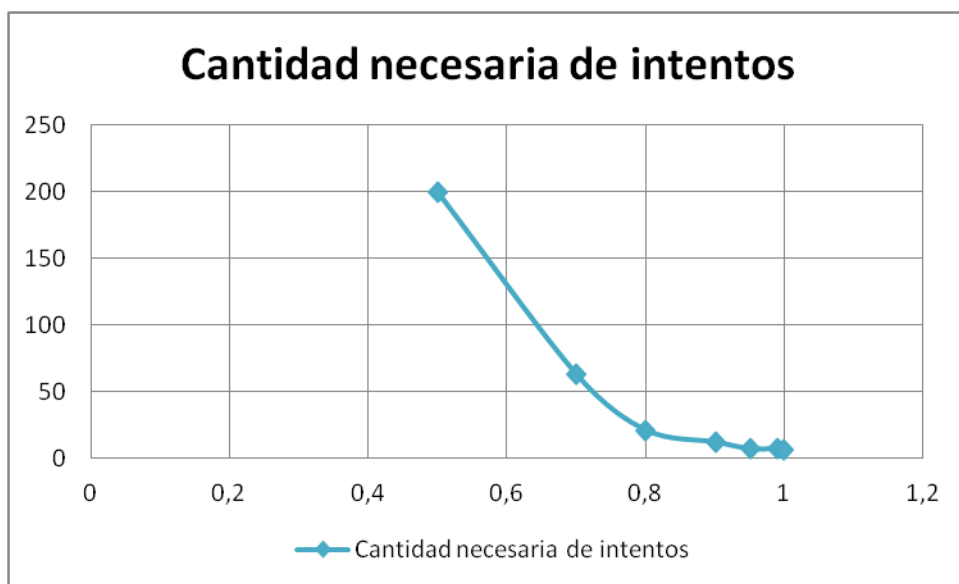


Gráfico 6: Variación para Probabilidad Deseada.

Según el gráfico, se aprecia que:

- El valor de cantidad de intentos disminuye con el aumento del parámetro de ajuste.
- En el caso analizado, para valores de $\alpha < 0,3$ la cantidad de intentos se vuelve inviable ($n > 20$).

Ahora bien, para el análisis de la influencia sobre la probabilidad de fracaso inicial se tiene en la tabla 3:

Probabilidad de ajuste	Confiabilidad deseada	Probabilidad de fracaso	Probabilidad inicial	Cantidad necesaria de intentos
0,5	0,99	0,5	0	1
0,5	0,99	0,5	0,1	7
0,5	0,99	0,5	0,3	10
0,5	0,99	0,5	0,5	12
0,5	0,99	0,5	0,7	13
0,5	0,99	0,5	0,8	14
0,5	0,99	0,5	0,8	14
0,5	0,99	0,5	0,95	14
0,5	0,99	0,5	0,99	14
0,5	0,99	0,5	1	14

Tabla 4: Variaciones de Cantidad de Intentos para Probabilidad inicial.

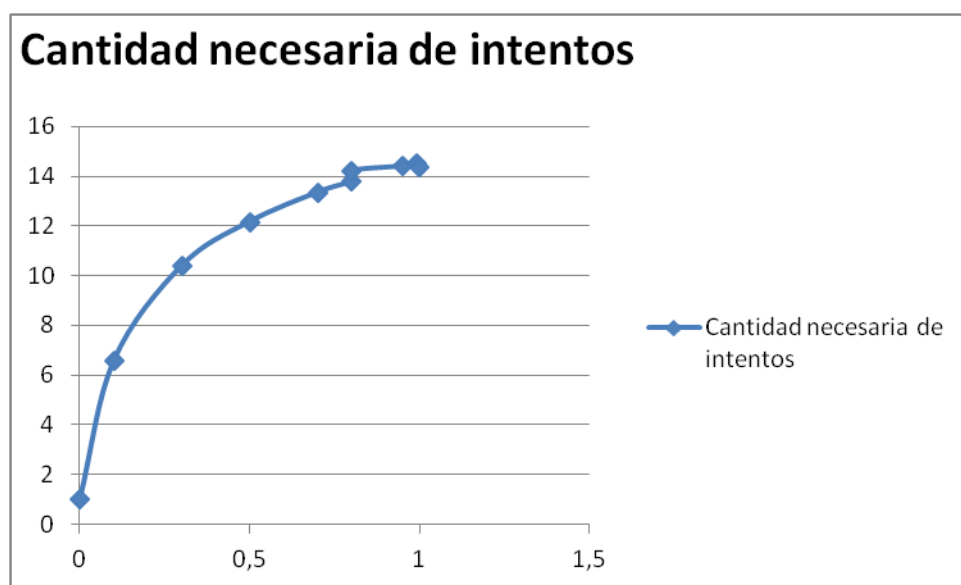


Gráfico 7: Variación para Probabilidad Inicial

Según el gráfico, se puede ver que la cantidad de intentos aumenta significativamente mientras aumenta la probabilidad de suceso anterior. (10)

3.3.6 Tareas con baja tasa de falla.

En tareas y procesos productivos ejecutados por humanos en donde ocurren pocas fallas durante el periodo prefijado de duración, se puede instaurar un procedimiento para el cálculo efectivo de la confiabilidad humana. Para esto, se desea saber como primer valor si el operador satisface una confiabilidad inicial dada (R_i), en función de la cantidad de éxitos (i), en un proceso con “ n ” tareas, probados hasta una determinada duración (t), en condiciones operacionales y ambientales previamente definidas, con un nivel de confianza dado (C).

El proyecto de los ensayos para una distribución a determinar (no paramétrica), o sea, una distribución desconocida para la tarea en cuestión a ser probada, está referido a dos condiciones básicas:

- La duración del ensayo, previamente determinada.
- Aplicación de distribución Binomial.

Por una parte, la duración del ensayo es fija, correspondiendo a ensayos con una duración truncada. El valor de la confiabilidad está asociado a esta duración, que puede ser tiempo, kilómetros, ciclos, etc. Esta condición es limitante, exigiendo un análisis previo basado en observaciones prácticas o comparando con tareas de similar complejidad. Por lo tanto, esta metodología presenta una limitación práctica, es por eso que su aplicación debe poseer un criterio avanzado. Como ejemplo, se puede aplicar a tareas del siguiente tipo:

- Productos montados en líneas de producción, con controles de calidad de operación realizada.
- Datos de asistencia técnica.
- Ventas de productos.

Por otro lado, el cálculo se basa en la distribución Binomial, la cual su ecuación de densidad de probabilidad viene dada por:

$$f(x) = \binom{n}{i} * (1 - R)^i * R^{(n-i)}$$

Ecuación 27: Función de densidad de probabilidad distribución binomial.

Para la obtención de un valor aproximado de la confiabilidad (R), se aplica la siguiente ecuación soportada de la distribución Chi-Cuadrado:

$$R \geq 1 - \frac{\chi^2_{1-C,V}}{2n}$$

Ecuación 28: Confiabilidad en función de distribución Chi-Cuadrado.

En donde V viene siendo los grados de libertad expresados por:

$$V = 2 * (r + 1)$$

Ecuación 29: Grados de libertad.

Y r viene siendo la cantidad de fallas observadas, que satisface:

$$n = r + i$$

Ecuación 30: Cantidad de fallas observadas.

A continuación, se presentan las ecuaciones aproximadas para calcular la confiabilidad en 4 escenarios distintos, es decir, para r=0 a r=3 (0 a 3 fallas):

- Ninguna falla (r=0):

$$V = 2 * (0 + 1)$$

$$R \geq 1 - \frac{\chi^2_{1-C,2}}{2n}$$

- Una falla (r=1):

$$V = 2 * (1 + 1)$$

$$R \geq 1 - \frac{\chi^2_{1-C,4}}{2n}$$

- Dos fallas (r=2):

$$V = 2 * (2 + 1)$$

$$R \geq 1 - \frac{\chi^2_{1-C,6}}{2n}$$

- Tres fallas (r=3):

$$V = 2 * (3 + 1)$$

$$R \geq 1 - \frac{\chi^2_{1-C,8}}{2n}$$

Como ejemplo, se supondrá que se quiere calcular la probabilidad de que un soldador falle en soldar un cordón en un total de 20 piezas consecutivas, con un nivel del confianza del 90%. Como es de notar, a medida que las fallas aumentan, la probabilidad disminuye.

- Todos los cordones en óptimo estado:

$$R \geq 1 - \frac{\chi_{0,1,2}^2}{2n} = 1 - \frac{4,605}{2 * 20} = 0,884875$$

- Falla en 1 cordón:

$$R \geq 1 - \frac{\chi_{0,1,4}^2}{2n} = 1 - \frac{7,779}{2 * 20} = 0,8055$$

- Falla en 2 cordones:

$$R \geq 1 - \frac{\chi_{0,1,6}^2}{2n} = 1 - \frac{10,64}{2 * 20} = 0,7340$$

- Falla en 3 cordones:

$$R \geq 1 - \frac{\chi_{0,1,8}^2}{2n} = 1 - \frac{13,36}{2 * 20} = 0,6660$$

3.3.7 Aplicación modelo de análisis de confiabilidad humana en planta térmica.

Como aplicación, en este apartado se realiza un análisis de confiabilidad humana para una planta de generación de energía térmica. Para este caso de análisis de confiabilidad humana, se usó una mezcla ecléctica de las principales metodologías, las cuales fueron adaptadas al estado de la planta, que combinó Analisis cognitivos, el método THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) y las preguntas planteadas por la THEA (Technique for Human Error Assessment). Se aplicaron las encuestas y las entrevistas al Talento Humano de operación y mantenimiento.

La planta cuenta con un personal de operaciones de mantenimiento de 10 personas en total, con turnos de 8 [horas/turno] y 5 [personas/turno]. Esta planta compuesta de dos calderas de 250 [kWt] cada una, alimenta con energía térmica al Hospital de Quilacahuin, ubicado a 50 [Km] de Osorno.

En la tabla adjunta se presentan las características generales de la planta, junto con una escala de 1 a 5 que representa la complejidad de operación para cada sistema:

Equipos	Potencia Térmica [kW]	Función	Complejidad de Operación (1-5)
Caldera Biomasa Froeling	250	Alimentación Energía Térmica Hospital	5
Caldera Petróleo IVAR	200	Caldera de Respaldo a Biomasa	2
Grupo Bombeo Grundfoss	-	Bombear Agua a 80 [°C] para fines diversos	2

Tabla 5: Datos técnicos Hospital Quilacahuin.

Se usó un horizonte de evaluación de aproximadamente 5 meses, monitoreando desde el 15 de diciembre de 2017 al 25 de mayo de 2018 desde la puesta en marcha oficial de la planta, en los cuales se han registrado los eventos de falla debido al Talento Humano.

En la siguiente tabla adjunta, se aprecian los registros de paradas de planta, por diversas razones, debidos a las fallas netamente humanas. Cabe recalcar que también hubieron muchas otras paradas, pero que su causa no la originó la mano humana, sino que fueron netamente causadas por error en las máquinas.

EVENTO	FECHA DE PARADA	Tiempo entre fallas t (días)	Causa
Puesta en Marcha Planta Térmica	15 Diciembre 2017	-	-
Parada Caldera Biomasa	18 Diciembre 2018	3	Manipulación Incorrecta PLC Temporizador
Parada Caldera Biomasa	25 Diciembre 2018	7	Calibración Incorrecta Transductor de Depresión
Parada Caldera Biomasa	05 Enero 2018	11	Calibración Incorrecta Transductor de Depresión
Parada Caldera Biomasa	11 Enero 2018	6	Calibración Incorrecta Transductor de Depresión
Parada Caldera Petróleo	13 Enero 2018	20	Avería PLC por Apagado Incorrecto en Caliente
Parada Grupo Bombeo	14 Febrero 2018	31	Bombas de circulación no mueven caudal por incorrecto Purgado
Parada Caldera Biomasa	20 Febrero 2018	6	Manipulación Incorrecta Válvula Mezcladora Anti-Condensado
Parada Caldera Biomasa	15 Marzo 2018	23	Sobrecorriente en Motoreductor
Parada Caldera Biomasa	20 Marzo 2018	5	Rotura de ballestas de articulación por accionamiento erróneo
Parada Caldera Biomasa	13 Abril 2018	24	Avería por vaciado incorrecto de cenizas de combustión
Parada Caldera Biomasa	20 Abril 2018	7	Sobrecorriente en Motoreductor
Parada Caldera Biomasa	25 Abril 2018	5	Sobrecorriente en Motoreductor
Parada Caldera Biomasa	25 Mayo 2018	30	Sobrecalentamiento caldera por bajo caudal de agua

Tabla 6: Historial de fallas de operarios.

Ahora, que se posee el historial del tiempo entre las fallas, se procede a ajustar una distribución de probabilidad adecuada, en este caso, se implementará una distribución Weibull Bi-Paramétrica, para su función de confiabilidad se tiene:

$$R(t) = \int_s^{\infty} f(s)ds = e^{[-(\frac{t}{\theta})^{\beta}]}$$

Ecuación 31: Confiabilidad Distribución Weibull Bi-Paramétrica.

Además, se cumple que:

$$F(t) = 1 - R(t)$$

En donde, los parámetros de la distribución son:

t = Variable Aleatoria que representa el tiempo, en días.

β = Parámetro de forma. ($0 < \beta < \infty$).

θ = Parámetro de escala. ($0 < \theta < \infty$).

Para definir los parámetros de la distribución, se utilizará el método de los mínimos cuadrados, con ayuda de Microsoft Excel, primero ordenando la base de datos obtenida en la tabla anterior y obteniendo el valor de rango mediana y los logaritmos naturales que finalmente se someterán a la interpolación lineal.

Orden (i)	Tiempo entre fallas t (días)	RM [F(t)]	LN(t)	LN(LN(1/(1-RM[F(t)])))
1	3	0,05223881	1,09861229	-2,925223234
2	5	0,12686567	1,60943791	-1,99756029
3	5	0,20149254	1,60943791	-1,491606142
4	6	0,2761194	1,79175947	-1,129704207
5	6	0,35074627	1,79175947	-0,839487848
6	7	0,42537313	1,94591015	-0,59052854
7	7	0,5	1,94591015	-0,366512921
8	11	0,57462687	2,39789527	-0,156901171
9	20	0,64925373	2,99573227	0,046589839
10	23	0,7238806	3,13549422	0,252253233
11	24	0,79850746	3,17805383	0,47125468
12	30	0,87313433	3,40119738	0,724949317
13	31	0,94776119	3,4339872	1,082459075

Tabla 7: Historial ordenado de fallos humanos.

Graficando las 2 últimas columnas, se tiene la siguiente relación cuasi-lineal:

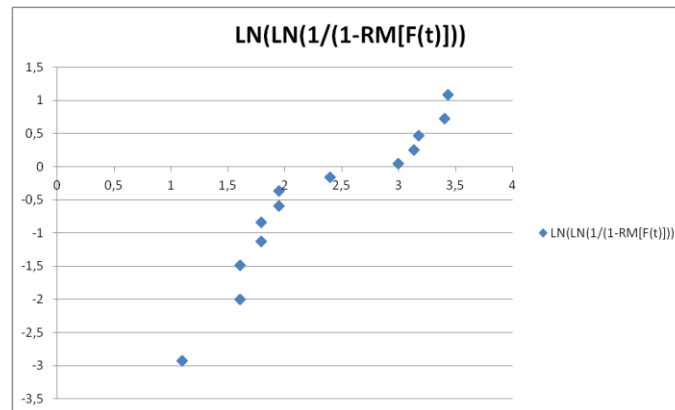


Gráfico 8: Interpolación logarítmica para determinación de parámetros Weibull.

Para este gráfico lineal, se obtienen los siguientes indicadores:

PENDIENTE (beta)	1,33522871
INTERSECCION (b)	-3,6480332
Coef. Pearson (r)	0,93377691
R2	0,87193932

Tabla 8: Indicadores para confiabilidad de operarios.

Desde esta tabla, se pueden extraer los parámetros de la distribución bi-paramétrica de Weibull:

$$\beta = \text{Parámetro de forma} = 1,33522871$$

$$\theta = \text{Parámetro de escala} = EXP - \left(\frac{b}{\beta}\right) = EXP - \left(-\frac{3,6480332}{1,33522871}\right) = 15,36$$

$$MTBF = \text{Tiempo medio entre fallos} = \theta * \gamma \left[1 + \frac{1}{\beta}\right] = 15,36 * 0,9235 = 14,18 \text{ dias.}$$

Por ende, la distribución que mejor se ajusta a este caso, y considerando que la confiabilidad humana aumenta a medida que pasa el tiempo es:

$$R(t) = 1 - e^{[-(\frac{t}{15,36})^{1,335}]}$$

Ecuación 32: Función de confiabilidad humana para Planta Térmica Hospital Quilacahuin.

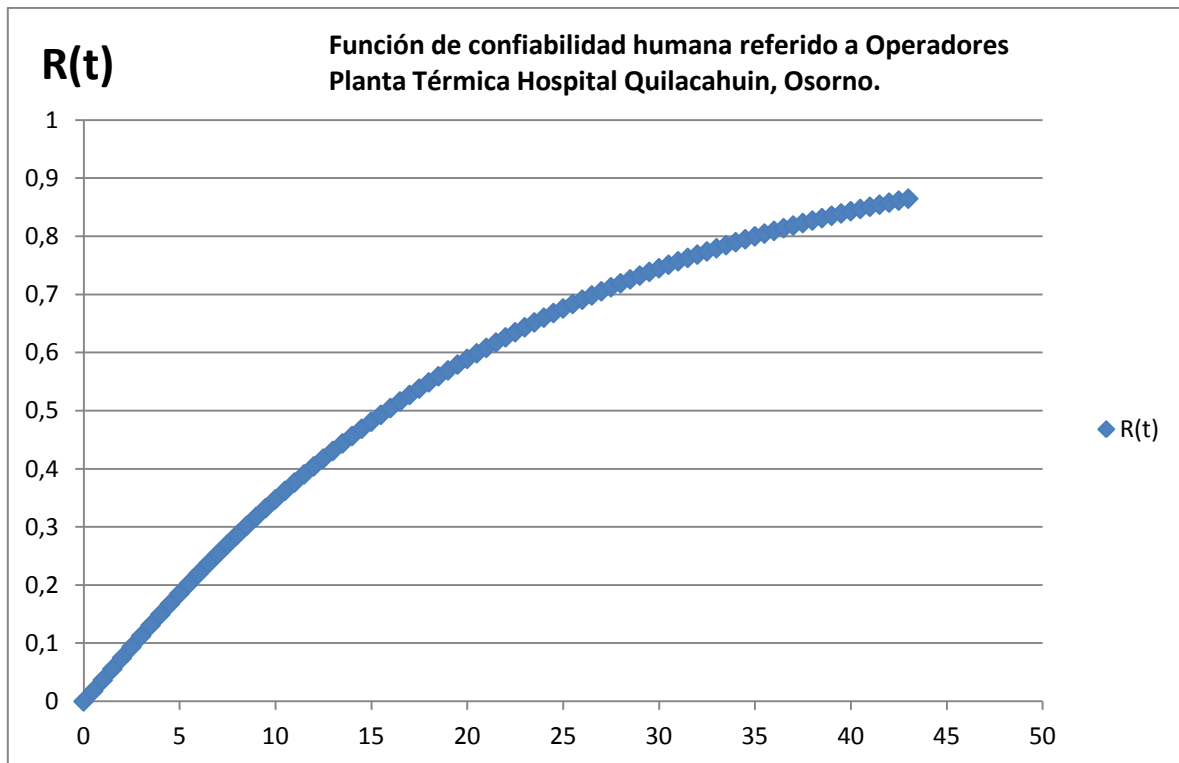


Gráfico 9: Confiabilidad Humana Operarios Hospital Quilacahuin.

Ahora bien, en el análisis existen errores debidos a despiste (exceso de confianza) y estrés, que si bien el personal fue debidamente capacitado, fueron errores que fácilmente podrían haber sido evitados. Por ejemplo, en tareas de alta complejidad, como la calibración que debe ejecutarse al transductor de depresión de la caldera de biomasa, que debe hacerse frecuentemente en periodos adecuados, podrían haberse evitado dos errores, ya que en el primer error, se le realizó capacitación al personal de cómo realizar esta tarea. Esto ocurrió debido a que el personal de operaciones no cuenta con los conocimientos de base técnicos totalmente necesarios, y por eso se hace difícil el entendimiento temprano de los procedimientos. Para el caso de sobre-corriente en el moto reductor del tornillo sinfín de alimentación de combustible, el cual es provocado por el incorrecto llenado del silo, se puede calificar como un error debido a despiste.

En el gráfico se ve que a medida que pasa el tiempo, los operadores van ganando experiencia y, por ende el margen de error que poseen es menor, esto implica que su confiabilidad operacional va a ser creciente, al contrario que ocurre con confiabilidad de máquinas.

4. Conclusiones

- Debido a la gran tasa de fallas humanas que ocurren a diario en distintos campos, es que hace muy útil para las organizaciones poseer métodos y modelos predictivos con el fin de disminuir estas falencias y así aumentar la confiabilidad total. Para esto se proponen diversas técnicas de confiabilidad, para colaborar con la Gestión de Confiabilidad Humana.
- La Gestión de Confiabilidad Humana implica la creación de una nueva cultura organizacional, la formación por competencias, la motivación, liderazgo, desarrollo y gestión del desempeño, así como un proceso eficaz de Gerenciamiento del Conocimiento, que garantice la retención del Capital Humano, como el activo más valioso de la organización.
- Las estrategias para optimizar la Confiabilidad Humana buscan esencialmente recuperar el valor de las personas en la organización. Más importante que el capital y los activos físicos, son el conocimiento y las habilidades de los empleados, y saber cómo usarlos eficazmente para generar Capital Intelectual y lograr el más alto desempeño.
- Adoptando un método de análisis y de evaluación, sistémico y sistemático, de la efectividad personal, es posible generar alta confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad a muy diversos sistemas productivos, por cuanto estos índices dependen del desempeño humano. Hasta hoy se han estudiado múltiples métodos descriptivos para analizar los errores humanos, pero estos métodos pueden ser mejorados con técnicas de análisis numérico y estadístico para la cuantificación de los errores humanos. El objetivo final siempre es mejorar la Confiabilidad Humana a través de la reducción de los errores del personal que se pueden detectar durante los procesos.
- Para el análisis cuantitativo se propone abordar la confiabilidad humana considerando que esta es una consecuencia lógica del estudio de confiabilidad de equipos, como se vio en el último ejemplo de esta tesis, reconociendo que el hombre falla, y que estos fallos pueden clasificarse, cuantificarse y analizarse matemáticamente utilizando una distribución estadística adecuada.

5. Referencias

- 1) Amendola. Luis., "Modelos Mixtos de confiabilidad". Publicado por Datastream. www.mantenimientomundial.com, [2002].
- 2) Amendola. Luis., "Modelos de confiabilidad humana en la gestión de Activos". Universidad Politécnica de Valencia, España, [2004].
- 3) Edvisnsson L., Malone M. S. "El Capital Intelectual Cómo identificar y calcular el valor de los recursos intangibles de su empresa". España: Gestión 2000, [1999].
- 4) Strater. O., Bubb. H., "Assessment of human reliability based on evaluation of plant experience: requirements and implementation". Reliability Engineering and Systems Safety 63 199–219, [1999].
- 5) Vanderhaegen. F., "A non-probabilistic prospective and retrospective human reliability analysis method — application to railway system". Reliability Engineering and System Safety 71, 1–13, [2001].
- 6) Latorella. K. A., Prabhu. P. V., "A review of human error in aviation maintenance and inspection". International Journal of Industrial Ergonomics 26, 133-161, [2000].
- 7) Amendola. Luis., "Modelos de confiabilidad humana en la gestión de Activos". Universidad Politécnica de Valencia, España, [2004].
- 8) M.Sc. Ing. Luis Felipe Sexto, "CONFIABILIDAD INTEGRAL DE ACTIVOS". Centro de estudio de Innovación y Mantenimiento (CEIM/CUJAE), La Habana, Cuba, [2005].
- 9) Nuñez Mendez, J. "Fiabilidad humana en los Análisis probabilísticos de Seguridad". Centro de Investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas, Madrid, España, [1989].
- 10) Amadeu Pallerosi, Carlos. "Confiabilidad Humana", [2007].