

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



TESIS

**“CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE CONFIABILIDAD HUMANA
MEDIANTE EL MODELO DE RIESGO PROPORCIONAL DE COX PARA
PERSONAL OPERATIVO”**

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta

YOLANDA ANGÉLICA BÁEZ LÓPEZ

Director de tesis

DR. MANUEL ARNOLDO RODRÍGUEZ MEDINA

Ensenada, Baja California

Enero, 2014



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS


TESIS DE GRADO

“CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE CONFIABILIDAD HUMANA MEDIANTE EL
MODELO DE RIESGO PROPORCIONAL DE COX PARA PERSONAL OPERATIVO”


PRESENTADA POR

YOLANDA ANGÉLICA BÁEZ LÓPEZ


Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ


Dr. Manuel Arnaldo Rodríguez Medina

Director del Comité


Dr. Jaime Sánchez Leal

Miembro del Comité


Dr. Javier Enrique de la Vega Bustillos

Miembro del Comité


Dr. Rafael García Martínez

Miembro del Comité


Dr. Jorge Luis García Alcaraz

Miembro del Comité

13 de enero de 2014

RESUMEN de la tesis de **YOLANDA ANGÉLICA BÁEZ LÓPEZ** presentado como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la UABC, Ensenada, Baja California, México. Agosto 2013.

**“CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE CONFIABILIDAD HUMANA
MEDIANTE EL MODELO DE RIESGO PROPORCIONAL DE COX PARA
NIVEL OPERATIVO”**

Resumen aprobado por:


Dr. Manuel Arnoldo Rodríguez Medina
Director de tesis

A pesar de la creciente complejidad, tamaño y cambio en los sistemas técnicos de hoy en día, se seguirá dependiendo de la intervención humana para una operación segura; lo cual complica el mantenimiento de la seguridad en sistemas complejos y permite la identificación de un error humano como fuente de múltiples accidentes. Esto ha impulsado el desarrollo de técnicas para el análisis de Confiabilidad Humana (HRA) que estudian al ser humano en el rendimiento de sus acciones de operación; sin embargo, se caracterizan por presentar un alto grado de incertidumbre, lo cual se debe a la adopción de enfoques subjetivos basados en la intuición y la experiencia del evaluador. Esta subjetividad proviene del hecho de que el comportamiento humano puede ser afectado por distintos factores, como lo son: sociales, ambientales, psicológicos, difíciles de modelar y cuantificar, así como a la carencia de datos de comportamiento humano.

El presente trabajo plantea la construcción de un modelo de confiabilidad Humana utilizando el modelo de Riesgo Proporcional de Cox que permita identificar que factores, y en que medida, contribuyen al error humano, además de representar la tasa de riesgo humano y valorar su contribución a la confiabilidad del sistema. Utilizar un modelo de riesgo proporcional se considera adecuado por estar en función de una tasa de riesgo o tasa instantánea de riesgo que considera la información de un conjunto de variables independientes del tiempo, así como de una función de riesgo de referencia que no considera el efecto del conjunto de variables.

Para fines de esta investigación la tasa de riesgo esta determinada por una función lineal de factores independientes que permiten, en función del tiempo, calcular la probabilidad de que el operador en línea de ensamble manual cometa un error. Estos factores se obtuvieron mediante la revisión de literatura de las diferentes taxonomías que explica el error humano, para posteriormente caracterizar a una muestra de 120 operadores de línea; dicha caracterización representa el ambiente operacional del operador. Posteriormente, mediante la determinación de los tiempos de falla de los operadores se verifica la función del comportamiento de los tiempos de aparición del error, el cual está descrito por una distribución Weibull.

Como resultado de la investigación se identificaron las variables que influyen en el contenido del error humano y que conforman el ambiente operacional del operador, se definieron los parámetros de la distribución de falla base para modelar la tasa de riesgo del error humano, se desarrolló un modelo de confiabilidad humana que describe el comportamiento de riesgo de falla tomando en cuenta el ambiente operacional y el tiempo.

El modelo obtenido fue validado en un grupo de 30 operadores de línea de ensamble manual, siendo los resultados consistentes con el modelo original, confirmando que las variables significativas y que deben considerarse en el ambiente operacional del trabajador son: Personalidad, Edad, motivación, Memoria y estrés.

A mis Padres J. Rosario Báez y Yolanda López

A mis hermanos Ana, Jessica y Amado

A mis sobrinos Joseam, Adrián e Ivanna

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por su infinito amor que me acompaña día a día, por darme las fuerzas para continuar y lograr mis metas.

Al Dr. Manuel Arnoldo Rodríguez Medina, paciencia, su ejemplo de superación constante y por sus sabios consejos, que me permitieron realizar este trabajo de investigación.

Al Dr. Jaime Sánchez Leal, por sus valiosos consejos y comentarios durante todo este proceso de formación doctoral.

Al Dr. Enrique Javier de la Vega Bustillos, por sus comentarios tan acertados en todas las presentaciones y revisiones de la tesis, que complementaron la formación doctoral.

Al Dr. Rafael García Martínez, por la atención prestada durante el desarrollo de este trabajo y por todos sus comentarios que permitieron mejorar este proyecto de tesis.

A la Dr. Jorge Luis García Alcaraz, por el apoyo brindado y observaciones durante todo el transcurso de mi doctorado.

A mis padres J. Rosario y María Yolanda quienes siempre me han brindado su amor y apoyo incondicional, y que con su ejemplo me motivan a trabajar y seguirme superando.

A mis hermanos Ana Sugey, Jessica Mineli, Jesús Amado, porque aunque estén lejos siempre están conmigo, brindándome su apoyo constante.

Al Dr. Oscar Roberto López Bonilla que con su amistad y apoyo hizo posible realizar este proyecto.

Al MA. Saúl Méndez Hernández por su paciencia, amistad y ejemplo de superación.

Al director de la FIAD, Dr. Juan Iván Nieto Hipólito, por el apoyo brindado durante la realización de este proyecto.

Al coordinador de posgrado, Dr. Juan de Dios Sánchez, por sus atinadas asesorías administrativas.

A mis amigos Diego, Ever, Jorge, Efrén, Julián, Ever Gutiérrez, Dora Luz, Claudia L., Claudia G., Heidy, Alma, Jesús, Cadena y Efraín quienes me brindan en todo momento su amistad, apoyo y consejos, quienes además han venido a formar parte de mi familia.

A la Universidad Autónoma de Baja California, especialmente, a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, por ser pieza fundamental en mi crecimiento profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN	iii
AGRADECIMIENTOS	vi
TABLA DE CONTENIDO	Vii
LISTA DE FIGURAS	Xi
LISTA DE TABLAS	Xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Preguntas de investigación	5
1.5 Hipótesis	5
1.6 Justificación	6
1.7 Limitaciones	8
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Confiabilidad	9
2.1.1 Función de Confiabilidad	9
2.1.2 Tasa de falla	10
2.1.3 Función acumulativa de falla	11
2.2 Distribución Weibull	12
2.3 Modelo de Riesgo Proporcional de Cox	13
2.3.1 Ventajas del Modelo de Riesgo Proporcional de Cox	14
2.3.2 Riesgos proporcionales	14
2.4 Correlación de múltiples factores	15
2.4.1 Análisis de correlación de múltiples factores	15
2.5 Confiabilidad Humana	16

2.5.1 Técnica para la prevención de la tasa de error humano (THERP)	17
2.5.2 Método para la prevención y reducción del error humano sistemático (SHERPA)	18
2.5.3 Juicio de expertos	20
2.6 Error Humano	21
2.6.1 Factores de forma del comportamiento humano	22
2.7 Perspectivas del análisis del error humano	23
2.7.1 Explicaciones fuera de la persona	23
2.7.2 Explicaciones desde dentro de la persona: componentes humanos	25
2.7.3 Explicaciones desde la interacción persona – máquina	29
2.7.4 Explicaciones desde la relación persona – contexto	31
2.8 Psicometría	31
2.8.1 Medición	32
2.9 Test psicométricos	33
2.9.1 Test Dominó (D48)	34
2.9.2 Test Wonderlic	34
2.9.3 Test Terman – Merrill	34
2.9.4 Test Barsit	35
2.9.5 Test de Personalidad	35
2.10 Relación entre los factores que influyen en el cometido de errores	36
2.10.1 Estrés	36
2.10.2 Edad	36
2.10.3 Experiencia	36
2.10.4 Personalidad	37
3. METODOLOGÍA	38
3.1 Fase 1. Identificación de los factores que pueden influir en el error humano	39
3.1.1 Revisión de las diferentes corrientes que analizan el error humano	39
3.2 Fase 2. Obtención del total de factores que pueden influir en el error humano	41
3.2.1 Concentrar el total de factores que pueden influir en el error humano	41
3.3 Fase 3. Reducción del número de factores a considerar en el modelo	42

3.3.1 Agrupación de los factores que se encuentran relacionados entre sí	42
3.3.2 Determinación de los factores que están correlacionados	42
3.4 Fase 4. Estimación de los parámetros del modelo de regresión	43
3.4.1 Estimación del tamaño de la muestra	44
3.4.2 Obtención de las condiciones de operación de los trabajadores de línea de ensamble manual	44
3.4.3 Medición del cometido de errores de los trabajadores de la muestra	44
4.4 Revisión de la existencia de control estadístico en la media y desviación estándar del cometido de errores	45
3.4.5 Estimación de los parámetros desconocidos de los factores del modelo	46
3.4.6 Obtención del Modelo de Regresión	46
3.5 Fase 5. Determinación de la tasa de falla base	46
3.5.1 Determinación del tipo de distribución de probabilidad de los errores cometidos por los operadores de línea analizados	46
3.5.2 Obtención de la tasa de falla base	47
3.6 Fase 6. Obtención de la tasa de riesgo mediante el modelo de riesgo proporcional de Cox, utilizando la información del ambiente operacional y la tasa de falla base	48
3.7 Fase 7. Validación del modelo de Confiabilidad Humana	48
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.1 Riesgo relativo y análisis de varianzas	57
4.2 Análisis de varianzas	57
5. CONCLUSIONES	59
5.1 Conclusiones de acuerdo con las Hipótesis	59
5.2 Conclusiones de acuerdo con los Objetivos	60
5.3 Conclusiones Generales	60
6. RECOMENDACIONES	61
6.1 Futuras líneas de investigación	61

7. REFERENCIAS	62
8. ANEXOS	67
8.1 Anexo 1. Escalas consideradas para cada uno de los factores	67
8.2 Anexo 2. Evaluación de los primeros seis factores en trabajadores de línea de ensamble manual	68
8.3 Anexo 3. Caracterización de los 120 operadores en los factores a considerar en el Modelo de Confiabilidad Humana	69
8.4 Anexo 4. Datos para validar el modelo de Confiabilidad Humana	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Elementos de Confiabilidad Humana	16
Figura 2.2	Continuidad entre comportamiento consciente y automático	25
Figura 2.3	Modelo de J. Rasmussen: Taxonomía SRK	26
Figura 3.1	Teorías que explican el error desde fuera de la persona	39
Figura 3.2	Teorías que explican el error desde adentro de la persona	40
Figura 3.3	Teorías que explican el error desde la interacción	40
Figura 3.4	Factores relacionados con la Carga de Trabajo	42
Figura 3.5	Factores relacionados con la Edad	42
Figura 3.6	Factores relacionados con la Experiencia	42
Figura 3.7	Factores relacionados con la Personalidad	42
Figura 4.1	Gráfica de Residuos para la Media	54
Figura 4.2	Gráficas de probabilidad para la media	55
Figura 4.3	Gráfica de riesgo para la Media	55
Figura 4.4	Gráfica de fallas acumuladas para diferentes Medias	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Fórmulas de la distribución Weibull	13
Tabla 2.2	Factores de forma del comportamiento (PSF)	22
Tabla 2.3	Continuación Tabla 2.2 Factores de forma del comportamiento (PSF)	23
Tabla 3.1	Concentrado de factores de las diferentes corrientes que explican el error humano	41
Tabla 3.2	Concentrado de factores que explican el error humano	43
Tabla 3.3	Test psicométricos utilizados para evaluar a los operadores	43
Tabla 3.4	Distribuciones de probabilidad presentes en el cometido de errores	47
Tabla 4.1	Análisis de correlación de múltiples variables para nueve factores	50
Tabla 4.1	Continuación de la Tabla 4.1	51
Tabla 4.3	Regresión paso a paso para determinar los factores del modelo	52
Tabla 4.4	Parámetros β de los factores del modelo	53
Tabla 4.5	Análisis de varianza	53
Tabla 4.6	Concentrado de la tasa de falla base para diferentes tiempos de cometido de error	56
Tabla 4.7	Riesgo relativo y análisis de varianzas para los factores categóricos significativos	58

1. INTRODUCCIÓN

La confiabilidad inicia su desarrollo durante la segunda guerra mundial, siendo en el año 1945 donde se utilizan métodos avanzados para estimar probabilidades de falla y expectativas de vida de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos utilizados en la defensa e industria aeroespacial. En un esfuerzo por combinar el cálculo estadístico con la teoría de las probabilidades, se gestiona la ingeniería de confiabilidad, donde el avance significativo y decisivo se produce a partir de la profundización de la naturaleza aleatoria de los mecanismos de daño, los cuales son la causa raíz de los deterioros y fallos (Ecay, 2008).

En 1970 la ingeniería de confiabilidad deja de ser exclusiva de la "defensa" y se aplica a las plantas nucleares de generación de energía, posteriormente se generaliza su uso en plantas refinadoras de petróleo, químicas y petroquímicas. Actualmente, además de tener aplicación en todo tipo de procesos industriales, se ha convertido en una herramienta indispensable para la gestión moderna del diseño, construcción, operación y mantenimiento de las principales tecnologías existentes, esto como consecuencia de ser considerada una de las herramientas más precisas que aseguran la viabilidad de los procesos industriales.

La función de confiabilidad está ampliamente relacionada con los índices de seguridad y de riesgo (McCormick, 1981; Thompson, 1988), y durante mucho tiempo, en evaluaciones de confiabilidad, los científicos centraron, casi exclusivamente, su atención en el sistema de elementos tecnológicos, teniendo en cuenta nuevas tecnologías físicas descritas por sofisticados modelos, adecuados para simular ejecuciones e interpretar comportamientos; sin considerar que las fuentes primarias enriquecen el error de los sistemas, volviéndose más vulnerables, tal como o menciona Laprie (Dondossola & Mouri, 2001), "las fuentes de error pueden estar relacionadas con aspectos primarios, cuyo origen es físico o humano".

En la actualidad, entre la comunidad científica, el papel humano ha cobrado cada vez mayor interés en el desarrollo de nuevas tecnologías, lo cual ha originado la necesidad de describir las interacciones de sistemas humanos, lo que ha llevado al desarrollo del Análisis de la Confiabilidad Humana (HRA, por sus siglas en inglés), el cual estudia al ser humano en el rendimiento de las acciones de operación; sin embargo, el HRA se caracteriza por un alto grado de incertidumbre, lo cual ha sido determinante en la adopción de un enfoque subjetivo, frecuentemente basado en la intuición y la experiencia. La administración del sistema en el que

el costo y la calidad son los principales requisitos para competir en el mercado, determina la necesidad de desarrollar un análisis para obtener un modelo capaz de representar todos los aspectos de las interpretaciones del sistema, con referencia no únicamente a "mecanismos de confiabilidad", sino también a información y confiabilidad humana.

1.1 Antecedentes

La Confiabilidad de un sistema está en función de los elementos que definen su operación, para sistemas complejos, además de la confiabilidad tecnológica de los componentes del sistema es necesario considerar los aspectos tecnológicos de la información y las interacciones humanas (Yamamura et al., 1989). En muchos sistemas que involucran la interacción entre humanos y máquinas, una de las principales contribuciones a las probabilidades de falla se debe a sucesos provocados por seres humanos, según se informa en la serie de estadísticas (Bedford & Cook, 2001); mismos que son conocidos como "factores humanos" y se definen como las capacidades físicas y psicológicas de la persona, el entrenamiento y la experiencia, así como las condiciones en que ésta debe operar para alcanzar el propósito al que está destinado (Amendola, 2002).

Rasmussen (1990) expresa su preocupación porque a pesar de la creciente complejidad, tamaño y cambio en los sistemas técnicos de hoy en día, se seguirá dependiendo de la intervención humana para una operación segura. Esto complica el mantenimiento de la seguridad en sistemas complejos y permite la identificación del error humano como causa de accidentes cada vez más importantes. Sostiene además que, el error humano en conexión ante desastres industriales comúnmente se refiere a un error de juicio o de la atención durante las operaciones, mantenimiento o en curso de gestión.

En su análisis profundo sobre los factores que intervienen en el error humano, Collins & Leathley (1995) enfatiza que los ingenieros de seguridad y analistas de confiabilidad por lo general prestan más atención a los equipos y a los procesos técnicos que a los factores sociales y psicológicos como mecanismos que predisponen a un error personal; dejando de lado el hecho que es sobre el factor humano que recae la probabilidad de falla de un sistema que en muchas ocasiones no ha sido pensado para él (Dejours, 1998).

La confiabilidad inherente de un sistema se relaciona con el número de fallas que ocurre en determinado tiempo y bajo específicas condiciones de operación. Por su parte, la confiabilidad

humana se vincula con el número de errores que se cometen en un tiempo determinado y bajo específicas condiciones de trabajo. Por lo que la confiabilidad, en el contexto de operación de un sistema, suma los modos de falla que ocurren por naturaleza del sistema en interacción con su ambiente (fallas técnicas) y aquellas determinadas por las personas que interactúan con el sistema (modo de falla humana o errores).

Un motivo de preocupación muy importante en las industrias de alto riesgo es un error humano (Centro de Química de seguridad CCPS, Reason 1990, 1995) que puede conducir a accidentes con consecuencias adversas, lo cual ha impulsado numerosas tentativas de conversión de la tasa de error humano en unidades numéricas para el análisis de probabilidad de riesgo. Esta área asociada con la identificación, análisis y gestión del error humano es generalmente conocida como HRA, y da origen a la confiabilidad humana, la cual se define como "el cuerpo de conocimientos que se refiere a la predicción, análisis y reducción del error humano, enfocándose sobre el papel de la persona en las operaciones de diseño, mantenimiento, uso y gestión de un sistema sociotécnico". Las técnicas más conocidas en el HRA son: la técnica para la predicción de la tasa de error humano (THERP) y el método para la predicción y reducción del error humano sistemático (Systematic Error Reduction and Prediction Approach, SHERPA).

Estas técnicas han sido ampliamente criticadas, dichas críticas se centran en dos aspectos: en primer lugar, el desgaste de la tarea en acciones elementales, porque ello no siempre es coherente con la organización psicológica de la tarea y se cuestiona además la sumatoriedad o no de las acciones elementales; en segundo lugar, el origen y la aplicabilidad a situaciones diversas de los datos que se dan en una serie de tablas, lo cual provoca que algunos analistas puedan tender a considerar sólo los errores de los que tengan información en las bases de datos, ignorando otros errores que pudieran ser importantes y afectar la tarea. Sólo una persona experta en confiabilidad humana puede determinar con precisión las modificaciones ergonómicas necesarias para tratar las causas psicológicas de algunos errores.

Teniendo en cuenta las limitaciones que presentan las técnicas, así como el hecho de que el análisis del error humano, de la confiabilidad de sus actos es un tema de gran complejidad, en el que conviene tener presente que el ser humano actúa siempre desde un gran número de variables personales, organizacionales, situacionales y/o ambientales, que a menudo imposibilitan la determinación definitiva de las causas, se considera necesario diseñar un

modelo de confiabilidad humana que permita identificar qué factores, y en qué medida contribuyen al error humano, además de representar la tasa de riesgo humano y valorar su contribución a la confiabilidad del sistema.

1.2 Planteamiento del problema

La complejidad de los problemas está relacionada con la cantidad de información que describe al sistema (Boscolo, 1996), y es ampliamente reconocido que el error humano tiene gran impacto en la confiabilidad de sistemas complejos. En general, la contribución del factor humano al comportamiento de un sistema es, al menos, tan importante como la confiabilidad de los componentes.

Para obtener una medida correcta de confiabilidad de un sistema debe tenerse en cuenta la posible contribución del error humano, ya que sin la incorporación de éste los resultados son incompletos y mal valorados. Los análisis deben acomodar en forma satisfactoria la contribución humana al riesgo de accidente (a los fallos y a su recuperación), lo que ha impulsado numerosas tentativas de conversión de la tasa de error humano en las unidades numéricas requeridas por el análisis de probabilidad de riesgos. Sin embargo, los modelos de confiabilidad humana más utilizados presentan limitaciones debido a que el comportamiento humano puede ser afectado por distintos factores, como lo son: sociales, ambientales, psicológicos, difíciles de modelar y cuantificar, así como a la carencia de datos de comportamiento humano. Todas estas características hacen que las probabilidades de transferir las herramientas para el análisis de la confiabilidad técnica al de la confiabilidad humana sean limitadas, con alto nivel de subjetividad, que depende del observador, misión y entorno operativo.

La complejidad del sistema debe ser reducida y el principal problema está relacionado con esta simplificación mediante técnicas de aproximación, por lo que es necesario diseñar métodos de análisis de confiabilidad humana que permitan identificar el error humano y valorar su contribución a la confiabilidad del sistema.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de confiabilidad humana para el personal de línea de ensamble.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Definir los factores que influyen significativamente en el cometido de errores por parte del trabajador, provocando un efecto sobre la confiabilidad humana.
2. Definir los parámetros de la distribución de falla base para modelar la tasa de riesgo del error humano.
3. Desarrollar un modelo de confiabilidad humana para describir el comportamiento del riesgo de falla del operador tomando en cuenta el efecto del ambiente operacional y el tiempo.
4. Determinar el ambiente operacional adecuado para el trabajador.
5. Determinar mediante el uso de un modelo, la tasa de errores del trabajador, operando en un ambiente determinado.
6. Validar el modelo obtenido.

1.4 Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son los factores que determinan el ambiente operacional e influyen significativamente en la Confiabilidad Humana?
2. ¿Qué tipo de modelo se podría utilizar para describir el comportamiento de la tasa de error humano, tomando en cuenta el ambiente operacional y el tiempo en jornada?
3. ¿Es posible determinar los parámetros adecuados que integrarían un modelo que permita identificar un ambiente operacional propicio para aumentar la Confiabilidad Humana?
4. ¿Qué tipo de influencia tiene el tiempo en jornada del operador en el cometido de errores?

1.5 Hipótesis

1. Los factores que determinan el ambiente operacional e influyen significativamente en la Confiabilidad Humana son el estrés, memoria, motivación y personalidad de los operadores.
2. El modelo de riesgo proporcional de Cox es útil para describir el comportamiento de la tasa de error humano, tomando en cuenta el ambiente operacional y el tiempo en jornada.
3. Los parámetros del modelo obtenido son adecuados para identificar un ambiente operacional propicio que aumente la Confiabilidad Humana.
4. La probabilidad de que el operador cometa errores se incrementa conforme transcurre su tiempo en jornada.

1.6 Justificación

En el accionar de los procesos industriales, independientemente de su tipo, se encuentra que en cada cierto tiempo sucede alguna catástrofe que hace recordar que, el eslabón más débil de un sistema de producción es el ser humano, quien es el que tiene en sus manos la garantía y la confiabilidad de su funcionamiento. Cuando esto sucede es común señalar que se trata de un error humano y se dice que la falta de confiabilidad del sistema se debe a que, al fin y al cabo, está manejado por seres humanos.

En la industria con riesgo asociado, son frecuentes los errores humanos que conducen a situaciones catastróficas, por lo cual los análisis de Confiabilidad Humana se convierten en una herramienta imprescindible para mejorar su seguridad, eficiencia y bienestar en el trabajo. Como por ejemplo, se puede mencionar una de las industrias con mayor riesgo operativo, donde el impacto del factor humano ha tenido una gran contribución a la seguridad: la industria del área energética. En ella se calcula que de 70 a 90 % de los accidentes se deben a factores humano. Algunos de los grandes como Chernobyl, Exxon Valdez, Piper Alpha y la Plataforma Petrolera P-36 de petrobas, ha tenido al error humano como mayor contribuyente (Magorio, 2002). A estos accidentes o eventos no deseados se les presta mayor atención por las implicaciones públicas que tienen; mientras que la ocurrencia de perturbaciones menores no llaman la atención y, en ocasiones se considera un conjunto de eventos normales del proceso, cuando la acumulación de estas deficiencias es la que produce los eventos mayores (Labrador 2011). A pesar de no parecer razonable, en muchas ocasiones, el error o evento de falla humana es tratado como inevitable, que escapa siempre a lo controlable o que no es posible medir, aceptándose en consecuencia como parte normal y presupuestable del proceso cognitivo (Labrador 2013).

Aún cuando la mayoría de los estudios de Confiabilidad se han dirigido a los procesos de mayor riesgo relativo, estos conceptos tienen una extensa aplicación en el ámbito de los sistemas de manufactura, donde las consecuencias de falla son menores pero normalmente representan mayor recurrencia, produciendo pérdidas importantes en calidad, imagen y rentabilidad global del negocio (Yáñez, 2004).

Es de crucial importancia percibir y reconocer el impacto del error humano, no sólo como causa de accidentes sino también como causa de interrupciones no esperadas. Sobre los accidentes es importante considerar la relación existente entre la intervención de los operadores para solucionar perturbaciones y la causalidad de los mismos. Se acepta en forma general que entre el 30 y 65% de los accidentes ocurridos en sistemas de manufactura modernos, ocurren precisamente cuando el operador interviene para intentar solucionar un problema o una perturbación. Estudios recientes para analizar la ocurrencia de accidentes e incidentes menores (Labrador y Fernández, 2011), muestran porcentajes importantes de incidencia del error humano en su causalidad. A pesar de la variabilidad encontrada entre autores y contextos industriales, se acepta de modo general que la contribución del error humano a esta causalidad es importante y que oscila entre un 50 y 80%. En lo que respecta a la causalidad de las interrupciones no esperadas, se estima que la contribución del error humano se cifra entre 15 y 20% (normalmente problemas de mala operación). En términos generales puede afirmarse que la confiabilidad integral de un sistema está afectada directa e indirectamente, entre un 70 y un 90% por la influencia de las desviaciones en la gestión del ser humano.

Un análisis de las posibles causas de la falta de acción en la mayoría de los casos, indica que esto se debe a las dificultades asociadas a la aplicación de las técnicas disponibles para el análisis del error humano, así como a dificultades para la aplicación práctica de los resultados, lo que imposibilita la adopción de políticas de análisis y reducción sistemática del error humano. A lo anterior hay que adicionar que siempre se considera que los sistemas productivos se encuentran contruidos con la suficiente robustez para resistir variaciones en su funcionamiento normal, obviando que éstos son diseñados por individuos con las mismas deficiencias y circunstancias de quienes los operarán y mantendrán posteriormente (Labrador y Fernández, 2011). En este sentido, es necesario realizar mayores esfuerzos para desarrollar y difundir metodologías y herramientas que puedan suplir las deficiencias actuales y que permitan conocer y comprender las condiciones de diseño, del mismo modo que conocen las condiciones y comprenden las condiciones de operación de un proceso productivo. Esto ayudaría a identificar, jerarquizar y analizar las acciones humanas que producen desviaciones en los procesos. Es por lo tanto necesario caracterizar los factores influyentes en los aspectos que producen baja confiabilidad desde el punto de vista humano, mediante un modelo de confiabilidad humana que represente la tasa de riesgo humano y valore su contribución a la confiabilidad del sistema.

1.7 Limitaciones

En el modelo no se considerará el hecho de que algunos operadores no siguen los procedimientos establecidos, así como tampoco la intencionalidad del trabajador en el cometido de errores.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Confiabilidad

La Confiabilidad es conocida como la probabilidad de que un componente o sistema desempeñe satisfactoriamente la función para la que fue creado, durante un periodo establecido y bajo condiciones de operación específicas. Cada día toma más relevancia debido a la creciente demanda por productos de calidad que tengan un buen desempeño durante un tiempo suficientemente largo (De la Vara, 2004).

Una de las áreas de ingeniería de confiabilidad es la modelación de la misma, debido a que los procesos en general se comportan de manera probabilística. En estudios de confiabilidad se puede encontrar diversos modelos de distribuciones de probabilidad, de los cuales se debe elegir el que mejor se ajuste a los datos que se analizarán.

Los modelos teóricos utilizados para describir el tiempo de vida útil de los equipos son conocidos como “distribuciones de vida”. Para determinar el tipo de distribución que siguen las fallas de un sistema es necesario restringir perfectamente el producto y tiempo de estudio.

2.1.1 Función de confiabilidad

Cualquier sistema presenta fallas después de determinado tiempo de operación. Entendiéndose por falla cualquier alteración que por alguna causa provoque la interrupción de la ejecución de una tarea determinada.

La Distribución de Probabilidad Acumulada (FDA), con lo que respecta al análisis de los riesgos, se refiere a la probabilidad de que una unidad de la población elegida aleatoriamente presente una falla después del tiempo t .

La función de Confiabilidad o Resistencia (complemento de la FDA) proporciona la probabilidad de que una unidad o fracción de la población presente fallas hasta después del tiempo (Tobías, 1986), es decir:

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{2.1}$$

Si se aplica la técnica de multiplicación de probabilidades, la probabilidad de que n unidades idénticas no presenten fallas después del tiempo t es:

$$[R(t)]^n \quad (2.2)$$

Por otra parte, para calcular de que al menos una de las n unidades fallen (regla del complemento) es:

$$1 - [R(t)]^n = 1 - [1 - F(t)]^n \quad (2.3)$$

Para una mejor diferenciación entre n y N se puede decir que si n unidades bajo las mismas condiciones inician su operación al mismo tiempo; N es el número esperado de unidades que presentarán fallas hasta el tiempo t ; y n el número de unidades que después del tiempo t seguirá operando.

2.1.2 Tasa de falla

Esta función es también conocida como Tasa Instantánea de Falla o Tasa de Riesgo. Las unidades que la tasa de falla utiliza son el “número de entidades que fallan por unidad de tiempo” (Tobías, 1986). Se debe aclarar que no es una probabilidad y que puede tomar valores arriba de 1, exceptuando valores negativos.

La probabilidad de que un elemento falle en un intervalo de tiempo Δt dado que no presentó falla alguna hasta el tiempo t es:

$$\begin{aligned} P[t < T < t + \Delta t / T > t] &= \frac{P[(t < T < t + \Delta t) \cap (T > t)]}{P[T > t]} \\ &= \frac{P[t < T < t + \Delta t]}{P[T > t]} \\ &= \frac{p[t < T < t + \Delta t]}{1 - P[T \leq t]} \\ &= \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{1 - F(t)} \\ &= \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Donde:

$F(t + \Delta t)$ = Función de Probabilidad Acumulativa en el tiempo

$F(t)$ = Función de Probabilidad Acumulativa en el tiempo

$R(t)$ Función de Confiabilidad

Para calcular la tasa de falla en un intervalo de tiempo es necesario calcular el riesgo de falla en periodos de tiempos iguales, razón por la cual se divide entre h , como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} h(t, t + \Delta t) &= \frac{P[t < T < t + \Delta t / T > t]}{h} \\ &= \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{h} \cdot \frac{1}{R(t)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Si se requiere calcular la tasa de falla en un momento instantáneo es necesario aproximar a cero el periodo de tiempo (Tobías, 1986):

$$\begin{aligned} h(t) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{h} \cdot \frac{1}{R(t)} \\ &= \frac{F'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.1.3 Función acumulativa de falla

La función $H(t)$ se calcula integrando la tasa de falla en el intervalo :

$$H(t) = \int_0^t h(x) dx \quad (2.7)$$

La Función Acumulada de Falla se enuncia por la siguiente ecuación:

$$H(t) = -\ln R(t) \quad (2.8)$$

Posteriormente, se procede a derivar la ecuación anterior para demostrar la igualdad establecida:

$$h(t) = \frac{d}{dt} [-\ln R(t)]$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{R(t)} \frac{d}{dt} R(t) \\
&= -\frac{1}{R(t)} \frac{d}{dt} [1 - F(t)] \\
&= \frac{f(t)}{R(t)} \\
&= h(t)
\end{aligned} \tag{2.9}$$

En estudios de confiabilidad es común que se establezca o se aproxime suficientemente la tasa de falla de determinado sistema. A continuación se demuestra la manera en que dado es posible calcular

$$\begin{aligned}
H(t) &= \int_0^t h(x) dx \\
&= \int_0^t \frac{d}{dt} -\ln R(t) dt \\
&= -\ln R(t)
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Si se despeja $R(t)$ de la ecuación anterior se obtiene la siguiente ecuación:

$$R(t) = \exp(-H(t)) \tag{2.11}$$

De donde:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t h(x) dx\right) \tag{2.12}$$

La ecuación anterior establece la relación entre la función de riesgo y la función de distribución Acumulada.

2.2 Distribución Weibull

Este tipo de distribución se aplica a variados fenómenos aleatorios, ya que proporciona una aproximación aceptable a la ley de probabilidades de muchas variables aleatorias. Es utilizada cuando la tasa de falla no es contante y sigue una clara tendencia creciente o decreciente (falla temprana o tardía). La Weibull se generó mediante la derivación de la distribución exponencial. En la tabla 2.1 se muestran las formulas de la distribución Weibull.

Tabla 2.1: Fórmulas de la distribución Weibull

Descripción	Fórmula
Función de Distribución de Probabilidad	$f(x) \begin{cases} = \frac{m}{c} \left(\frac{t}{c}\right)^{m-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{c}\right)^m\right) & t \geq 0 \\ \text{En otro caso} = 0 \end{cases}$
Función de Distribución Acumulada	$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{c}\right)^m\right)$
Función de Confiabilidad	$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{c}\right)^m\right)$
Tasa de Falla	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{m}{c} \left(\frac{t}{c}\right)^{m-1}$

Donde:

- m= Parámetro de forma
- c= (características de vida)
- t= Tiempo

2.3 Modelo de riesgo proporcional de Cox

En 1972, Cox introduce el modelo de regresión más utilizado en análisis de supervivencia, este modelo se puede describir mediante:

$$\lambda_i = (t/z) = e^{(\beta_1 z_{1i} + \beta_2 z_{2i} + \dots + \beta_p z_{pi})} \lambda_0 t \quad (2.13)$$

donde $z_i(t)$ es el vector de covariables para el i-ésimo individuo en el tiempo t . Este modelo incluye una parte paramétrica $e^{\beta' z_i(t)}$, llamada puntaje de riesgo y otra parte no paramétrica $\lambda_0(t)$, llamada función de riesgo base.

Para dos individuos con variables explicativas Z y Z*, el cociente de las respectivas funciones de riesgo viene dado por (Hosmer et al., 1999):

$$\frac{\lambda(t/z)}{\lambda(t/z^*)} = \frac{e^{\left[\sum_{p=1}^p \beta_p z_p\right]} \lambda_0(t)}{e^{\left[\sum_{p=1}^p \beta_p z_p^*\right]} \lambda_0(t)} = e^{\left[\sum_{p=1}^p \beta_p (z_p - z_p^*)\right]} \quad (2.14)$$

Esta razón se conoce como riesgo relativo y es constante en el tiempo donde las tasas de riesgo son proporcionales. La interpretación de los coeficientes está dada por la siguiente derivada:

$$\frac{\partial \ln \lambda(t/z)}{\partial z_p} = \beta_p \quad (2.15)$$

β_p representa el cambio proporcional en la función de riesgo que resulta de un cambio marginal en la p-ésima variable explicativa. Si Z y Z* difieren en la p-ésima variable explicativa, la cual es una variable binaria, se tiene (Hosmer et al., 1999):

$$\frac{\lambda(t/z)}{\lambda(t/z^*)} = e^{\beta_p} \quad (2.16)$$

2.3.1 Ventajas del modelo de riesgo proporcional de Cox

Los modelos de regresión se basan en asumir un comportamiento conocido de la variable de respuesta (lineal, exponencial, etc.), generar un modelo aproximado y cuantificar la influencia de las variables predictorias. Sin embargo, en la práctica los datos no siempre se aproximan a una curva conocida. El método más comúnmente utilizado para resolver este problema es la regresión Cox, ya que tiene la gran ventaja de que no se basa en modelar una curva de supervivencia. De hecho este modelo no tiene curva de supervivencia predefinida, pero si permite ver la influencia de los predictores en la respuesta (Tucher, 1999).

2.3.2 Riesgos proporcionales

Una asunción clave para poder utilizar el modelo de Cox es que se cumpla la propiedad de riesgos proporcionales. Hay varias formas de probar la propiedad de riesgos proporcionales de los datos (Therneau, 1990). Cuando se trabaja con variables categóricas con un número pequeño de categorías se puede utilizar un test gráfico de la curva de supervivencia. Si se mantienen los riesgos proporcionales, entonces la transformación logarítmica de las curvas de supervivencia de cada categoría deberían encontrarse separadas a distancias constantes unas de otras. Esta forma de probar la condición de riesgos proporcionales no es útil cuando las variables tienen muchas categorías o cuando las variables son continuas.

Otra posibilidad para estudiar la propiedad de riesgos proporcionales es utilizar los residuales de Schoenfeld (Therneau, 2000). Estos residuales se representan gráficamente, y en el caso de que se cumpla la hipótesis de riesgos proporcionales los residuos deberán agruparse de forma aleatoria a ambos lados del valor 0 del eje Y. Para facilitar la interpretación de estos gráfico se suele superponer en la gráfica de residuales una curva de ajuste, que en algunas ocasiones suele ser la curva spline. Los residuos de Schoenfeld son los más efectivos para detectar anomalías en cada una de las variables que intervienen en el modelo.

2.3 Correlación de múltiples factores

2.3.1 Análisis de correlación de múltiples factores

Una correlación múltiple (R) es el coeficiente de correlación entre una variable de criterio (Y) y la *combinación lineal* de las variables llamadas predictoras (X) que también se pueden denominar *variables independientes*. El término *predictor* es habitual aunque según la finalidad que se busque puede resultar ambiguo (se puede estar explicando más que prediciendo).

La combinación lineal es la suma algebraica de las variables predictorias o independientes ponderadas por sus *coeficientes beta*; estos coeficientes son análogos a los coeficientes b y se calculan utilizando puntuaciones típicas.

La correlación múltiple se simboliza como R e incluye el cálculo de los coeficientes beta de cada variable. Una expresión sencilla de la correlación múltiple es:

$$R = \sqrt{\sum \beta_i r_{1i}} \quad (2.17)$$

Se multiplica el coeficiente beta de cada variable independiente por su correlación con la variable Y y se suman los productos. La raíz cuadrada de esta suma es el *coeficiente de correlación múltiple*.

R^2 (coeficiente de determinación) expresa la proporción de varianza en la variable de criterio (Y) explicada por la correlación múltiple. Habitualmente lo que se comunica e interpreta no es R sino R^2 . En el caso de que las variables independientes (o predictoras) correlacionaran *cero* entre sí, R^2 sería igual a la suma de las correlaciones elevadas al cuadrado de las variables independientes.

2.5 Confiabilidad Humana

La confiabilidad del *talento humano* se define como la probabilidad de desempeño eficiente y eficaz de 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 (Figura 2.1), que permiten optimizar los conocimientos, habilidades, destrezas de los miembros de una organización con la finalidad de generar *capital humano*, el cual esta formado por el ingenio de la persona, su salud mental y la calidad de su hábitos en el trabajo (García, 2006).

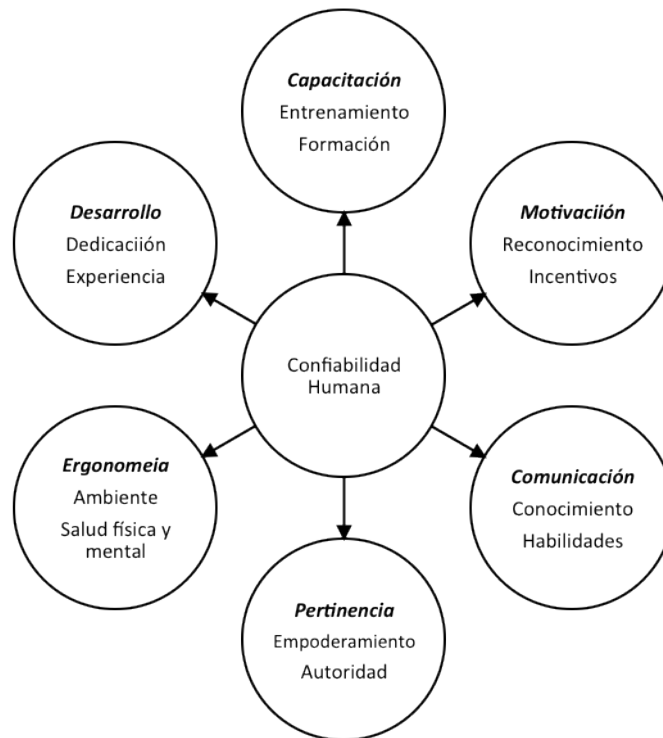


Figura 2.1: Elementos de Confiabilidad Humana

Los análisis del comportamiento y las necesidades de los seres humanos están entre las más polémicas de las ciencias; por lo que no es extraño que existan múltiples enfoques compitiendo por el manejo y tipificación de los problemas personales.

Para el análisis de la confiabilidad humana (HRA) se debe describir satisfactoriamente la contribución humana al riesgo de accidente, lo que ha impulsado numerosas tentativas de conversión de la tasa de error humano en unidades numéricas para el análisis de probabilidades de riesgo. Dentro de las técnicas más conocidas en el HRA se encuentran: la técnica para la predicción de la tasa de error humano (Technique for Human Error Rate Prediction, THERP) y el método para la predicción y reducción del error humano sistemático (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach, SHERPA).

2.5.1 Técnica para la prevención de la tasa de error humano (THERP)

La técnica cuantitativa de HRA más ampliamente usada es la THERP, creada en Sandia National Laboratories, NM, USA. El objetivo de la THERP es "predecir las probabilidades de error humano y evaluar el deterioro de un sistema individuo-máquina causado por los errores humanos (tomados aisladamente o en relación con el funcionamiento de los equipos técnicos), por lo procedimientos y las prácticas de ejecución, así como por las otras características del sistema o de la persona que influye en el comportamiento del mismo" (Swain & Guttman, 1983).

La hipótesis base de la THERP considera a la persona como una fuente de fallas y, así, la confiabilidad humana puede evaluarse de la misma manera que un dispositivo técnico. Las tareas de la persona se descomponen en actividades elementales de las cuales se puede evaluar la confiabilidad de forma más o menos tradicional, con ajustes ligeros ligados a la mayor variabilidad e interdependencia de las actividades humanas.

Las etapas de procedimiento desarrolladas en la aplicación de la THERP, son muy parecidas a la de una evaluación de probabilidades de riesgo. La THERP identifica las funciones del sistema, así como los puntos débiles que pueden verse afectados por errores humanos, mediante un listado, descripción y análisis de las tareas, procedimientos y subtareas. Identifica los errores que pueden producirse en cada etapa y los clasifica como errores de omisión o de acción. También clasifica las conductas e identifica los factores de forma del comportamiento (PSF), que influyen en las respuestas de la persona. Como guía para el análisis, la técnica utiliza una estructura de árbol de sucesos, llamado diagrama de árbol de probabilidades, el cual articula cronológica y secuencialmente las diferentes actividades y presenta combinación de errores relativos a diferentes operaciones elementales, así como los puntos de la secuencia donde es posible recuperar el error.

En la técnica, los PSF se utilizan para modificar las posibilidades nominales de error humano (PEH) según los juicios aportados por analistas sobre el entorno de trabajo, calidad de la interpretación individuo-máquina, habilidades, experiencia de la persona concreta que está en el puesto y, sobre el nivel y tipo de estrés de la situación.

Las probabilidades nominales de errores humanos, se encuentran concentradas en veintisiete tablas (presentadas en la cuarta parte del manual de 1983). Estos valores son genéricos pues se basan en opiniones de expertos, datos recolectados de situaciones reales y/o simuladas de actividades que realizan los operadores de una central nuclear. Cada una de las tablas se refiere a errores específicos asociadas a actividades concretas y como componente de la actividad se generan dos valores numéricos: la probabilidad nominal del error y el factor de error.

La estimaciones de los efectos del error humano sobre las fallas del sistema implican la integración del análisis de confiabilidad humana en el análisis de probabilidades de riesgo, determinando de esta manera la contribución de falla humana, y por ende, la indisponibilidad del sistema o subsistema considerado.

La THERP es considerablemente aceptada para la determinación de la confiabilidad humana en sistemas de alto riesgo, como procesos químicos, producción de energía nuclear, sectores aeronáuticos, entre otros. Dentro de sus limitaciones se considera la aplicación laboriosa y subjetiva, a causa de múltiples elecciones de valores que se realizan en tablas de datos; por lo que no siempre existe uniformidad entre analistas en la clasificación de errores y de PSF.

2.5.2 Método para la predicción y reducción del error humano sistemático (SHERPA)

El objetivo de esta técnica desarrollada por D.E. Embray (1986), es evaluar cualitativa y cuantitativamente la confiabilidad humana para elaborar recomendaciones concretas que permitan reducir la probabilidad de errores humanos, en especial los que se refieren a procedimientos, formación de personal y diseño de equipos. Lo ideal será aplicar la técnica al diseñar un sistema sociotécnico, aun cuando se empleó principalmente para mejorar un sistema ya existente.

La técnica consiste en una metodología que permite analizar los errores humanos y desarrollar estrategias para reducirlos. La SHERPA está integrada por un conjunto de técnicas que pueden ser utilizadas de manera independiente y está basada en un análisis funcional de la conducta

humana, según el modelo Rasmussen (1983), tomando en cuenta los diferentes modos de funcionamiento de la persona: basado en habilidades o automatismo, diagnóstico basado en reglas, basado en reglas del tipo *si X, entonces Y*, basado en conocimientos. Esta clasificación de la técnica facilita la ubicación de los posibles errores, considerando las siguientes precisiones: la técnica predictiva sólo es aplicable para las tres primera categorías, además las características de los procedimientos y el diseño de los equipos (sobre todo de información) son diferentes para cada categoría.

La SHERPA opera en base a una estrategia de búsqueda sistemática para la identificación de los errores humanos, que consta de cinco etapas: Definición de los pasos de una tarea que no puede ser omitidos o modificados, análisis de la confiabilidad de la tarea, análisis del impacto del error sobre los elementos relacionados con él, análisis del efecto de las disfunciones y recomendaciones para reducir los errores. La técnica SHERPA se ha aplicado en sectores de alto riesgo (nuclear), sector de servicios (correo), actividades de extracción de carbón en minas y plataformas petrolíferas.

Las principales ventajas de la técnica es que es de aplicación relativamente sencilla para los no especialistas con un mínimo de formación, la aplicación de modelo cognitivos facilita la comprensión y la reducción de errores, orientación hacia la propuesta de recomendaciones, trata el error como un elemento informativo (de modo positivo).

Dentro de las limitaciones que la técnica presenta, se encuentran: la escasa madurez de algunos módulos, falta de desarrollo de la inserción en el análisis de probabilidades de riesgo, utilización de juicios de expertos en la cuantificación, no considera aspectos temporales de una tarea, la validez de los datos obtenidos no puede traspasarse de un sistema a otro.

Las diferencias entre THERP y SHERPA consisten en los análisis que se realizan de las tareas y los errores, en la SHERPA el análisis jerárquico de la tarea procede de una descomposición funcional teniendo en cuenta unidades de conducta, relacionadas con los objetivos y subobjetivos de la persona, mientras que la THERP lo realiza en base a acciones elementales (Kirwan, 1992).

En cuanto al análisis de los errores la técnica SHERPA tiene las siguientes ventajas con respecto a la THERP: además del error funcional considera el nivel de funcionamiento de la persona; los expertos a en la etapa de cuantificación son personas implicadas en el sistema que se estudia.

2.5.3 Juicio de expertos

Una de las técnicas aplicables en el análisis de confiabilidad humana es la estimación de la probabilidad de error humano por medio de juicio de expertos. Se hace uso de ella cuando hay que considerar la influencia de muchos factores independientes que afectan la respuesta de la persona, dificultando el obtener una probabilidad de error humano objetiva; también se emplea cuando en las bases de datos no se encuentran puntos de referencia.

Una base de datos sobre los errores humanos constituye un punto de partida, pero puede no ser suficiente y presentar vacíos informativos, entonces las opciones de juicios de expertos son una alternativa que combina las aproximaciones analíticas y los métodos de estimación subjetiva de probabilidades desarrollados conforme a las reglas de la teoría de decisión.

Los expertos se enfocan en determinar los índices de error para actividades que no estén contempladas en la base de datos que se tenga. También pueden ofrecer sus reflexiones acerca de la influencia de determinados factores sobre el comportamiento de la persona, para así reflejar adecuadamente las diferencias entre los valores que se tengan de una base de datos y la situación y sistemas reales que se pretenda estudiar. Dentro de las razones que se tienen para utilizar el juicio de expertos es que permitirá obtener la probabilidad estimada de error humano de diversas actividades o tareas en las que no se tenga una base de datos de referencia a priori, hay muchos factores cuya influencia sobre la conducta debe ser ponderada, se necesita ajustar la realidad o valores de referencia de una base de datos de un sistema distinto (Hollnagel, 1993).

Mediante el juicio de expertos se pretende tener estimaciones razonablemente buenas, "mejores conjeturas", a falta de cifras exactas; estas estimaciones pueden y deben ser confirmadas o modificadas conforme se tenga información obtenida durante el funcionamiento del sistema.

En un estudio comparativo de diversas técnicas y métodos de confiabilidad humana, se califica el método de *juicio de expertos* como un método aceptable en la comunidad científica, de una elevada madurez que proporciona estimaciones de precisión moderada. Su validez y su utilidad se califican entre moderadas y altas frente al calificativo de moderadas por la THERP.

Los resultados de aplicar esta método pueden verse afectados por algunos sesgos de origen diverso como la falta de conocimiento de algunos errores por parte del evaluador, conflictos personales o de opinión entre algunos expertos que bloqueen el trabajo del grupo.

Por otro lado sus posibilidades de aplicación son amplias debido al número de situaciones o casos que carezcan de información en base de datos, además de ser de uso sencillo cuando se dispone de expertos bien informados y dispuestos a colaborar.

2.6 Error humano

Aunque ha habido un interés general en el error humano durante la mayor parte del siglo XX (Reason, 1990), sólo a partir de la década de 1960 se ha abordado en términos de ciencias exactas (Torre, 1965). A partir de la atención prestada al error humano, se empezó a mirar hacia la *confiabilidad humana* (Humphreys, 1988), algunos más consideraban la confiabilidad y el fracaso como un proceso de grupo (La porte, 1982). Naturalmente esta área despertó un gran interés en la industria nuclear, química industrial, sector espacial y militar, donde cualquier error podrá traer consecuencias devastadoras.

Como definición de falla o error se destaca la elaborada por Sander & McCormick (1993): "Una inapropiada y no deseada decisión o conducta humana que reduce o tiene el potencial de reducir la efectividad, la seguridad o el rendimiento del sistema".

El error humano está en el origen de multitud de accidentes, por lo tanto es un elemento clave a evitar. Sólo conociendo la explicación del *error* se encontrará el camino para solucionarlo. Todos los seres en mayor o menor medida están sujetos a cometer errores; 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 (García, 2006).

Cuando se considera la interacción entre las personas y los sistemas productivos, los errores humanos se pueden clasificar en cuatro categorías: *Factores antropométricos*. Son los relacionados con el tamaño y la Resistencia física del personal que va a realizar una tarea, cuando no puede acomodarse físicamente a las condiciones del sistema o equipo. *Factores sensoriales*. Se relacionan con la pericia con que las personas usan los sentidos para entender lo que está ocurriendo en su entorno. *Factores Fisiológicos*. Se refiere a las tensiones

medioambientales que afectan el desempeño humano, pues generan fatiga. *Factores psicológicos*. Se refiere a los aspectos internos que tienen raíz en lo psíquico de las propias personas.

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.

2.6.1 Factores de forma del comportamiento humano

Para caracterizar los cambios en el rendimiento del modelo humano, y en el caso relacionado con otros sistemas, se definen los llamados *factores de forma del comportamiento* (Performance Shaping Factor, PSF) que se indica en la tabla 2.1. Esta tabla se encuentra basada en el informe NUREG/CR 1278 sobre centrales nucleares, August Swain, Guttman publicado en 1983, pero puede extrapolarse en tablas de procesos.

Tabla 2.2: Factores de forma del comportamiento (PSF) (Fuente: NUREG 1278, 1983)

<p>SITUACIÓN DEL ENTORNO</p> <p>Limpieza</p> <p>Ruido ambiental</p> <p>Temperatura excesiva</p> <p>Brillo o centeno</p> <p>Horas de trabajo excesivas</p> <p>Responsabilidad excesiva que no puede asumirse</p> <p>Falta de reconocimiento de méritos</p>
<p>INSTRUCCIONES</p> <p>Transmisión oral</p> <p>Transmisión escrita defectuosa</p> <p>Aviso de precaución</p> <p>Métodos de trabajo</p>
<p>TAREA</p> <p>Falta de retroalimentación</p> <p>Frecuencia y repetibilidad</p> <p>Interfase hombre – máquina</p>

Tabla 2.3: Continuación de la Tabla 2.2: Factores de forma del comportamiento (PSF)

<p>ESTRÉS PSICOLÓGICO</p> <p>Cambio rápido de la situación del proceso</p> <p>Duración de la situación de estrés</p> <p>Rapidez y magnitud de la tarea</p> <p>Trabajo monótono, aburrido y sin interés</p> <p>Distracciones, por privaciones sensoriales por enfermedad</p> <p>Distracciones, por problemas personales o por no estar por la labor</p> <p>Presión del ambiente</p>
<p>ESTRÉS FISIOLÓGICO</p> <p>Duración de la situación de estrés</p> <p>Fatiga</p> <p>Incomodidad</p> <p>Anoxia</p> <p>Movimientos limitados</p> <p>Cambios de presión y presiones externas</p>
<p>FACTORES ORGÁNICOS</p> <p>Entrenamiento o experiencia previa</p> <p>Personalidad e inteligencia</p> <p>Motivación y actitud ante el trabajo</p> <p>Influencias externas</p>

Hablar de la prevención del error humano y sus consecuencias, es hablar del esfuerzo por diversos medios en conjuntar las normas (prescritas y reales) y los comportamientos, lo cual requiere un conocimiento exhaustivo de todos los factores y su influencia en un colectivo y situación determinada; para posteriormente sobre la base de ese conocimiento diagnóstico generar un modelo que sirva de guía en las intervenciones que se efectúen.

2.7 Perspectivas de análisis del error humano

El análisis de error humano y los accidentes, de manera general se pueden clasificar dentro de cuatro corrientes:

2.7.1 Explicaciones fuera de la persona

La visión del error se realiza desde el sistema del cual forma parte pero sin entrar en una explicación causal desde la propia persona. En esta corriente las explicaciones del error son más

descriptivas que causales, utilizando probabilidades de error y juicio de expertos fundamentalmente. Dentro de esta explicación del error existen básicamente dos clasificaciones: Teoría de la vulnerabilidad y Confiabilidad humana.

En la *teoría de la vulnerabilidad de los sistemas* el riesgo es definido como la probabilidad de que un suceso se materialice en un tiempo dado con una determinada intensidad multiplicado por el daño causado. Una vez definido el riesgo, la vulnerabilidad es el factor que determina el daño sobre el sistema concreto (Di Sopra, 1983). Aun cuando la noción de riesgo es independiente de las características internas del sistema, la vulnerabilidad es íntimamente dependiente de ellas. El análisis de vulnerabilidad de un sistema conlleva la posible falla humana como un factor interno del sistema (Chuliá, 1992).

Mientras que la Confiabilidad humana es un conjunto de técnicas incluidas dentro del área de confiabilidad de los sistemas desde el supuesto básico de que el ser humano puede ser considerado como parte integrante de un sistema. Los instrumentos utilizados en confiabilidad humana (lo opuesto al error humano) se desarrollaron fundamentalmente desde el punto de vista de la ingeniería, integrando aspectos psicológicos y organizacionales con diversas técnicas matemáticas.

La hipótesis base en la mayoría de las aproximaciones de evaluación de confiabilidad humana, es considerar las acciones del operador humano desde el mismo punto de vista que se evalúa al buen o mal funcionamiento de un mecanismo. En este enfoque las tareas de los operadores se descomponen en actividades elementales, de las cuales se evalúa su confiabilidad de manera similar a cualquier dispositivo técnico, con ciertos ajustes ligados a la mayor variabilidad e interdependencia que presentan las acciones humanas. Con base en este enfoque las tareas humanas son clasificadas según su confiabilidad, posteriormente, se utiliza esta clasificación para anticipar lo que puede fallar en cualquier tarea. Dentro de esta clasificación las técnicas más utilizadas son: THERP y Juicio de expertos.

Algunas deficiencias comunes en las técnicas agrupadas bajo el título de confiabilidad humana son las siguientes: Simplifican en exceso la actuación humana (utilizan exclusivamente modelos probabilísticos), no contemplan el contexto en que la actuación se sitúa, se orientan hacia la incorrección, centrándose en comportamientos anómalos, y dependen en exceso del juicio de expertos.

2.7.2 Explicaciones desde dentro de la persona: componentes humanos

La explicación se realiza desde dentro de la persona analizando algún atributo componente causal. Las explicaciones toman un matiz causal derivado de los procesos cognitivos, la personalidad, la conducta y los patrones de acción. Las corrientes agrupadas bajo esta explicación del error son cuatro: *Taxonomía SRK (Skill, rules and Knowledge)*, *Procesos cognitivos: modelo secuencial*, *Personalidad y conducta*, *Integración: competencias de seguridad*.

La *Taxonomía SRK* hace una clasificación importante de los diferentes procesos de información que se dan en las tareas industriales. Este sistema de clasificación conocido como el basado en habilidades, reglas y conocimientos (SRK) fue desarrollado por J. Rasmussen del Laboratorio de Riesgos de Dinamarca; siendo procedimiento proporciona una herramienta útil para identificar los tipos de errores que suelen ocurrir en las diferentes situaciones de operaciones (Rasmussen 1979, 1982, 1987).

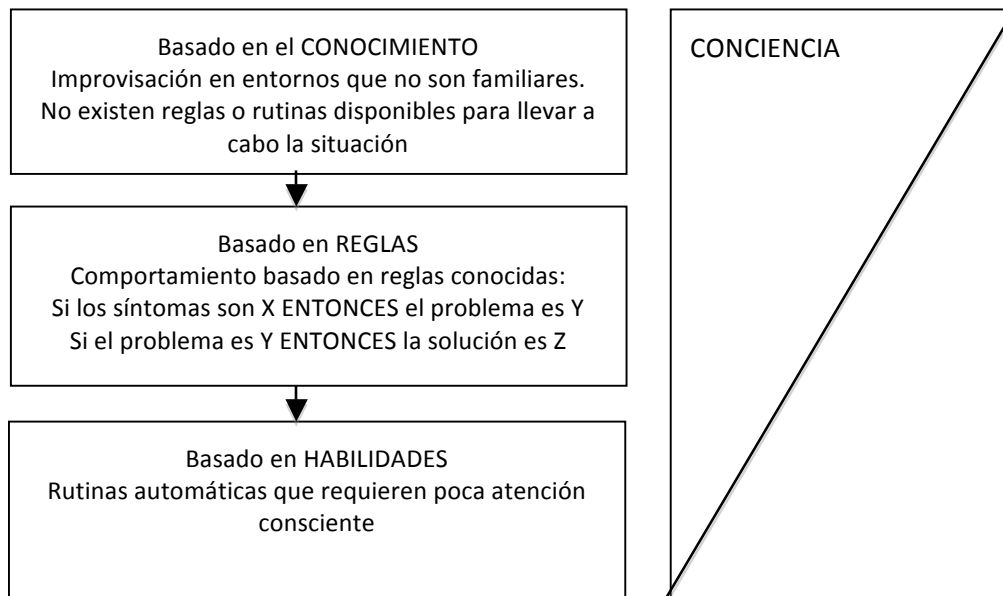


Figura 2.2: Continuidad entre comportamiento Consciente y Automático (Reason 1990)

Los términos habilidad, reglas y conocimiento en los que se basa la información, se refiere al grado en que se controla la conciencia en los ejercicios que el individuo realiza en su actividad, tal como se muestra en la Figura 2.2. En el modo basado en conocimiento, el individuo realiza la tarea de una forma completamente consciente, por lo que se deberá realizar un esfuerzo mental considerable para determinar la situación y sus respuestas tenderán a ser lentas.

El modo basado en habilidad se refiere a la ejecución de una tarea muy practicada, acciones físicas en las cuales no existe prácticamente conciencia de la acción. En el uso de reglas, éstas pueden ser aprendidas como resultado de una interacción con el proceso, a través de entrenamiento o por trabajar con personal experimentado en el proceso. El nivel de conciencia es intermedio entre el modo de las habilidades y el modo de los conocimientos.

La taxonomía SRK proporciona un juego de distinciones, no un modelo detallado de procesos psicológicos. Cada nivel de la taxonomía corresponde a una categoría de funcionamiento humano más que a procesos cognitivos. Los saltos entre diferentes etapas de tratamiento son posibles cuando: una persona tiene un comportamiento basado en automatismos pasará de las etapas de "activación y observación" a la de ejecución; cuando tiene un comportamiento basado en reglas y procedimientos, el salto a la "ejecución" se hará desde la etapa de "identificación" y por último, cuando el comportamiento se basa en conocimientos, la persona recorre las ocho etapas mencionadas (Figura 2.3).

La ventaja de este modelo de Rasmussen es que conjuga la identificación del origen funcional del error (etapa de tratamiento) con el nivel de funcionamiento implicado (basado en conocimientos, en reglas o automático) y así, permite reparar los errores por etapas de tratamiento; además, la especificidad de algunos errores permite proponer medidas de prevención adaptadas al nivel de funcionamiento de la persona.

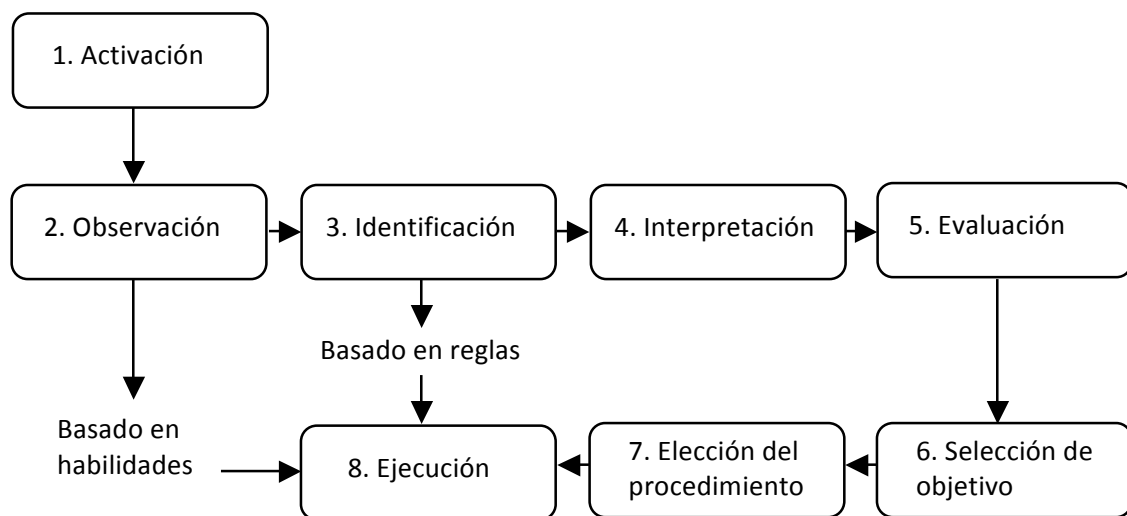


Figura 2.3: Modelo de J. Rasmussen: Taxonomía SRK

En el enfoque *Procesos cognitivos: modelo secuencial* se utilizan conceptos procedentes de la psicología cognitiva en la concepción de la actuación humana como si fuera un ordenador (entrada - procesamiento - salida). El proceso de entrada de la información es designado como *sensación* y puede ser entendido como una impresión recogida por los órganos sensoriales que es conducida al cerebro por medio del sistema nervioso, la cual posteriormente se combina con análisis basados en conocimientos y experiencias previas para dar significados cotidianos a estos impulso neuronales (*bottom-up / top-down*), proceso al cual se le denomina *percepción*, el cual no es afín a la ambigüedad por lo que se tiende a dar forma a lo que se ve si es que no se tiene un sentido definido, este proceso de desambigüedad está por debajo del nivel concientes y se realiza tomando como base experiencias previas por lo que en muchas ocasiones da origen a las llamadas *ilusiones ópticas*. El comportamiento humano está en función de la percepción que la persona tenga de la realidad.

Los errores que se comenten durante el proceso de percibir el estímulo e integrarlo en un patrón significativo se puede clasificar como *detección* (cuando no se percibe el estímulo), de *percepción* (cuando el estímulo no es percibido correctamente, equivocando su significado) y de *reconocimiento* (cuando se describe correctamente el estímulo pero se confunde con el significado de otro).

Por otra parte el cerebro tiene que seleccionar lo más importante y centrarse en lo relevante para la actividad que se está haciendo, a estos procesos mentales mediante los cuales se alcanza la capacidad para centrarse de manera persistente en un elemento concreto con exclusión de todos lo no relevantes para la actividad se le conoce como atención.

La capacidad para atender estará mediada entre otras variables por el nivel de actividad del organismo, influyendo de forma poderosa en el *estado de fatiga* y el *grado de automatización* que se haya alcanzado al realizar la tarea.

Es necesario evaluar la información, procesarla y posteriormente tomar decisiones, a este conjunto de acciones se le conoce con el término *procesamiento de la información*; en este contexto, procesar la información implica el almacenamiento, la organización y la transmisión de la misma, lo cual se encuentra directamente implicado con los procesos de *memoria* y *razonamiento*.

Una vez decidido lo que se va a hacer, es necesario interaccionar con el medio ambiente mediante la **ejecución**, esta etapa representa el camino de salida y en ella se pueden efectuar errores de comisión (la respuesta correcta no se ejecuta), errores de ejecución (la respuesta correcta no se ejecuta) y errores de fase (la respuesta correcta no se ejecuta en el tiempo adecuado). Es también conocido, que las *emociones* influyen activamente en toda secuencia de procesos.

Rasmussen (1985) describió la secuencia de pasos que ocurren cuando un individuo se enfrenta a una situación peligrosa. No obstante los procesos de percepción, decisión y ejecución, en la actualidad no son entendidos como pasos de secuencia, en este sentido Cañas (2004) menciona: "La cognición no es sólo el proceso del *input* para producir una respuesta".

Cognición es una continua revisión y replanteamiento de las intenciones y de los objetivos de un ciclo con dos fases, interpretación y planificación. Este ciclo ocurre en paralelo con lo que está pasando en el contexto. Por lo tanto, cognición debe ser definida como el uso controlado de los recursos disponibles (habilidades, procedimientos, conocimientos en el sentido de Rasmussen). Por tanto, el supuesto básico del que parte este autor es que la conducta humana es el resultado de un uso controlado de competencias adaptadas a los requerimientos de una situación, más que el resultado de secuencias predeterminadas de respuestas ante eventos".

Entre los modelos que proponen una explicación *desde adentro* existen aquellos que se refieren a *Personalidad y Conducta* como determinantes de los errores, entre los más destacados se encuentra el modelo de personalidad basado en conductas (Krause, Hidley & Houdson, 1990), el cual se trata de una corriente de investigación cuyos estudios se aplican en el campo de la seguridad y salud laboral centrándose en el control de las conductas de riesgo en los entornos de trabajo; asimismo se encuentran el *acercamiento al fallo humano desde los factores de personalidad* (Hansen, 1988 y 1989) e investigaciones recientes el modelo *Big-Five*, este último señala a las variables neuroticismo y responsabilidad como predictoras de accidentes.

Por último la corriente *Integración; competencias de seguridad* muestra una visión innovadora de los procesos cognitivos-conductuales y de personalidad, que se encuentra concentrada en la orden del Ministro de Fomento 2520/2006 del 27 de junio, en la que se determinan las condiciones para la obtención de títulos y habilidades que permiten el ejercicio de las funciones del personal ferroviario relacionadas con la seguridad (BOE 183 de 2/8/2006), para la cual se redactaron los criterios de evaluación psicológica de las actitudes cognitivas (atención,

concentración, memoria, razonamiento, recepción, comunicación), *psicomotora* (velocidad de reacción, coordinación psicomotora) y *comportamiento-personalidad* (autocontrol emocional, confiabilidad comportamental, responsabilidad, psicopatología, autonomía). Desde este supuesto la evaluación no consiste en una serie de pruebas independientes sino en la integración de los resultados de una serie de pruebas.

Desde la perspectiva de los factores humanos, la visión en conjunto de todos estos procesos y los errores posibles en cada una de las fases, da lugar a lo que se entiende como el análisis de los factores humanos comprometidos con el error. La concepción del error desde los factores humanos muestra mayor potencial descriptivo que el modelo de confiabilidad humana (ya que permite la comprensión de las acciones y los errores de los operadores) pero tiene la misma deficiencia al no contemplar el contexto donde se efectúa la actividad.

El peligro fundamental del análisis de falla humana desde este enfoque consiste en la posibilidad de un reduccionismo *bottom-up* de los procesos mentales, razón por la cual se ha ido incrementando el interés de estudiar la interacción del ser humano con el sistema cultural y técnico del cual forma parte.

2.7.3 Explicaciones desde la interacción persona-máquina

Las explicaciones se basan en el estudio de un componente o atributo del ser humano contemplado en su interacción con el sistema. Las corrientes agrupadas bajo esta explicación del error son: *Ergonomía* y *Ergonomía Cognitiva*.

La *Ergonomía* menciona que en el ambiente laboral el *esfuerzo* del trabajador deberá ir dirigido a una serie de exigencias impuestas por la tarea, esta configuración es llamada *carga de trabajo*, la cual según Leplat & Cuny (1983), es la interacción entre un sujeto y las exigencias de un determinado medio, existiendo una relación funcional entre la tarea y los recursos (físicos y mentales) del trabajador para llevarla a cabo de manera exitosa, y se encuentra determinada por el nivel de movilización que el individuo debe realizar para ejecutarla.

Para Wisner (1987), en toda actividad laboral se puede encontrar al menos tres dimensiones; física, mental y psíquica las cuales deben estar presentes al mismo tiempo en toda actividad humana, aunque en diferente proporción. Esto implica la existencia de factores de carga física, mental y psíquica en el desarrollo de todas las actividades laborales. El desequilibrio en algunos

de los tres factores de carga de trabajo dará lugar una serie de consecuencias entre las cuales se encuentran la fatiga y el error.

Lo anterior da lugar al desarrollo de modernos *modelos de atención humana* (Wickens, 1984), en los que se estudia y explica la carga mental de trabajo; y que son considerados dentro del campo de la falla humana por la implicación del rendimiento atencional en multitud de errores en entornos laborales.

Otro modelo considerado dentro de esta corriente es el *modelo de modulaciones de trabajo*, el cual menciona que mecanismos de modulación del trabajo son un proceso regulable por el propio trabajador para asegurarse unas demandas de trabajo óptimas, regulando la amplitud y frecuencia de una determinada propiedad cuantitativa y cualitativa de las demandas.

Desde la percepción de la *Ergonomía Cognitiva* se desarrollan nuevos modelos que tratan de explicar las razones de falla humana, entre ellos se destaca la noción de *conciencia situacional* (Endsley, 2000), la cual es definida como "la percepción de los elementos en el entorno existente en un volumen de tiempo y espacio, la comprensión de su significado, y la proyección de su estatus en el futuro cercano".

Los elementos principales de la conciencia situacional son:

La *percepción*. Incluye procesos de monitorización, detección y reconocimiento, y se relaciona con la toma de conciencia de diferentes elementos o datos (objetos, eventos, personas, sistemas, factores ambientales) y sus estados presentes (localización, condiciones, modos, acciones).

La *comprensión*. Incluye procesos de interpretación y valoración de datos y patrones (informaciones), y se relaciona con la relación global del significado de los elementos percibidos.

La *proyección*. Incluye procesos de anticipación y de situación mental, y se relaciona con el conocimiento de cómo se ajusta la realidad presente a expectativas y planificaciones previas.

Los tres elementos se relacionan de manera secuencial, ya que como resultado de la observación y de la percepción se obtienen datos, mismos que al ser agrupados, organizados o clasificados con sentido y propósito constituyen informaciones, esta información interpretada,

personalizada, con valor y orientada a la acción, propicia la toma adecuada de decisiones que ocurren en el proceso global de trabajo.

2.7.4 Explicaciones desde la relación persona contexto

Las explicaciones parten del contexto, perdiendo su matiz atributivo para convertirse en relaciones. Dentro de esta corriente se consideran las nuevas tendencias referidas a la acción situada - conocimiento socialmente distribuido:

Teoría de la actividad, la cual consiste en un conjunto de conocimientos, tecnologías y recursos encaminados al análisis, desarrollo y optimización de configuraciones de actividad humana (Sebastián, 2006).

Patología residente, este modelo tienen la virtud de mostrar el modo en que los operadores se relacionan con el fallo de sistemas complejos e interactivos, produciendo así un accidente. Desde esta perspectiva, los accidentes son consecuencias de las interacciones de una serie de fallas o defectos ya presentes en el sistema, muchas de las cuales no son visibles y tienen serias consecuencias posteriores.

2.8 Psicometría

Es una disciplina cuya finalidad intrínseca es la de aportar soluciones al problema de la medida en cualquier proceso de investigación psicológica. También es un campo metodológico que incluye teorías, métodos y usos de la medición psicológica, en que se incluyen aspectos meramente teóricos y otros de carácter más práctico.

La perspectiva teórica incluye las teorías que tratan de las medidas en psicología, encargándose de describirlas, categorizarlas, evaluar su utilidad y precisión, así como la búsqueda de nuevos métodos, teorías y modelos matemáticos que permitan mejores instrumentos de medida. La perspectiva práctica se ocupa tanto de aportar instrumentos adecuados para conseguir buenas medidas como de los usos de que los mismos se puedan realizar. Estos instrumentos son los test psicométricos. Finalmente, la psicometría se distingue por el uso del lenguaje formal y estructurado de las matemáticas.

2.8.1 Medición

En psicología, la educación y las ciencias sociales se trata de medir aspectos que no son físico ni directamente observables. La medición según Nunnally (1987) consiste en reglas para la asignación de números a objetos en tal forma que representen cantidades de atributos. La palabra “objeto” se usa en un sentido amplio e incluye personas. En psicología, medir es dar la magnitud de cierta propiedad o atributo, por ejemplo, la inteligencia, la extraversión, el razonamiento verbal, de una o más personas, con ayuda del sistema numérico. Los test psicométricos son los instrumentos que se utilizan en psicometría para la medición de atributos psicológicos.

2.9 Test psicométricos

El test psicométrico es un procedimiento estandarizado compuesto por ítems seleccionados y organizados, concebidos para provocar en el individuo ciertas reacciones registrables; reacciones de toda naturaleza en cuanto a su complejidad, duración, forma, expresión y significado (Rey, 1973). Las cualidades de un test psicométrico son: *confiabilidad y validez*.

La confiabilidad (o consistencia) de un test es la precisión con que un test mide lo que mide, en una población determinada y en las condiciones normales de aplicación. (Anastasi, 1982; Aiken, 1956). La falta de confiabilidad de un test psicométrico esta en relación con la intervención del error. Se considera que el error es cualquier efecto irrelevante para los fines o resultados de la medición que influye sobre la falta de confiabilidad de tal medición.

La confiabilidad de un test psicométrico se presenta por medio del coeficiente de confiabilidad (r_{xx}) y del error estándar de medida (EEM). Un coeficiente de correlación entre dos grupos de puntajes indica el grado en que los individuos mantienen sus posiciones dentro de un grupo. Abarca valores desde cero 0 a 1. Cuanto más se acerque el coeficiente a 1, más confiable será la prueba. El coeficiente de confiabilidad señala la cuantía en que las medidas del test están libres de errores causales o no sistemáticos.

Existen cuatro métodos básico para obtener el coeficiente de confiabilidad (r_{xx}): Método de formas equivalentes, método del test – re test; método de la división por mitades emparejadas o “Split hall método”; y método de la equivalencia racional o de Ceder-Richardson.

Por error estándar de la media se estima el intervalo probable de puntajes en el cual se encontrará el puntaje verdadero de un sujeto examinado con un test psicométrico. El error estándar de la media (EEM) se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$EEM = S\sqrt{1-r_{xx}} \quad (2.19)$$

Donde:

S= Desviación estándar de los puntajes de la distribución

r_{xx} = Coeficiente de confiabilidad del test

1= Constante

Obteniendo el EEM, se debe escoger el nivel de confianza:

- Nivel de confianza del 68%+ PD \pm 1EEM

- Nivel de confianza del 95%+ PD \pm 1EEM

Para el nivel de confianza del 68% la interpretación es: “se puede concluir, con un 68% de confianza, que el puntaje verdadero de un sujeto está en la zona o intervalo comprendido entre su puntaje directo u obtenido (PD) y \pm 1 EEM” El nivel de confianza más usado en psicometría es el 95%: “el puntaje verdadero de un sujeto se encontrará en el intervalo comprendido entre su puntaje obtenido o directo (PD)y \pm 2 EEM.

La validez de un test se define ya sea por medio de la relación entre sus puntuaciones con alguna medida de criterio externo, o bien la extensión con la que la prueba mide un rasgo subyacente específico hipotético o “constructo”.

En términos psicométricos, la validez es un concepto que ha pasado por un largo proceso evolutivo, desde la posición que sostenía que “un test es válido para aquello con lo que correlaciona” (Guilford, 1946, citado en Muñiz, 1996, p. 52), hasta la más reciente que la entiende como un juicio evaluativo global en que la evidencia empírica y los supuestos teóricos respaldan la suficiencia y lo apropiado de las interpretaciones y acciones en base a los puntajes de las pruebas, que son función no sólo de los ítems sino también de la forma de responder de las personas así como del contexto de la evaluación.

2.9.1 Test de dominó

El test de Dominó también llamado D48 es una prueba no verbal de inteligencia destinado a valorar la capacidad de una persona para conceptualizar y aplicar el razonamiento sistemático a nuevos problemas. Mide el factor G de la teoría factorial de inteligencia de Spearman, es decir, la inteligencia general en función de sus capacidades lógicas. Fue creado por E. Antey.

Una de las principales ventajas de este test es que elimina diferencias entre los sujetos causadas por factores sociales y educativos. Se le reconoce una validez y confiabilidad de $r=0.79$. Se aplica a personas desde 10 hasta 65 años y el tiempo de realización oscila entre 30 y 45 minutos.

2.9.2 Test Wonderlic

Es una herramienta que mide la habilidad cognoscitiva e interpretación del individuo. Provee una estimación de la inteligencia, mediante la mediación de habilidades de razonamiento lógico, numérico y verbal. Es adecuada para aplicarse en adultos con primer grado año de secundaria o inferior, a partir de mandos intermedios hacia abajo. El test desarrollado por Eldon F. Wonderlic en 1939 cuanta con una confiabilidad de 0.90 y el tiempo de aplicación es de 13 minutos.

2.9.3 Test Terman – Merrill

La escala colectiva de Habilidad mental de Terman, como su nombre lo indica, es una prueba de habilidad mental que contiene 10 ejercicios o subtest diferentes, cada uno de ellos con un tiempo límite. Mediante el instrumento se evalúa la inteligencia a través de seis áreas: inteligencia general, conocimiento, razonamiento fluido, razonamiento fluido, razonamiento cuantitativo, proceso visual – espacial y memoria de trabajo.

Con esta herramienta se obtiene el coeficiente intelectual y el grado de aprendizaje que poseen las personas, en aspectos tales como: 1. Información, conocimientos generales y memoria, 2. Juicio y razonamiento lógicos, 3. Significado de las palabras y vocabularios, 4. Secuencia lógica, 5. Aritmética y habilidad numérica, 6. Juicio práctico, 7. Analogías, 8. Organización lógica, atención y concentración, 9. Clasificación, discriminación, jerarquización y organización y, 10. Razonamiento abstracto, habilidad numérica, atención, concentración.

Proporciona una descripción completa del nivel intelectual general de la persona y sus capacidades. Permite establecer el alcance de la habilidad intelectual de la persona, mediante la profundización en puntos específicos permite el establecimiento de algunas de las características básicas de la persona.

2.9.4 Test Barsit (Inteligencia)

Mide la inteligencia general y la aptitud para aprender, mediante la valoración de la inteligencia verbal, razonamiento numérico, elementos cognitivos lógico-verbales y de información general. El objetivo del test es obtener funciones adyacentes, comparar la composición de grupos, seleccionar previamente casos excepcionales y la habilidad del individuo.

El test psicométrico desarrollado por Francisco del Olmo en 1945, que cuenta con una confiabilidad de 0.91 y una validez de $r = 0.716$, va dirigido a nivel de aplicación básico, obreros, técnicos y ayudantes en general.

2.9.5 Test de Personalidad

Este test ha sido creado para conocer a qué tipo de patrón de personalidad pertenece una persona. El tipo de personalidad *A* corresponde a aquellas personas que necesitan afirmarse permanentemente a través de logros personales para alcanzar la percepción de auto-control. Experimentan una constante urgencia de tiempo que les hace intolerable el reposo y la inactividad.

Estas personas también presentan una percepción de amenaza casi continua a su autoestima, eligiendo la acción como estrategia de enfrentamiento a sus problemas. Tienen tendencia a la dominación, una profunda inclinación a competir y una elevada agresividad que les induce a vivir en un constante estado de lucha. Las enfermedades más frecuentes en estos sujetos son las de tipo coronario, problemas psicósomáticos y síndromes de ansiedad generalizada. El patrón de conducta *A* se adquiere a través del aprendizaje y se puede detectar ya en la adolescencia.

El patrón de personalidad *B* es, evidentemente, lo opuesto al anterior. Son personas con un adecuado nivel de auto-control y autoestima que no les hace falta mantener actitudes compensadoras para reafirmarse. No son competitivas ni tan fácilmente irritables, y en general se toman la vida con mayor tranquilidad.

2.10 Relación entre los factores que influyen en el cometido de errores

2.10.1 Estrés

Se llama carga de trabajo a la influencia exterior del ser humano. Según sus características y capacidades individuales, ésta carga se traduce en estrés para un respectivo ser humano. Mulder (1980) define la carga de trabajo en función del número de etapas de un proceso o en función del número de procesos para realizar correctamente la tarea y, más particularmente en función de los modos de gestión, factores antropométricos, niveles de fatiga y monotonía de la tarea.

2.10.2 Edad

La edad es el tiempo transcurrido a partir del nacimiento de un individuo. Durante su crecimiento el individuo sufre cambios previsibles; está bien aceptado, por la comunidad científica que el proceso de envejecimiento con lleva una disminución a nivel general de todas las funciones del organismo reduciendo así la capacidad funcional (Timiras, 1997). Collins et al., concluyen, en un trabajo publicado en el 2004, que existe una disminución del *nivel de condición física, la velocidad de reacción y las condiciones psicomotoras* con la edad.

2.10.3 Experiencia

El concepto de experiencia generalmente se refiere al conocimiento procedimental (¿Cómo hacer algo?, en lugar del conocimiento factual (¿Qué son las cosas?). Los filósofos tratan el conocimiento basado en la experiencia como “conocimiento empírico”. El conocimiento procedimental está íntimamente relacionado con el entrenamiento, el cual se refiere a la adquisición de conocimiento, habilidades y capacidades a través del tiempo y como resultado de la enseñanza de habilidades vocacionales y prácticas y, conocimiento relacionado con actitudes que encierran cierta utilidad (capacitación).

2.10.4 Personalidad

La personalidad puede sintetizarse como el conjunto de características o patrón de sentimientos, emociones y pensamientos ligados al comportamiento de cada individuo, que persiste a los largo del tiempo frente a distintas situaciones y que lo hace diferente a los demás (Bermúdez, 2003). Actualmente, y resultado de una larga investigación y acumulación de conocimientos durante años, se acepta como modelo más cercano al constructo de personalidad al modelo de los cinco grandes, en el cual se considera que los factores subyacentes a la personalidad son: la extroversión, neuroticismo, amabilidad, apertura a la experiencia y la *responsabilidad* (McCrae, 1999).

3. METODOLOGÍA

Para el logro de los objetivos de la presente investigación se utilizó, para el análisis estadístico del conjunto de datos, el Software Minitab 16 Pro en Español, por su popularidad y facilidad de uso; prueba de esto es la gran cantidad de artículos científicos que reportan haber basado sus hallazgos en los resultados arrojados por este software ya sea total o parcialmente.

Asimismo, se diseñó y desarrolló una metodología de trabajo, explicada a lo largo del presente capítulo, que consta de las siguientes fases:

- Fase 1. Identificación de los factores que pueden influir en el error humano.
- Fase 2. Obtención del total de factores que pueden influir en el error humano.
- Fase 3. Reducción el número de factores a considerar en el modelo.
 - 3.1 Agrupación de los factores que se encuentran relacionados entre sí
 - 3.2 Determinación de los factores que están correlacionados
- Fase 4. Estimación de los parámetros del modelo de regresión.
 - 4.1 Estimación del tamaño de la muestra
 - 4.2 Obtención de las condiciones de operación de los trabajadores de línea de ensamble manual
 - 4.3 Medición del cometido de errores de los trabajadores de la muestra
 - 4.4 Revisión de la existencia de control estadístico en la media y desviación estándar del cometido de errores
 - 4.5 Estimación de los parámetros desconocidos de los factores del modelo
- Fase 5. Determinación de la tasa de falla base.
 - 5.1 Determinación del tipo de distribución de probabilidad de los errores cometidos por los operadores de línea analizados
 - 5.2 Obtención de la tasa de falla base
 - 5.1 Determinación del tipo de distribución de probabilidad de los errores cometidos por los operadores de línea analizados
- Fase 6. Cálculo de la tasa de riesgo mediante el modelo de riesgo proporcional de Cox, utilizando la información del ambiente operacional y la tasa de falla base.
- Fase 7. Validar el modelo de Confiabilidad Humana

3.1 Fase 1: Identificación de los factores que pueden influir en el error humano

El análisis del error humano y los accidentes, de manera general se pueden clasificar dentro de cuatro corrientes; resumiendo la literatura revisada del tema, en las figuras 3.1, 3.2, 3.3 se concentran las corrientes, técnicas y los factores que pueden influir en el cometido de errores.

Explicaciones fuera de la persona (EFP)

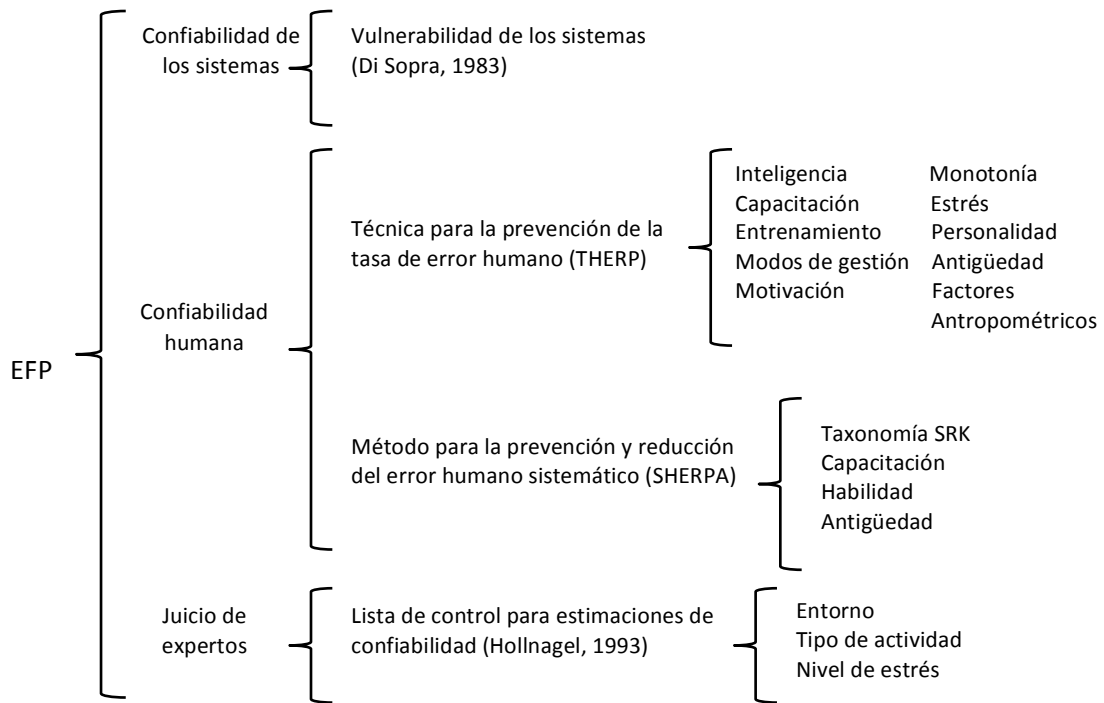


Figura 3.1: Teorías que explican el error desde fuera de la persona

Explicaciones adentro de la persona (EAP)

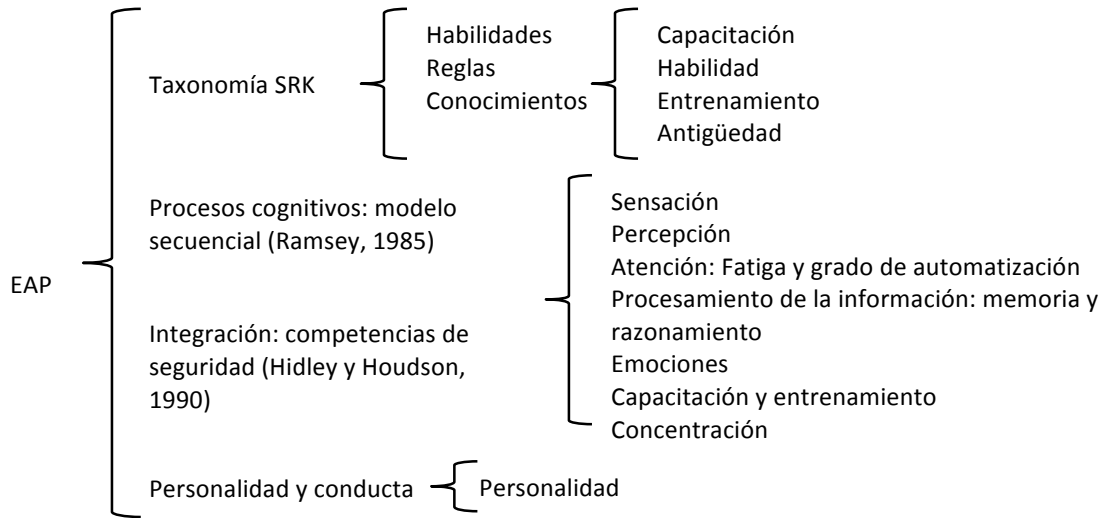


Figura 3.2: Teorías que explican el error desde adentro de la persona

Explicaciones desde la interacción (EDI)

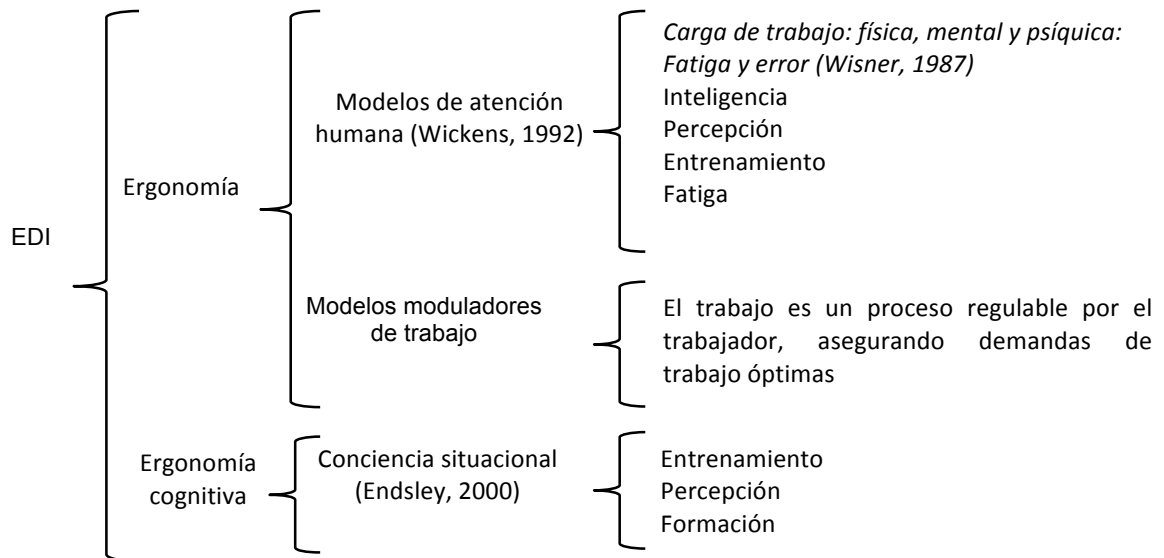


Figura 3.3: Teorías que explican el error desde la interacción

3.2 Fase 2: Obtención del total de factores que pueden influir en el error humano

Una vez analizadas las teorías que se integran en cada una de las Corrientes que tratan de explicar el error humano, se procede a concentrar los factores que influyen para que éste aparezca, con el objetivo de identificar factores en común, obteniéndose un total de 28 factores diferentes, tal como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Concentrado de factores de la diferentes Corrientes que explican el error humano.

	ERROR HUMANO	TAXONOMÍA SRK	F. FORMA DEL CONOCIMIENTO	MODELO SECUENCIAL	COMPETENCIA DE SEGURIDAD	ERGONOMÍA	ERGONOMÍA COGNITIVA
PROCESOS MENTALES							
Inteligencia			■			■	
Percepción				■	■	■	
Razonamiento				■	■		
Atención	■			■	■		
Emociones				■			
Memoria	■				■		
Concentración					■		
Capacitación	■	■	■	■			
Habilidad		■					
Entrenamiento			■	■		■	■
Experiencia				■			
Formación (Escolaridad)							■
FACTORES ORGANIZACIONALES							
Modos de gestión			■				
Motivación							
Comunicación			■		■		
Carga de trabajo (física, mental y psíquica)						■	
Monotonía			■				
Factores antropométricos	■		■				
FACTORES FISIOLÓGICOS			■				
Condiciones físicas			■				
Velocidad de reacción					■		
Coordinación psicomotora					■		
FACTORES PERSONALES							
Estrés			■				
Personalidad			■				
Responsabilidad					■		
Antigüedad		■	■				
Género							
Edad							
* Estados transitorios							
Fatiga	■	■	■	■		■	
** Necesidad de desvío							

3.3 Fase 3: Reducción el número de factores a considerar en el modelo

3.3.1 Agrupación de los factores que se encuentran relacionados entre sí

El siguiente paso consistió en agrupar los factores, que de acuerdo a la literatura, que se encuentran relacionados.

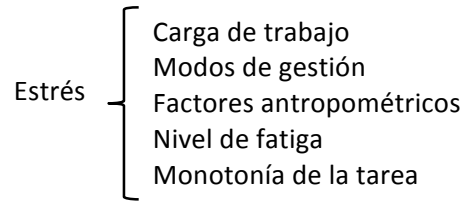


Figura 3.4: Factores relacionados con la Carga de trabajo

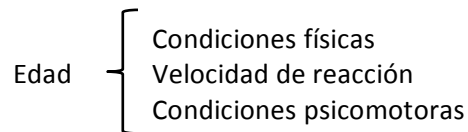


Figura 3.5: Factores relacionados con la Edad

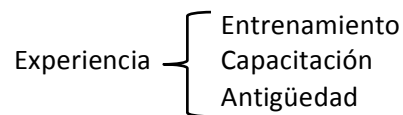


Figura 3.6: Factores relacionados con la Experiencia

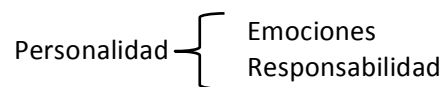


Figura 3.7: Factores relacionados con la Personalidad

Una vez realizada la agrupación de factores de acuerdo a la revisión de literatura, se logró obtener una reducción significativa de 28 a 15 factores, sin dejar fuera ningún de los conceptos considerados por las corrientes que explican el origen del error humano. En la tabla 3.2 se concentran los factores que tienen influencia en el cometido de errores por parte del humano.

Tabla 3.2: Concentrado de factores que explican el error humano

Atención	Edad
Concentración	Experiencia
Habilidad	Género
Percepción	Formación
Memoria	Motivación
Razonamiento	Comunicación
Inteligencia	Estrés
Personalidad	

3.3.2 Determinación de los factores que están correlacionados

Los factores obtenidos en el punto anterior, se evaluaron, utilizando los test psicométricos mencionados en la tabla 3.3, en un grupo de 30 operadores de línea de ensamble manual de una compañía electrónica del Noroeste de México. Las escalas que se utilizaron en cada factor se encuentran descritas en el Anexo 1, así como las evaluaciones de los trabajadores se concentran en el Anexo 2.

Tabla 3.3: Test psicométricos utilizados para evaluar a los operadores

TEST	FACTOR QUE MIDE	CREADOR	VALIDEZ Y CONFIABILIDAD
Dominó (D48)	Razonamiento	Edgar Anstey	0.79
Wonderlic	Habilidad	Eldon F. Wonderlic	0.90
Temán Merrill	Percepción, Concentración, Memoria, Atención	L.M. Terman y M.A. Merrill (1976)	0.86
Glazer	Estrés	Glazer	0.85
Personalidad	Personalidad		0.90

Posteriormente, a las evaluaciones de los operadores se aplicó un análisis de correlación de múltiples factores, como resultado se observó que existe asociación entre los factores atención, concentración y habilidad, entre personalidad y comunicación, así como entre los factores percepción, memoria y razonamiento (Tabla 4.1).

3.4 Fase 4: Estimación de los parámetros del modelo de regresión

Es esta fase del proyecto se estiman los parámetros del modelo de regresión considerando los siguientes factores: inteligencia, personalidad, edad, experiencia, género, formación, motivación, memoria y estrés.

3.4.1 Estimación del tamaño de la muestra

Primeramente, para tener una muestra significativa se utilizó el *cálculo del tamaño de la muestra desconociendo el tamaño de la población* (Mateu, 2003), mediante la siguiente fórmula:

$$n = \frac{z^2 pq}{d^2} \quad (3.1)$$

en donde,

97% de nivel de confianza

50% de probabilidad de éxito (error cometido)

50% de probabilidad de fracaso

10% de máximo error admisible en términos de proporción

El tamaño de muestra resultante fue el siguiente:

$$n = \frac{(2.18)^2(0.5)(0.5)}{(0.10)^2} = 118.81 \cong 119$$

En base al cálculo anterior se decidió redondear el tamaño de muestra a 120 operadores de línea de ensamble manual.

3.4.2 Obtención de las condiciones de operación de los trabajadores de línea de ensamble manual

Posteriormente, se caracteriza a los 120 operadores de línea de ensamble manual en cada uno de los 9 factores que integrarán el modelo de regresión múltiple. Estos factores constituyen el ambiente operacional del operador; siendo las variables independientes que permitan estimar, en función del tiempo, la probabilidad de ocurra un error humano. La caracterización completa de los 120 operadores de línea de ensamble manual se encuentra concentrada en el Anexo 3.

3.4.3 Medición del cometido de errores por parte de los trabajadores de la muestra

Durante un periodo de dos meses se registraron los errores cometidos por los trabajadores de línea de ensamble manual que formaban parte de la muestra, obteniéndose un concentrado de errores por trabajador los cuales son considerados la falla del proceso; se determinó la media de cometido de errores por trabajador, concentrada también en el Anexo 3.

3.4.4 Revisión de la existencia de control estadístico en la media y desviación estándar del cometido de errores

Se realizó un gráfico de control para la media (Figura 3.10) y desviación estándar (Figura 3.11) del promedio de cometido de errores de los 120 operadores analizados, obteniendo que tanto la media del tiempo al que se comete el error como su desviación estándar muestran comportamientos estables, determinándose que el 99.73 % de las veces el tiempo medio de cometido de errores se mantiene dentro del intervalos de confianza de 163.5 – 355.5 minutos, con un valor medio de 259.5 minutos.

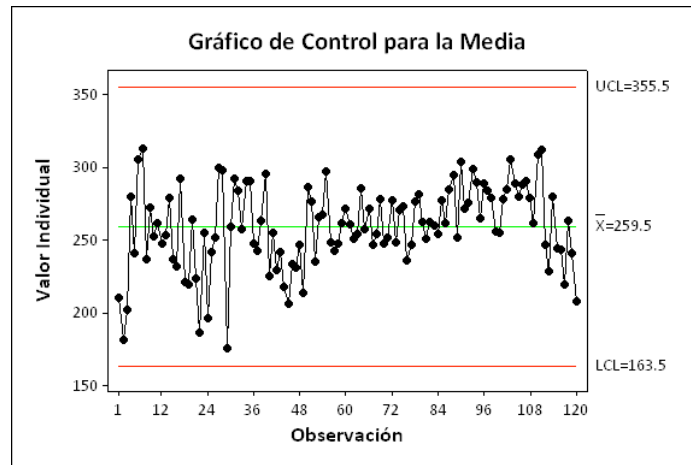


Figura 3.10: Gráfico de control para la media del cometido de errores

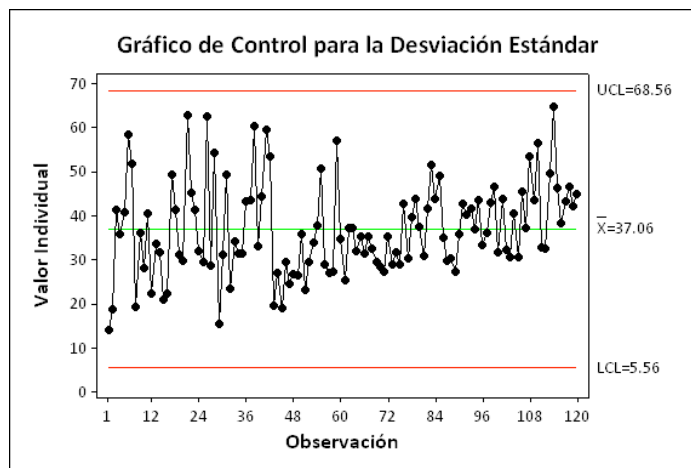


Figura 3.11: Gráfico de control para la desviación estándar de la media del cometido de errores

3.4.5 Estimación de los parámetros desconocidos de los factores del modelo

Dado que el modelo de riesgo proporcional de Cox se representa:

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{\beta x} \quad (3.2)$$

Como primer paso se obtiene la función lineal de las variables independientes que permitan estimar, en función del tiempo, la probabilidad de que ocurra un error humano. Mediante un conjunto de variables independientes, x_1, x_2, \dots, x_p cuyos valores influyen en el tiempo que transcurre hasta que se presenta el error.

Siendo βx la combinación lineal:

$$\beta x = \sum_1^p \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p \quad (3.3)$$

El análisis consiste entonces en estimar, mediante una ecuación de regresión lineal, los parámetros desconocidos de β_1, \dots, β_p .

3.4.6 Obtención del modelo de regresión

Utilizando los datos de ambiente operacional del operador y la media del cometido de errores, información que se encuentra concentrada en el anexo 3 del presente documento, se realiza un regresión lineal paso a paso para obtener un modelo integrado por los que son significativos en el cometido de error humano. En esta etapa se pretende probar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_i = 0 \quad H_0: \beta_i \neq 0$$

3.5 Fase 5: Determinar la tasa de falla base

3.5.1 Determinar el tipo de distribución de probabilidad de los errores cometidos por los operadores de línea analizados

Para realizar el análisis de datos se asumirá una distribución Weibull debido a que el 80% de los datos de errores por parte de los operadores tienen un comportamiento descrito por dicha distribución, es decir su probabilidad de error varía con el tiempo. En la Tabla 3.4 y la Figura 3.21 se muestra el concentrado en porcentaje de las diferentes distribuciones.

Tabla 3.4: Distribuciones de probabilidad presentes en el cometido de errores

Tipo de Distribución	No. De operadores	Porcentaje
Weibull	96	80%
Lognormal	3	3%
Normal	21	18%
Total	120	100%

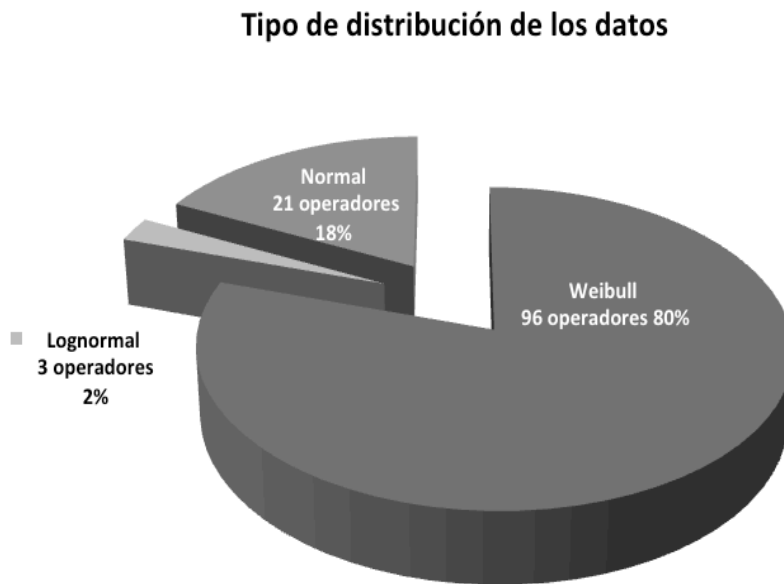


Figura 3.12: Gráfica de las distribuciones de probabilidad presentes en el cometido de errores

3.5.2 Obtención de la tasa de falla base

La siguiente etapa consiste en determinar la tasa de falla base o tasa de riesgo, de acuerdo a la distribución Weibull, a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda_0(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (3.4)$$

utilizando los siguientes valores:

Parámetro de forma $\beta = 10.9003$

Parámetro de escala $\alpha = 271.386$

Media= 259.386 minutos

Mediana =262.701 minutos

Tiempo 1= 180 minutos

Tiempo 2= 332 minutos

3.6 Fase 6: Obtención de la tasa de riesgo mediante el modelo de riesgo proporcional, utilizando la información del ambiente operacional y la tasa de falla base.

Dado que el modelo de riesgo proporcional de Cox se representa:

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{\beta x} \quad (3.5)$$

Se procede a calcular la tasa de comisión de errores considerando la tasa de riesgo instantánea a diferentes tiempos, dichos tiempos corresponden a la media, mediana, tiempo mínimo y tiempo máximo al que se comete el error en el estudio.

3.7. Validación el Modelo de Confiabilidad Humana

Para validar el modelo propuesto se realizó una prueba confirmatoria, la cual consistió en obtener, mediante la caracterización de los nueve factores, el ambiente operacional de 30 nuevos operadores de línea, para posteriormente medir, de cada uno de ellos, el tiempo al cual comenten error. Posteriormente se le realizó una regresión paso a paso para identificar los factores significativos.

Como se aprecia en la Tabla 3.5 el valor p de los factores Personalidad, Motivación, Memoria y Estrés es estadísticamente significativo al tener un valor menor que el nivel de significancia de $\alpha = 0.050$; lo anterior confirma los resultados del modelo obtenido producto de esta investigación.

Tabla 3.5: Modelo de regresión lineal múltiple para validación

Paso		1	2	3	4
Constante		255.5	251.4	276.9	289.0
Estrés		12.1	11.0	10.1	9.5
Valor T		4.23	4.25	4.28	4.59
Valor P		0.000	0.000	0.000	0.000
Motivación			-7.8	-8.0	-6.3
Valor T			-2.84	-3.20	-2.77
Valor P			0.009	0.004	0.010
Memoria				-8.8	-12.9
Valor T				-2.66	-4.00
Valor P				0.013	0.000
Personalidad					-2.70
Valor T					-2.95
Valor P					0.007
S		4.37	3.90	3.53	3.10
R-cuad		38.99	53.00	63.03	72.60
R-cuad. (ajustada)		36.82	49.51	58.77	68.22
Cp de Mallows		22.9	13.6	7.6	1.9

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos del trabajo de investigación realizado. En la primera y segunda fase de la metodología planteada se revisaron las diferentes corrientes existentes que explican el error humano, obteniéndose como resultado un concentrado de 28 factores diferentes que pueden influir en la comisión del mismo por parte del humano.

Posteriormente, en la tercera fase se realizó una revisión bibliográfica para determinar cuales se encuentran relacionados, reduciendo el número de factores a 15. Asimismo en esta fase se caracterizó a un grupo de 30 operadores de línea de ensamble manual de una Compañía electrónica del Noroeste de México, en 9 de los 15 factores para realizar un análisis de correlación de múltiples factores. Las escalas utilizadas para cada factor se encuentran descritas en el Anexo 1, así como las evaluaciones de los trabajadores se concentran en el Anexo 2.

Los resultados mostraron que existe fuerte relación entre los factores atención, concentración y habilidad, entre personalidad y comunicación, entre percepción, memoria y razonamiento, así como entre atención e inteligencia, tal como se muestra en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1: Análisis de correlación de múltiples variables para nueve factores

FACTORES	Inteligencia	Atención	Concentración	Habilidad	Percepción
Inteligencia <i>Valor - P</i>	1.00000	-0.31767 0.087	-0.22396 0.234	-0.22742 0.227	0.13269 0.485
Atención <i>Valor - P</i>	-0.31767 0.087	1.00000	0.77449 0.000	0.77602 0.000	0.09537 0.616
Concentración <i>Valor - P</i>	-0.22396 0.234	0.77449 0.000	1.00000	0.68286 0.000	-0.03518 0.854
Habilidad <i>Valor - P</i>	-0.22742 0.227	0.77602 0.000	0.68286 0.000	1.00000	-0.04097 0.830
Percepción <i>Valor - P</i>	0.13269 0.485	0.09537 0.616	-0.03518 0.854	-0.04097 0.830	1.00000
Memoria <i>Valor - P</i>	0.15509 0.413	0.00000 1.000	-0.12594 0.507	0.11731 0.537	0.61113 0.000
Razonamiento <i>Valor - P</i>	0.18131 0.338	0.03379 0.859	-0.16203 0.392	-0.00871 0.964	0.77764 0.000
Comunicación <i>Valor - P</i>	0.19297 0.307	-0.08884 0.641	0.00819 0.966	0.05724 0.764	0.11502 0.545
Personalidad <i>Valor - P</i>	0.16482 0.384	-0.11577 0.542	-0.22269 0.237	-0.08525 0.654	-0.295 0.114

Tabla 4.2: Continuación de la Tabla 4.1

FACTORES	Memoria	Razonamiento	Comunicación	Personalidad
Inteligencia	0.15509	0.18131	0.19297	0.16482
<i>Valor - P</i>	0.413	0.338	0.307	0.384
Atención	0.00000	0.03379	-0.08884	-0.11577
<i>Valor - P</i>	1.000	0.859	0.641	0.542
Concentración	-0.12594	-0.16203	0.00819	-0.22269
<i>Valor - P</i>	0.507	0.392	0.966	0.237
Habilidad	0.11731	-0.00871	0.05724	-0.08525
<i>Valor - P</i>	0.537	0.964	0.764	0.654
Percepción	0.61113	0.77764	0.11502	-0.295
<i>Valor - P</i>	0.000	0.000	0.545	0.114
Memoria	1.00000	0.72371	0.27447	-0.06813
<i>Valor - P</i>		0.000	0.142	0.721
Razonamiento	0.72371	1.00000	0.19015	-0.28318
<i>Valor - P</i>	0.000		0.314	0.129
Comunicación	0.27447	0.19015	1.00000	-0.45209
<i>Valor - P</i>	0.142	0.314		0.0120
Personalidad	-0.06813	-0.28318	-0.45209	1.00000
<i>Valor - P</i>	0.721	0.129	0.012	

Con base en estos resultados el número de factores a considerar en el modelo de Confiabilidad Humana son: inteligencia, personalidad, edad, experiencia, género, formación, motivación, memoria y estrés.

En la cuarta fase de la metodología, utilizando el *Cálculo del tamaño de la muestra desconociendo el tamaño de la población*, se estimó un tamaño de muestra de 120 operadores de línea, de los cuales se caracterizaron cada uno de los factores para posteriormente, durante un periodo de dos meses, registrar los tiempos a los que cada uno cometió errores.

En esta fase se obtuvo se realizó al análisis de regresión lineal paso a paso para determinar los factores significativos y los β 's de los factores que integran el Modelo de Confiabilidad Humana, los resultados se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Regresión paso a paso para determinar los factores del modelo

Paso		1	2	3	4	5	6
Constante		187.9	264.0	282.1	291.0	278.0	278.7
Estrés		24.7	15.8	13.9	13.7	13.9	13.8
Valor T		13.45	8.89	7.66	7.64	7.80	7.78
Valor P		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Motivación			-17.2	-16.1	-16.4	-16.4	-16.3
Valor T			-8.70	-8.33	-8.59	-8.67	-8.66
Valor P			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Memoria				-6.2	-6.3	-6.4	-5.9
Valor T				-3.13	-3.22	-3.29	-3.00
Valor P				0.002	0.002	0.001	0.003
Personalidad					-3.3	-3.4	-3.0
Valor T					-2.16	-2.20	-1.98
Valor P					0.033	0.030	0.05
Edad						0.46	0.56
Valor T						1.56	1.86
Valor P						0.121	0.066
Experiencia							-1.80
Valor T							-1.60
Valor P							0.113
S		18.0	14.1	13.6	13.4	13.3	13.2
R-cuad		60.52	76.03	77.89	78.75	79.20	79.66
R-cuad. (ajustada)		60.19	75.62	77.32	78.01	78.29	78.58
Cp de Mallows		103.3	19.2	10.8	8.1	7.6	7.0

De acuerdo con los resultados de la tabla anterior el modelo de regresión lineal múltiple para la media del cometido de errores quedó integrado de la siguiente manera:

$$\text{Media} = 291 + 13.7 x_1 - 16.4 x_2 - 6.3 x_3 - 3.3 x_4$$

Donde:

Tabla 4.4: Parámetros β de los factores del modelo

Variable X_p	Parámetro β_p	Valor del parámetro
Constante	β_0	297
Estrés = x_1	β_1	13.7
Motivación = x_2	β_2	-16.4
Memoria = x_3	β_3	-6.3
Personalidad = x_4	β_4	- 3.3

Los parámetros β_0 y β_1 con signo positivo indican un aumento de la tasa instantánea de riesgo cuando se incrementa el valor de la variable x , mientras que los parámetros β_2 , β_3 y β_4 con signo negativo indican un descenso en la tasa instantánea de riesgo cuando se incrementa el valor de x (Tabla 4.4).

Posteriormente, se realizó un análisis de varianza a la regresión lineal múltiple obtenida; este análisis se encuentra expresado en la tabla 4.5, en la que se aprecia que $f_0 = 106.57 > f_{0.05,4,115} = 2.61$ rechazando la hipótesis nula y determinando que existe una relación lineal entre la Media del cometido de errores por parte de los operadores y el ambiente operacional de éstos. Lo anterior se confirma al observar que el *valor p* es considerablemente menor que $\alpha = 0.05$.

Tabla 4.5: Análisis de varianza

Fuente	GL	SS	MS	F	P
Regresión	4	76181	19045	106.57	0.000
Error Residual	115	20553	179		
Total	119	96733			

El modelo de regresión lineal múltiple obtenido tiene un buen coeficiente de determinación, el cual muestra que los factores que integran el modelo explican el 78.0% de la varianza de la media del cometido de errores (Tabla 4.3). En la Figura 4.1 se aprecia que los datos residuales no se apegan a una distribución normal (Valor- $p = 0.134$).

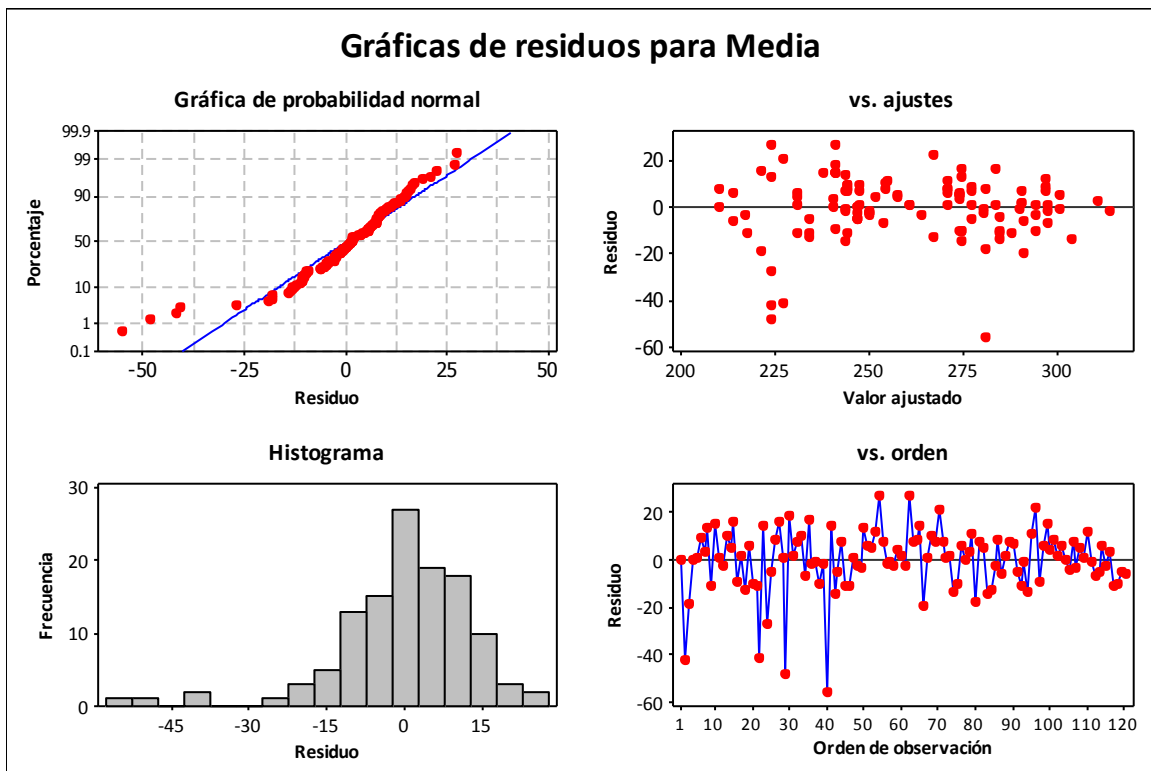


Figura 4.1: Gráficas de residuos para la Media

En la Figura 4.1 se puede observar que la media del error no sigue un comportamiento normal, y aún cuando los modelos se basan en asumir un comportamiento conocido de la variable de respuesta para generar un modelo aproximado y cuantificar la respuesta de las variables aleatorias, sin embargo en caso como éste los datos no siempre se aproximan a una curva conocida, por lo que según Taucher (1999) se puede utilizar la regresión Cox, ya que tiene la gran ventaja de que no se basa en modelar una curva de sobrevivida. De hecho este modelo no tiene curva de sobrevivencia predefinida, pero si permite ver la influencia de los predictores en la respuesta.

En la fase número cinco de la metodología se determinó la tasa de falla base de del Modelo de Confiabilidad Humana, para lo cual se asumió una distribución Weibull, ya que el 80% de la Media del cometido de errores individuales por parte de los operadores sigue esta distribución, adicionalmente se realizó una gráfica de probabilidad para la media del cometido de errores, observándose en la Figura 4.1 que los datos se ajustan, con un nivel de confianza del 95%, a la distribución Weibull, con una correlación de 0.997.

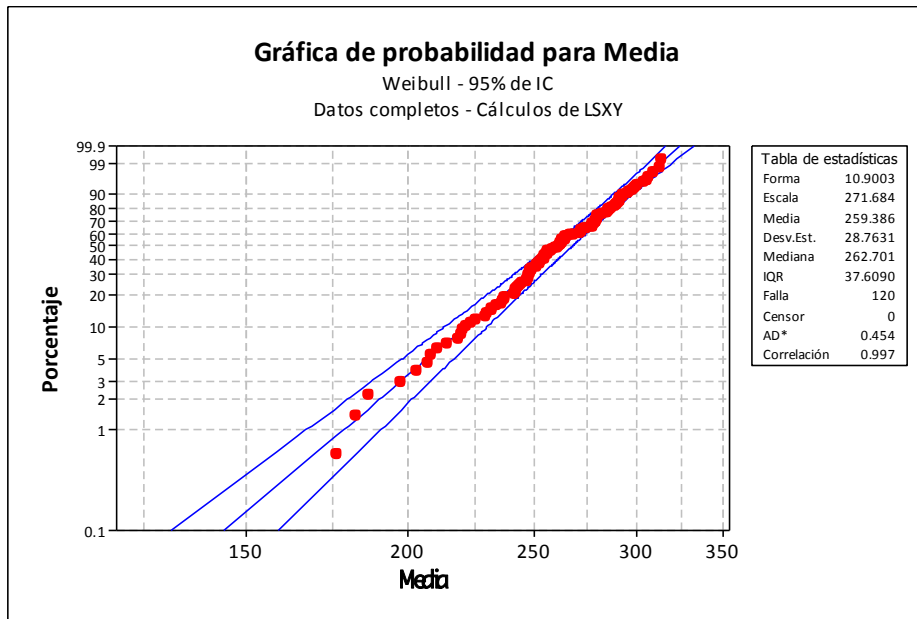


Figura 4.2: Gráficas de probabilidad para la media

Posteriormente se realiza la gráfica de riesgo de la media del cometido de errores. Se puede observar mediante la Figura 4.3 una probabilidad de errores rápidamente creciente conforme transcurre el tiempo, asimismo se obtienen los parámetros de forma y escala del comportamiento de los datos.



Figura 4.3 Gráfica de riesgo para la Media

Asimismo la Figura 4.4 muestra la Gráfica de fallas acumuladas para diferentes Medias del

cometido de errores.

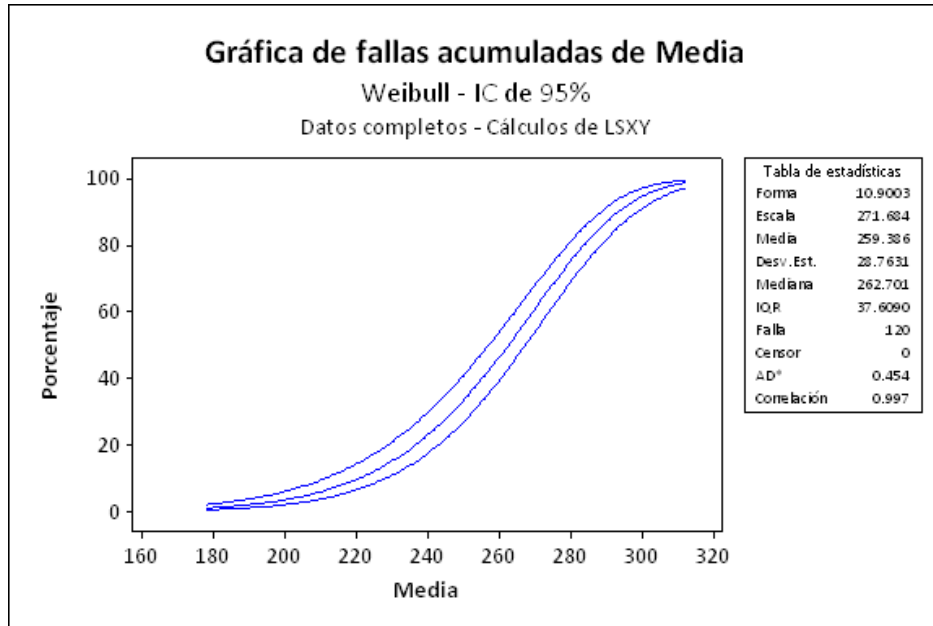


Figura 3.14 Gráfica de fallas acumuladas para diferentes Medias

La tasa de falla base o tasa de riesgo se obtuvo utilizando el parámetro de forma $\beta = 10.9003$ y

el parámetro de escala $\alpha = 271.386$, mediante la ecuación: $\lambda_0(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}$

En la tabla 4.6 se muestra el concentrado de la tasa de falla base para diferentes tiempos al que se presenta el error. Para este concentrado se tomaron los la media y mediana del cometido de errores, así como el tiempo mínimo y máximo que se considera en la Figura 5.3.

Tabla 4.6: Concentrado de la tasa de falla base para diferentes tiempos de cometido de error

	Tiempo (minutos)	Tasa de falla base
Media	259.386	$\lambda_0(259.386) = \frac{10.9003}{271.684} \left(\frac{259.386}{271.684}\right)^{9.9003} = 0.025363$
Mediana	262.701	$\lambda_0(262.701) = \frac{10.9003}{271.684} \left(\frac{262.701}{271.684}\right)^{9.9003} = 0.028761$
Tiempo 1	180	$\lambda_0(180) = \frac{10.9003}{271.684} \left(\frac{180}{271.684}\right)^{9.9003} = 0.0006812$
Tiempo 2	332	$\lambda_0(332) = \frac{10.9003}{271.684} \left(\frac{332}{271.684}\right)^{9.9003} = 0.292032$

En la fase número seis de la metodología se obtuvo el Modelo de Confiabilidad Humana mediante el Modelo de Riesgo Proporcional de Cox (3.5) para los operadores del línea de la

Planta, utilizando la información del ambiente del trabajador y la tasa de falla base, quedando de la siguiente manera:

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{13.7X_1 - 16.4X_2 - 6.3X_3 - 3.3X_4}$$

La corrida confirmatoria realizada para validar los β 's del Modelo validó que los Factores Personalidad, Motivación, Memoria y Estrés es estadísticamente significativo al tener un valor menor que el nivel de significancia de $\alpha = 0.050$.

4.1 Riesgo relativo y análisis de varianzas

El modelo que representa a la confiabilidad humana de los operadores de línea en ensamble manual se encuentra conformado por cuatro factores significativos de acuerdo al ajuste del mismo; éstos factores son categóricos, por lo que es de interés determinar si hay diferencia en el cometido de errores entre las categorías de estas variables.

Para lograr lo anterior, se determinó el valor cociente entre las tasas instantáneas de riesgo dando como resultado una magnitud, conocida como Riesgo Relativo, en la que no interviene el tiempo, sino los factores evaluado un grupo de operadores con respecto a otro grupo con un patrón diferente en los factores. Los resultados se observan en la Tabla 4.4.

4.1 Análisis de varianzas

Mediante el análisis de varianzas se verificó que hay diferencia estadística significativa entre las Medias del cometido de errores de las diferentes categorías de los factores Personalidad, Motivación, Memoria y Estrés, tal como se muestra en el concentrado presentado en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Riesgo relativo y análisis de varianzas para los factores categóricos significativos

Variable	RR	Media	Desviación Estándar	ICs de 95% individuales para la media basados en Desviación Estándar agrupada
Personalidad				(-----+-----+-----+-----+-----)
Tipo B	1	0.0267	0.1842	(-----*-----)
Tipo A-B	1.37	-0.0067	0.1948	(-----*-----)
Tipo A	1.18	-0.0107	0.2315	(-----*-----)
	P-Valor = 0.042			(-----+-----+-----+-----+-----)
	Desviación Estándar agrupada = 0.2083			-0.050 0.000 0.050 0.100
Motivación				(-----+-----+-----+-----+-----)
Baja	2.73	----	----	
Inf. a media	2.03	0.1958	0.0890	(--*----
Media	1.80	-0.0448	0.1217	(--*----
Sup. a Media	0.65	-0.1981	0.1784	(--*----
Alta	1	----	----	
	P-Valor = 0.000			(-----+-----+-----+-----+-----)
	Desviación Estándar agrupada = 0.1307			-0.24 -0.12 0.00 0.12
Memoria				(-----+-----+-----+-----+-----)
Baja	3.70	0.3172	0.0640	(-----*-----)
Inf. a media	2.67	0.0624	0.1516	(-*--)
Media	1.92	-0.0656	0.1945	(-*--)
Sup. a Media	1.39	-0.2007	0.1774	(-----*-----)
Alta	1	----	----	
	P-Valor = 0.002			(-----+-----+-----+-----+-----)
	Desviación Estándar agrupada = 0.1725			-0.20 0.00 0.20 0.4
Estrés				(-----+-----+-----+-----+-----)
Bajo	1	-0.3301	0.0367	(---*---
Inf. a media	1.85	-0.1841	0.1549	(-*)
Media	5.31	0.0576	0.1068	(*)
Sup. a Media	6.39	0.1720	0.1318	(-*)
Alto	11.87	0.3884	0.0047	(-----*-----)
	P-Valor = 0.000			(-----+-----+-----+-----+-----)
	Desviación Estándar agrupada = 0.1287			-0.30 0.00 0.30 0.60

5. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones alcanzadas respecto a las hipótesis y los objetivos planteados, para posteriormente mostrar las conclusiones generales de trabajo, seguidas de las recomendaciones sugeridas.

A continuación se muestran las conclusiones de acuerdo con las hipótesis y objetivos planteados en la investigación.

5.1 Conclusiones de acuerdo a las hipótesis

Hipótesis 1: Los factores que determinan el ambiente operacional e influyen significativamente en la Confiabilidad Humana son el estrés, memoria, motivación y personalidad de los operadores

Respecto a esta hipótesis se demostró estadísticamente que los factores estrés, memoria, motivación y personalidad son determinantes en el ambiente operacional e influyen significativamente en la Confiabilidad Humana de los operadores de línea de ensamble Manual.

Hipótesis 2: El modelo de riesgo proporcional de Cox es útil para describir el comportamiento de la tasa de error humano, tomando en cuenta el ambiente operacional y el tiempo en jornada.

La hipótesis fue verdadera, y se demostró al obtener un modelo que describe adecuadamente el comportamiento de la tasa de riesgo; esto se probó al calcularse la tasa de riesgo para diferentes tiempos de comisión de errores, describiendo en todos los casos el mismo comportamiento ascendente en la probabilidad de la comisión del error al incrementarse el tiempo de trabajo del operador.

Hipótesis 3: Los parámetros del modelo obtenido son adecuados para identificar un ambiente operacional propicio que aumente la Confiabilidad Humana.

La hipótesis número tres resultó verdadera al obtener los parámetros del modelo que permiten calcular el riesgo relativo de cada una de una de las categorías de los factores más significativos, determinando así las condiciones de operación más convenientes del operador de línea de ensamble manual que permitan disminuir su probabilidad de cometer errores.

Hipótesis 4: La probabilidad de que el operador cometa errores se incrementa conforme transcurre su tiempo en jornada.

Se comprobó la hipótesis número cuatro al determinar que para este tipo de operaciones se tiene una tasa creciente de riesgos al incrementarse el tiempo en la jornada.

5.2 Conclusiones de acuerdo a los Objetivos

En cuanto a los objetivos propuestos al inicio de esta investigación, se puede decir que se cumplieron tanto el General como los específicos a lo largo del desarrollo del trabajo.

5.3 Conclusiones Generales

Como resultado de la presente investigación se construyó un Modelo de Confiabilidad Humana mediante el modelo de riesgo proporcional de Cox para el personal del nivel operativo de la planta de ensamble; el modelo está integrado cuatro factores que resultaron estadísticamente significativas, de un total de 28 factores identificados mediante la revisión de literatura como influyentes en el error humano.

El modelo permite describir el comportamiento de falla del operador de línea de ensamble manual tomando en cuenta el efecto del ambiente operacional y el tiempo de operación, así como la posibilidad de determinar el ambiente operacional adecuado para el trabajador, que le permita reducir la probabilidad de cometer errores.

Una ventaja adicional del modelo es que le dá un enfoque cuantitativo al Análisis de la Confiabilidad Humana (HRA), ya que éste se caracteriza por un alto grado de incertidumbre, determinado por un enfoque subjetivo frecuentemente basado en la intuición y la experiencia.

6. RECOMENDACIONES

6.1 Futuras líneas de investigación

Como futura línea de investigación se propone utilizar la lógica difusa como una alternativa para el Análisis de Confiabilidad Humana (HRA) por ser una lógica alternativa a la lógica clásica, la cual fue diseñada para imitar el comportamiento del ser humano y que pretende introducir un grado de vaguedad en las cosas que evalúa; considerando el hecho de que en el error humano interviene una gran cantidad y complejidad de variables, complicando el tema de cómo prevenirlo o reducirlo.

7. REFERENCIAS

- Aiken, L. (1996). *Tests psicológicos de evaluación*. México: Prentice-Hall.
- Amendola, L. J. (2002). *Modelo de confiabilidad humana en la gestión de activos*. Asociación Española de mantenimiento. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Anastasi, A. (1986). *Los tests psicológicos*. Madrid: Aguilar.
- Bedford, T. J., Cooke, R. (2001). *Probabilistic risk analysis: foundations and methods*. Cambridge University, UK, 408.
- Bermúdez, J., Pérez-García, A. M., Sanjuán, P. (2003). *Psicología de la personalidad: Teoría e Investigación*, Madrid: UNED, Vol. 1. 343-387.
- Boscolo, A., (1996), *Strumentazione basata sulla conoscenza: incertezza, informazione e conoscenza*, Proc. International Conference BIAS, 27 th ed., 26-28 November 1996.
- Bubb, H. (2005). *Human Reliability: A Key to improved Quality in Manufacturing*, Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, 15(4), 353-368.
- Cárdenas, S. (2009). *Fallo humano: la quiebra de un paradigma*, Apuntes de psicología, 27 (1), 21–51, España.
- Čepin, M. (2008). *Comparasion of Methods for Dependency Determination between Human Failure Events within Human Reliability Analysis*, Science and Technology of Nuclear Installations, doi:10.1155/2008/987165, 1-7.
- Chiliá, V. (1992). Valoración del riesgo. Predicción y prevención. Análisis de vulnerabilidad. En C. Álvarez, V. Chiliá y A. Hernando (Eds) *Manual de asistencia sanitaria en las catástofes*, 29 - 35 pp. Madrid: Pirámide.
- Collins, R. y Leathley, B. (1995). *Psychological predispositions to errors in safety, reliability and failure analisis*, Safety and Reliability, 14 (3), 6-42.
- Collins, K., Rooney B.L., Smalley, K.J., Havens, S. (2004). *Funtional Fitness, disease and independence in community-dwelling older adults in western Wisconsin*. WMJ, 123(16), 606-10.

Cox, D.R., (1972). *Regression models and life-tables*. Journal of the royal Statistical Society, Series B 34, 187-202.

Dejours, C. (1998). *El Factor Humano*. Buenos Aires: Lumen

De la Vara, R. (2004). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill.

Di Sopra, L. (1983). *Hypothesis for the construction of vulnerability tables*, Third Congress of Emergency and Disaster Medicine, Roma.

Dondossola, G. And Mauri, G. (2001), *Le vulnerabilita informatiche nell'automazione della rete elettrica*, L'Energia Electrica, pp. 35-46.

Ecay, H. (2008). *Ingeniería de Confiabilidad Operacional*. Reliability. Universidad Austral. 3 edición. Buenos Aires, Argentina.

Embrey, D.E. (1986). SHERPA. Systematic human error. Reduction and prediction approach. International topical meeting and advances in human factors in nuclear power systems. Knoxville. Tennessee, USA.

Endsley, M.R. (2000). *Theoretical underpinnings of situation awareness: a critical review*. En M.R. Endsley y D.J. Garland, (Eds). *Situation Awareness Analysis and Measurement*. Mahwah, NJ. LEA.

García, P.O. (2006). *Estrategias de confiabilidad humana para la formación del ingeniero en la sociedad del conocimiento*. Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia. Colombia.

Hansen, C.P. (1988). Personality characteristics of the accident involved employee. *Journal of Business and psychology*. No. 2. 346 - 365 pp.

Hollnagel, E. (1993). *Human reliability analysis: context and control*, Academic Press.

Humphreys, P. (1988). Human reliability assessors guide. In sayers. B.A. (Ed). *Human Factors and Desition marking: their influence on safety and Reliability*. Elsevier, London.

Hosmer, Lemeshow, (1997), *Applied Survival Analysis*, John Willey & SONS, INC.

Krause, T.R., Hidley, J.H. and Hodson, S.J. (1990). *The Behavior - Based Safety Process*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Kirwan, B. (1992). Human error identification in human reliability assessment. Part. 1: Overviews of approaches. Part. 2: Detailed comparison of techniques. *Applied Ergonomics*. Vol. 23. No. 56.

Labrador R.O., Fernández L. (2011). La Experiencia Emocional en el Desarrollo Cognitivo y la Interrelación en Grupos. Datos preliminares comunicados en II Jornadas de Actualización en Neurociencias aplicadas a la Psicofarmacología. Colegio Venezolano de Neuropsicofarmacología y Escuela de Medicina, Extensión Táchira, Universidad de Los Andes.

Magorio, J., Investigación de Accidentes, Argentina, 2002.

Marseguerra, M., Zio, E. y Librizzi, M. (2007). *Human Reliability Analysis by Fuzzy "CREAM"*, *Risk Analysis*, 27(1), 137 – 154.

Mateu, E., Casal J. (2003). *Tamaño de muestra*, *Revista Epidemiología y Medicina Preventiva*, Centre de Recerca en Sanitat Animal, Dep. Sanitat i Anatomia Animal, Universitat Autònoma de Barcelona, 1, 8-14.

McCrae, R.R., Costa, P.T. Jr. (1999). *A five-factor theory of personality*. En L.A. Pervin y O.P. John (Eds), *Handbook of personality. Theory and reseach* (2 Ed). New York: Guildford, 139-153.

McCormick, N.J. (1981), *Reliability and Risk Analisys*, *Academic Press, London*.

Mulder, G. (1983). *The heart mental effort. Groningen (discourse)*. Citado en Drenth, P.J.

Muñiz, J. (Coord.) (1996). *Psicometría*. Madrid: Universitas

Nunnally, J. y Bernstein, Y. (1995). *Teoría psicométrica*. México: McGraw-Hill.

Peña, D., (2002), *Análisis de datos multivariantes*, España: McGraw Hill.

Reason, J. (1990). The contribution of latent human failures o the breakdown of complex systems. *Phil. Trans. Royal Society of London*. No. 327. 475 - 484 pp.

Sebastián, M.L. (2006). Ergonomía en las cabinas de trenes de alta velocidad: clave de análisis. Acta del primer simposium Iberoamericano de Ergonomía y Psicociología: "Facilitando a actividade e melhorando o trabalho". Avilés: 23 de septiembre - 01 de octubre.

Ramsey, J. (1985). *Ergonomic factors in task analysis for customer product safety*. Journal of Occupational Accidents, 7. 113-123.

Rasmussen, J. (1979). On the structure of knowledge - A morphology of mental models in a man-machine system context. Roskilde, Denmark. Risk National Laboratory.

Rasmussen, J. (1982). Human errors: A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. Journal of Occupational Accidents. No. 4. 311 - 333 pp.

Rasmussen, J. (1983). Skill, rules and knowledge: signal, signs and symbols and other distinction in human performance models. IEEE Transactions: Systems, Man and Cybernetics SMC, No. 13, 257-267 pp.

Rasmussen, J. (1986). Information processing and human-machine interaction: an approach to cognate engineering. New York. North Holland.

Rasmussen, J. (1990). *Human error and the problem of causality in analysis of accidents*, Phil. Trns. Royal Society of London, 327, 449-62.

Sanders, M.M., McCormick, E.J. (1993). Human Factors in Engineering Design (7thEd.), New York: McGraw Hill.

Swain, a., D., Guttman, H.E. (1983). Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. N.U.R.E.G./C.R. - 1278. Albuquerque N.M.: Sandia Nuclear Laboratories.

Sebastián, M.L. (2002). *Fallo Human: evitando el error*. Líneas del tren, 278, 22-23.

Taucher E. (1999). Análisis de supervivencia. En: Bioestadística. Santiago: Editorial Universitaria. P.257-266.

Therneau, T., Grambsch, P., Fleming, T., (1990), *Martingale based residual for survival models*, Biometrika, 77, 147-160.

Therneau, T., Grambsch, P., (2000), *Modeling Survival Data: Extending the Cox Model*, Springer-Verlag, Berlin.

- Timiras P.S. (1997) *Bases fisiológicas del envejecimiento y geriatría*. Barcelona: Masson.
- Thompson, J.R.W.A. (1988). *Point Process Models with applications to Safety and Reliability*, Chapman and Hall, London.
- Wickens, C.D. (1992). *Engineering psychology and human performance*, Nueva York: Harper Collins.
- Wisner, A. (1987). *Por dentro do trabalho*. Sao Paulo: Editora FTD/Oboré.
- Yamamura, T., Yata, K., Yasushi, T., Yamaguchi, H. (1989). *A basic study on human error in communication network operation. Global Telecommunications Conference and exhibition. Communications Technology for the 1990s beyond*. IEEE, 2, 795 – 800.
- Yáñez, M; Gomez de la Vega, H.; Valbuena, G. (2004). *Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo*. R2M, S.A.
- Zio, E., Baraldi, P., Librizzi, M., Podofillini, L., fuzzy y Dang, V.N. (2009). *A fuzzy set-based approach for modelling dependence among human errors*, *Fuzzy Sets and Systems*, ScienceDirect, 160, 1947 – 1964.

8. ANEXOS

8.1 Anexo 1

Escalas consideradas para cada uno de los factores

<i>Estrés</i>			<i>Memoria</i>			<i>Atención</i>			<i>Formación</i>	
B	Bajo	1	I	Inferior	1	I	Inferior	1	Primaria	1
STM	Inferior al término medio	2	STM	Inferior al término medio	2	STM	Inferior al término medio	2	Secundaria	2
TM	Término medio	3	TM	Término medio	3	TM	Término medio	3	Preparatoria	3
ITM	Superior al término medio	4	ITM	Superior al término medio	4	ITM	Superior al término medio	4	Carrera técnica	4
A	Alto	5	S	Superior	5	S	Superior	5	Licenciatura	5
<i>Motivación</i>			<i>Concentración</i>			<i>Habilidad</i>			<i>Experiencia</i>	
B	Baja	1	I	Inferior	1	I	Inferior	1	0 – 3 meses	1
SM	Inferior a la media	2	STM	Inferior al término medio	2	STM	Inferior al término medio	2	3– 6 meses	2
M	Media	3	TM	Término medio	3	TM	Término medio	3	6 meses - 1 año	3
IM	Superior a la media	4	ITM	Superior al término medio	4	ITM	Superior al término medio	4	1 – 3 años	4
A	Alta	5	S	Superior	5	S	Superior	5	Más de 3 años	5
<i>Percepción</i>			<i>Razonamiento</i>			<i>Género</i>			<i>Personalidad</i>	
I	Inferior	1	I	Inferior	1	Mujer		1	Tipo A	1
STM	Inferior al término medio	2	STM	Inferior al término medio	2	Hombre		2	Tipo A - B	2
TM	Término medio	3	TM	Término medio	3	<i>Comunicación</i>			Tipo B	3
ITM	Superior al término medio	4	ITM	Superior al término medio	4	Escasa		1	<i>Inteligencia (coeficiente intelectual)</i>	
S	Superior	5	S	Superior	5	Suficiente		2	<i>Edad (años)</i>	

8.2 Anexo 2

Evaluación de los primeros nueve factores en trabajadores de línea de ensamble manual

Trabajador	Factores									Turno
	Inteligencia	Atención	Concentración	Habilidad	Percepción	Memoria	Razonamiento	Comunicación	Personalidad	
I	102	2	1	1	2	1	2	1	3	Primer turno
II	104	1	1	2	1	2	2	1	3	
III	98	2	2	3	1	1	1	1	2	
IV	102	2	2	2	1	1	2	2	2	
V	96	2	1	2	1	2	1	1	3	
VI	101	1	2	1	2	2	2	1	3	
VII	101	2	1	2	3	3	3	2	3	
VII	103	3	3	3	1	3	2	2	3	
IX	102	3	3	3	1	2	1	1	3	
X	99	1	1	1	1	2	1	1	3	
XI	102	1	1	1	2	2	2	2	1	
XII	101	4	3	3	1	1	1	2	2	
XIII	104	2	1	2	3	3	3	1	3	
XIV	103	1	2	1	1	2	1	2	2	
XV	101	2	2	2	5	3	3	2	2	
XVI	98	4	5	3	1	1	1	1	2	
XVII	103	2	2	3	2	2	1	1	3	
XVIII	96	3	3	3	1	2	2	1	3	
XIX	104	1	1	2	2	3	3	2	2	
XX	103	2	1	1	3	2	2	1	3	
XXI	102	3	3	3	1	2	1	2	3	
XXII	101	4	5	3	3	2	2	1	2	
XXIII	101	4	3	3	3	2	3	1	2	
XXIV	101	3	3	3	1	2	1	2	3	
XXV	104	1	2	1	1	1	1	1	3	
XXVI	103	1	2	2	2	2	2	2	3	
XXVII	102	3	3	3	4	4	4	2	1	
XXVIII	96	2	2	2	2	2	2	2	1	
XXIX	102	2	1	2	1	2	2	1	3	
XXX	104	1	1	2	1	1	1	1	3	

8.3 Anexo 3

Caracterización de los 120 operadores en los factores a considerar en el modelo de Confiabilidad Humana (1 de 5)

No.	Inteligencia	Personalidad	Edad	Experiencia	Género	Formación	Motivación	Memoria	Estrés	Media	Desviación Estándar	Parámetro de Forma	Parámetro de Escala
I	102	3	23	3	1	3	4	3	1	210.449	14.241	1.700	239.000
II	104	3	27	3	1	4	4	3	2	181.980	18.737	1.706	209.500
III	98	2	26	4	1	4	4	4	2	202.744	41.426	1.834	209.900
IV	102	2	33	1	1	3	2	2	3	279.802	35.836	2.024	307.100
V	96	3	35	3	1	3	3	3	2	241.149	40.869	1.579	253.700
VI	101	3	24	1	1	2	2	1	4	305.948	58.510	1.511	313.500
VII	101	3	22	2	2	2	2	1	5	313.429	51.932	2.896	330.000
VIII	103	3	31	4	2	4	4	3	2	237.324	19.465	2.308	272.300
IX	102	3	24	3	2	1	2	3	4	273.100	36.355	1.878	300.300
X	99	3	33	3	2	3	4	3	3	253.077	28.190	2.012	288.800
XI	102	1	23	3	2	2	3	3	3	261.591	40.743	1.843	288.700
XII	101	2	31	2	2	4	3	2	2	247.637	22.421	2.299	278.400
XIII	104	3	30	1	1	2	4	2	3	254.065	33.661	2.460	289.800
XIV	103	2	22	4	1	3	2	3	3	279.033	31.928	2.086	311.600
XV	101	2	29	3	2	4	4	4	2	236.887	21.204	1.845	271.000
XVI	98	2	29	4	2	3	4	3	3	231.875	22.362	1.887	266.000
XVII	103	3	26	1	1	2	2	2	4	292.177	49.386	1.994	266.400
XVIII	96	3	22	4	2	2	3	4	2	221.548	41.407	1.779	245.300
XIX	104	2	27	4	1	4	4	3	1	219.913	31.343	2.062	253.700
XX	103	3	33	2	1	2	3	2	4	264.206	29.858	1.856	288.900
XXI	102	3	32	5	2	2	3	4	2	223.560	62.982	1.505	227.900
XXII	101	2	26	2	2	4	4	3	2	186.290	45.345	2.850	204.500
XXIII	101	2	28	3	1	3	4	3	3	255.699	41.358	1.854	277.600
XXIV	101	3	31	5	2	3	4	3	2	196.733	32.091	1.629	216.300
XXV	104	3	23	5	1	4	3	2	2	242.055	29.567	1.995	267.600

Caracterización de los 120 operadores en los factores a considerar en el modelo de Confiabilidad Humana (2 de 5)

No.	Inteligencia	Personalidad	Edad	Experiencia	Género	Formación	Motivación	Memoria	Estrés	Media	Desviación Estándar	Parámetro de Forma	Parámetro de Escala
XXVI	103	3	26	3	1	2	4	2	3	252.420	62.730	1.596	283.200
XXVII	102	1	25	1	2	2	2	2	3	299.807	28.770	2.581	326.600
XXVIII	96	1	35	4	1	2	2	2	4	298.050	54.554	2.244	316.000
XXIX	102	3	22	5	1	4	4	3	2	175.757	15.687	1.633	200.000
XXX	104	2	26	3	1	3	4	3	3	259.777	31.375	2.481	281.100
XXXI	102	3	24	2	1	2	2	2	4	292.177	49.386	1.682	311.000
XXXII	101	3	27	3	2	2	2	2	3	284.019	23.657	2.876	315.800
XXXIII	102	2	32	2	2	2	4	2	3	257.435	34.421	2.603	286.900
XXXIV	101	1	26	2	1	3	2	2	4	290.644	31.443	3.123	321.600
XXXV	102	3	28	3	1	3	3	2	4	290.644	31.443	3.123	321.600
XXXVI	104	2	31	5	1	4	3	2	2	248.169	43.370	2.031	268.600
XXXVII	101	2	30	4	1	3	3	3	2	243.174	43.682	1.723	274.700
XXXVIII	101	3	23	4	1	2	3	2	4	263.830	60.452	1.973	290.700
XXXIX	102	1	26	4	1	2	2	2	4	295.715	33.158	3.155	335.400
XL	98	1	25	3	1	2	3	2	4	225.159	44.515	1.768	239.400
XLI	101	2	30	2	1	3	4	3	3	255.576	59.741	1.523	282.600
XLII	99	2	29	1	1	4	3	3	2	229.490	53.610	1.307	235.400
XLIII	102	3	30	4	1	4	3	2	2	242.030	19.575	2.011	277.800
XLIV	101	3	23	4	1	4	4	3	1	218.044	27.058	1.907	240.400
XLV	98	3	25	5	1	3	4	4	2	206.736	19.208	1.629	234.000
XLVI	101	1	29	2	2	4	4	3	3	233.783	29.739	1.659	259.700
XLVII	102	1	29	2	1	3	4	3	2	231.710	24.709	1.672	262.900
XLVIII	101	2	31	1	1	4	3	2	2	247.274	26.809	1.977	278.000
XLIX	102	1	24	4	1	3	4	3	1	214.061	26.691	1.304	223.800
L	102	3	26	3	1	2	3	2	4	287.191	35.858	2.092	319.200
LI	102	3	33	3	2	3	2	3	3	276.885	23.221	2.319	313.200

Caracterización de los 120 operadores en los factores a considerar en el modelo de Confiabilidad Humana (3 de 5)

No.	Inteligencia	Personalidad	Edad	Experiencia	Género	Formación	Motivación	Memoria	Estrés	Media	Desviación Estándar	Parámetro de Forma	Parámetro de Escala
LII	99	1	29	3	1	4	4	3	2	235.733	29.699	1.794	263.600
LIII	103	1	33	5	1	2	3	4	3	266.171	33.993	1.705	284.900
LIV	104	1	34	1	1	2	3	4	2	268.061	37.908	1.851	293.800
LV	102	3	26	5	1	2	2	2	4	297.692	50.897	1.917	321.600
LVI	101	2	31	2	1	4	3	2	2	248.664	29.034	2.105	301.600
LVII	99	2	25	2	1	3	3	3	2	242.556	27.041	1.649	266.800
LVIII	101	2	31	4	1	4	3	2	2	247.785	27.336	1.803	273.400
LIX	103	2	23	3	1	2	3	3	3	261.708	57.165	2.315	291.200
LX	102	3	24	3	1	3	2	3	3	271.984	34.873	1.906	292.700
LXI	101	2	23	3	1	2	3	2	3	260.864	25.539	1.969	289.300
LXII	98	3	31	5	1	2	4	3	2	250.813	37.339	1.650	271.100
LXIII	104	2	30	4	1	2	4	2	3	254.633	37.212	1.788	275.300
LXIV	102	1	24	5	2	3	2	3	3	286.050	31.988	2.076	310.900
LXV	104	2	23	2	2	4	3	3	2	258.005	35.287	1.664	276.800
LXVI	102	1	35	5	1	1	2	3	4	271.500	31.661	1.813	291.300
LXVII	101	3	31	3	2	4	3	2	2	247.247	35.480	1.661	264.400
LXVIII	99	1	30	4	2	3	4	3	3	254.331	32.747	1.813	275.900
LXIX	103	3	22	2	1	3	2	3	3	278.483	29.535	2.077	306.200
LXX	101	2	32	2	2	3	4	3	2	248.303	28.417	1.622	270.500
LXXI	104	1	30	4	1	3	4	3	3	252.337	27.362	1.841	275.700
LXXII	102	3	33	2	2	3	2	2	3	278.007	35.371	2.105	301.600
LXXIII	101	1	31	2	1	3	3	3	2	248.664	29.035	2.020	273.100
LXXIV	102	3	33	2	2	2	2	3	4	270.856	31.708	2.021	297.700
LXXV	102	3	24	5	1	1	2	3	4	273.810	29.167	2.047	301.600
LXXVI	101	1	31	2	2	4	4	3	2	236.667	42.723	1.252	237.500
LXXVII	102	3	31	5	1	4	3	2	2	246.664	30.541	1.471	267.000

Caracterización de los 120 operadores en los factores a considerar en el modelo de Confiabilidad Humana (4 de 5)

No.	Inteligencia	Personalidad	Edad	Experiencia	Género	Formación	Motivación	Memoria	Estrés	Media	Desviación Estándar	Parámetro de Forma	Parámetro de Escala
LXXVIII	102	2	24	2	1	3	2	3	3	277.255	39.704	1.623	294.600
LXXIX	103	3	30	3	2	3	2	3	3	281.661	43.932	1.569	294.100
LXXX	104	1	23	3	2	2	3	2	4	262.580	37.654	1.347	278.900
LXXXI	101	2	30	2	1	4	3	3	2	251.231	30.865	1.472	263.800
LXXXII	99	2	23	3	2	2	3	3	3	262.788	41.689	1.849	287.300
LXXXIII	102	3	27	2	1	3	3	2	4	260.010	51.679	1.579	269.200
LXXXIV	99	1	36	5	1	4	3	2	3	254.773	43.813	1.455	246.900
LXXXV	102	2	30	2	1	3	2	2	3	277.416	49.069	1.532	292.000
LXXXVI	103	3	24	2	1	2	3	3	3	262.275	35.173	1.701	282.800
LXXXVII	103	1	29	2	2	2	2	3	4	285.308	29.770	1.923	309.300
LXXXVIII	99	2	32	4	2	2	2	2	4	295.245	30.402	1.955	318.700
LXXXIX	102	1	24	2	1	3	4	3	3	251.811	27.458	1.798	282.200
XC	102	3	25	4	1	2	2	1	4	303.784	35.875	1.960	226.000
XCI	103	3	21	2	1	3	2	2	3	271.694	42.754	1.595	288.100
XCII	101	2	27	3	2	1	2	3	4	276.377	40.361	1.720	301.900
XCIII	102	2	23	2	1	3	2	1	4	299.059	41.682	1.887	318.500
XCIV	103	1	24	1	2	2	2	1	4	289.874	37.032	1.675	303.200
XCV	103	3	33	4	2	2	3	3	3	265.127	43.661	1.465	277.100
XCVI	101	1	31	4	1	3	3	2	3	289.397	33.581	1.921	321.600
XCVII	104	2	24	2	2	2	2	2	4	284.063	36.246	1.994	316.800
XCVIII	102	2	23	2	1	3	2	3	3	279.488	43.004	1.763	296.500
XCIX	99	2	25	3	1	3	4	3	3	256.021	46.747	1.571	267.700
C	102	3	22	2	2	3	4	3	4	255.550	31.866	1.834	285.500
CI	102	3	33	4	2	3	2	3	3	278.852	43.968	2.015	299.000
CII	103	1	27	4	1	3	2	2	3	284.867	32.459	1.937	308.300
CIII	99	2	24	2	2	2	2	1	4	305.662	30.633	2.171	332.100

Caracterización de los 120 operadores en los factores a considerar en el modelo de Confiabilidad Humana (5 de 5)

No.	Inteligencia	Personalidad	Edad	Experiencia	Género	Formación	Motivación	Memoria	Estrés	Media	Desviación Estándar	Parámetro de Forma	Parámetro de Escala
CIV	102	1	21	2	1	3	2	1	3	289.429	40.534	1.773	306.600
CV	104	3	32	4	1	3	2	3	4	280.337	30.786	1.874	303.300
CVI	101	1	28	3	1	3	3	2	4	288.738	45.665	1.685	303.100
CVII	103	2	23	2	1	2	2	2	4	290.699	37.433	1.751	306.700
CVIII	103	2	22	3	1	3	2	3	3	279.188	53.643	1.438	283.400
CIX	102	1	23	2	1	2	3	3	3	262.049	43.690	1.395	270.200
CX	101	3	36	4	2	2	2	1	4	308.843	56.702	1.663	317.300
CXI	96	2	24	2	2	2	2	1	5	312.517	32.807	1.936	333.500
CXII	103	1	31	4	1	4	3	2	2	246.841	32.523	1.277	258.300
CXIII	101	3	37	5	1	2	3	4	2	229.258	49.870	1.153	229.000
CXIV	105	2	24	2	1	3	2	3	3	279.798	64.876	1.305	281.600
CXV	101	3	22	2	2	3	3	2	2	244.212	46.321	1.270	252.800
CXVI	101	3	33	4	2	4	3	3	2	243.871	38.545	1.182	252.800
CXVII	102	1	21	3	1	3	4	3	2	219.576	43.530	1.171	221.400
CXVIII	103	2	25	2	1	2	2	3	3	263.861	46.684	1.172	263.000
CXIX	101	3	35	4	1	4	3	2	2	241.564	42.370	1.117	241.400
CXX	99	2	25	3	2	3	4	3	1	207.823	44.965	1.027	208.000

8.4 Anexo 4

Datos para validar el modelo de Confiabilidad Humana

Trabajador	Factores									
	Inteligencia	Personalidad	Edad	Experiencia	Género	Formación	Motivación	Memoria	Estrés	Media
I-V	102	3	26	3	2	3	3	2	3	268
II-V	101	1	26	3	1	1	3	3	3	266
III-V	102	3	30	3	1	3	3	3	3	253
IV-V	99	1	27	3	2	2	3	3	2	254
V-V	102	2	29	3	1	3	3	3	2	262
VI-V	101	1	30	3	2	1	3	2	3	267
VII-V	101	2	28	3	1	2	3	2	3	266
VIII-V	101	2	26	3	1	3	3	3	3	261
IX-V	102	1	27	3	1	2	3	3	3	260
X-V	102	3	27	3	2	3	3	2	3	250
XI-V	101	3	27	3	1	2	3	3	2	249
XII-V	102	3	19	3	1	2	3	3	3	253
XIII-X	101	2	27	3	1	3	3	3	3	263
XIV-V	101	1	30	3	2	1	3	3	3	264
XV-V	99	3	29	4	2	2	3	2	3	262
XVI-V	101	3	26	3	1	3	3	2	3	253
XVII-V	102	2	26	3	1	3	3	2	3	264
XVIII-V	102	2	29	3	1	2	3	3	3	259
XIX-V	101	1	27	2	2	3	3	3	2	253
XX-V	102	1	30	3	1	1	3	3	3	268
XXI-V	101	2	27	1	2	3	3	2	3	263
XXII-V	102	1	27	3	2	3	3	3	3	257
XXIII-V	101	2	30	3	1	2	3	3	3	259
XXIV-V	102	1	26	2	2	1	3	3	3	265
XXV-V	103	3	27	3	2	3	3	2	3	267
XXVI-V	101	2	22	2	1	3	3	3	3	262
XXVII-V	102	3	24	3	2	3	3	3	3	261
XXVIII-V	102	2	28	1	1	3	3	3	3	263
XXIX-V	101	1	27	3	1	2	3	2	2	261
XXX-V	102	2	21	3	2	3	3	3	3	256