



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONÓMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS
POTENCIALES (AMEF) PARA LA MEJORA DE LA
CALIDAD EN ORGANIZACIONES DE SERVICIO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS
SISTEMAS DE CALIDAD**

PRESENTA:

ING. HELMUT ODIN REYES ROMERO

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. GERARDO ANTONIO RUIZ BOTELLO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A Dios y a mí Familia, con especial agradecimiento y
cariño a Layla y Fredy*

Agradecimientos

Al M.I. Gerardo Ruiz Botello por su enseñanza, apoyo, paciencia, consejo, dirección y motivación en la realización de esta tesis. Querido profesor siempre estaré agradecido con usted por todo esto.

A mis profesores del Posgrado por sus conocimientos y al empeño que realizan en ayudarnos y motivarnos.

A mis sinodales por la revisión de este trabajo de investigación y por sus comentarios acertados para mejorarlo.

A mi familia por animarme y motivarme en todo momento.

A grupo Olimex por todas las facilidades otorgadas para la realización de la tesis.

A mis compañeros del Posgrado por los magníficos momentos que pasamos juntos.

A mi Universidad que me ha dado en todo momento su abrigo y me concedió la oportunidad de desarrollarme como un mejor ser humano. ¡Arriba el orgullo puma!

INDICE

Introducción	1
CAPITULO I Marco Teórico	3
1.1 Definiciones Generales	3
1.1.1 Confiabilidad	3
1.1.2 Falla	3
1.1.3 Defecto	3
1.1.4 Error	3
1.1.5 Modo de Falla	3
1.1.6 Severidad	4
1.1.7 Ocurrencia	4
1.1.8 Detección	4
1.2 Antecedentes del AMEF	4
1.2.1 Breve Historia del AMEF	4
1.2.2 Que es el AMEF	5
1.2.3 Estructura del AMEF	5
1.2.4 Calculo del RPN	6
1.3 Marco Teórico de la Severidad	7
1.3.1 Categorías para Modos de Falla	7
1.3.2 Categorías para Modos de Falla Dependientes	8
1.3.3 Categorías para Modos de Fallas de Sistemas de Seguridad Instrumentada	10
1.4 Marco Teórico de la Ocurrencia	12
1.4.1 Variable de Estado	12
1.4.2 Tiempo de Falla	12
1.4.3 Función de Confiabilidad	13
1.4.4 Función de Índice de Falla	14
1.4.5 Distribución Exponencial	17
1.4.6 Distribución Gamma	18
1.4.7 Distribución Weibull	20
1.4.8 Distribución Normal	21
1.4.9 Distribución Lognormal	23
1.4.10 Teorema de Bayes	24
1.4.10.1 Derivación de Probabilidades Condicionales	25
1.4.10.2 Formas alternativas del teorema de Bayes	26
1.4.10.3 El teorema de Bayes en términos de probabilidades y del cociente de probabilidad	26
1.4.10.4 El teorema de Bayes para las densidades de probabilidad	27
1.5 Marco Teórico de la Detección	28
1.5.1 Análisis Funcional	28
1.5.2 Identificación de los Modos de Falla	28
1.5.3 Causas de Fallas y Efectos de Falla	28
1.5.4 Causas de Fallas, Mecanismos y Causa Raíz	29
1.5.5 Efectos de Falla	30
1.5.6 Análisis de Causa Raíz	30
1.6 Toma de Decisiones y Ponderación	33

1.6.1 Evaluando Decisiones y El Proceso de Toma de Decisiones	33
1.6.2 Toma Subjetiva de Decisiones VS Toma Objetiva de Decisiones	34
1.6.3 Toma Científica de Decisiones	34
1.6.4 Método Monte-Carlo	35
1.6.5 Método Multicriteria Promethee-Gaia	36
1.7 Estado del Arte: El AMEF y otras Técnicas para la Calidad	37
1.7.1 Sistemas a Prueba de Errores (Poka-Yoke)	37
1.7.2 Análisis de Barreras de Control	39
1.7.3 Diagrama Factor Evento-Causa	40
1.7.4 Análisis de Árbol de Fallas	42
1.7.4.1 Reglas Generales de Construcción del Análisis de Árbol de Fallas	43
1.7.5 Árbol de Variables Críticas de Calidad (CTQ's)	47
1.7.6 Diagrama de Flujo de Proceso	48
1.7.7 Croquis, Planos y Esquemas	48
1.7.8 Matriz Causa-Efecto	48
1.7.9 Diagrama Causa-Efecto	49
1.7.10 Plan de Control	49
1.7.11 Despliegue de la Función de Calidad	49
1.7.12 Estudio de Capacidad de Proceso	50
1.7.13 Prueba de Hipótesis	51
1.7.14 Diseño de Experimentos	52
Bibliografía Capítulo I	54

CAPITULO II Problemática y Metodología 56

2.1 Problemática	56
2.2 Objetivos	56
2.2.1 Objetivo General	56
2.2.2 Objetivos Específicos	56
2.3 Hipótesis	56
2.4 Justificación	56
2.4.1 Introducción al Sector de Servicios	57
2.4.1.1 Factores de Éxito para las Organizaciones de Servicio	59
2.4.2 Porqué el AMEF	63
2.4.2.1 La Importancia de la Prevención en los Sistemas de Calidad	64
2.4.2.2 Desarrollo de la Prevención en los Servicios	65
2.4.2.3 Debilidades de las Herramientas de Prevención en los Servicios	66
2.4.3 Porqué el AMEF en los Servicios	67
2.5 Metodología	69
2.5.1 Análisis del marco teórico de la Severidad	69
2.5.2 Análisis del marco teórico de la Ocurrencia	73
2.5.2.1 Ocurrencia de falla no dependiente del tiempo	74
2.5.2.2 Ocurrencia de falla dependiente del tiempo	77
2.5.2.3 Ocurrencia de Fallas Condicional: El Teorema de Bayes	89
2.5.3 Análisis del Marco Teórico de la Detección	90
2.5.4 Simulación Estadística (Método de Montecarlo) y el AMEF	98
Bibliografía Capítulo II	101

CAPITULO III Resultados	102
3.1 Aplicación de AMEF	102
3.1.1 Ponderación de la Severidad en dos casos reales en una organización de Servicio	102
3.1.1.1 Ponderación de la severidad en caso 1	102
3.1.1.2 Ponderación de la severidad en caso 2	102
3.1.2 Ponderación de la Ocurrencia en dos casos reales en una organización de Servicio	103
3.1.2.1 Ponderación de la Ocurrencia en caso 1	103
3.1.2.2 Ponderación de la Ocurrencia en caso 2	104
3.1.3 Ponderación de la Detección en dos casos reales en una organización de Servicio	106
3.1.3.1 Ponderación de la Detección en caso 1	106
3.1.3.2 Ponderación de la Detección en caso 2	106
3.1.4 Diagrama de Flujo de dos casos reales en una organización de servicio	106
3.1.4.1 Diagrama de Flujo caso1	106
3.1.4.2 Diagrama de Flujo caso 2	107
3.1.5 Árbol de Variables Críticas de Calidad (CTQ's) de dos casos reales en una organización de servicio	107
3.1.5.1 Árbol de Variables Críticas de Calidad de caso 1	108
3.1.5.2 Árbol de Variables Críticas de Calidad de caso 2	108
3.1.6 Matriz Causa-Efecto de Diagrama de Flujo de dos casos reales en una Organización de Servicios	109
3.1.6.1 Matriz Causa-Efecto de Diagrama de Flujo de caso 1	110
3.1.6.2 Matriz Causa-Efecto de Diagrama de Flujo de caso 2	111
3.1.7 Diagrama Causa-Efecto de dos casos reales en una organización de servicio	112
3.1.7.1 Diagrama Causa-Efecto de caso 1	112
3.1.7.2 Diagrama Causa-Efecto de caso 2	113
3.1.8 Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto de dos casos reales en una organización de servicio	113
3.1.8.1 Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto de caso 1	114
3.1.8.2 Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto de caso 2	115
3.1.9 Aplicación Final de AMEF en dos casos reales en una organización de servicio	116
3.1.9.1 Aplicación Final de AMEF en caso 1	117
3.1.9.2 Aplicación Final de AMEF en caso 2	119
3.2 Resultados de la Aplicación de AMEF	121
3.2.1 Presentación de resultados antes y después de la aplicación de AMEF en caso 1	121
3.2.2 Presentación de resultados antes y después de la aplicación de AMEF en caso 1	123
3.2.3 Discusión de Resultados	126
3.2.3.1 Discusión de Resultados para caso 1	126
3.2.3.1.1 Resumen de Resultados caso 1	127
3.2.3.2 Discusión de Resultados para caso 2	127
3.2.3.2.1 Resumen de Resultados caso 2	128
3.3 Recomendaciones y Sugerencias	128

Bibliografía Capítulo III	132
---------------------------------	-----

CAPITULO IV Conclusiones	133
---------------------------------------	------------

FIGURAS

Figura 1.1 Estructura del AMEF	5
Figura 1.2 Variable de Estado de un Artículo No Reparable	12
Figura 1.3 Función de Confiabilidad	13
Figura 1.4 Histograma de Z(i)	16
Figura 1.5 Curva de la bañera Z(t) si $\Delta t \rightarrow 0$	17
Figura 1.6 Función de Confiabilidad Exponencial	18
Figura 1.7 Función Índice de Falla Exponencial	18
Figura 1.8 Función de confiabilidad Gamma	19
Figura 1.9 Función Índice de Falla Gamma	20
Figura 1.10 Función Índice de Falla Weibull	21
Figura 1.11 Función Índice de Falla Normal	22
Figura 1.12 Función Índice de Falla Lognormal	24
Figura 2.1 Resultados de Minitab del ANOVA de sensibilidad entre las escalas Aeroespacial y Automotriz	71
Figura 2.2 Resultados de Minitab de la Regresión Lineal entre Número de Fallas y Número de Horas en Servicio Automotriz	76
Figura 2.3 Resultados de Minitab de Regresión Lineal entre Fallas por hora y Número de Medición en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana	83
Figura 2.4 Resultados de Minitab de identificación de distribuciones para Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana	84
Figura 2.5 Gráfico 1 de Probabilidad de Minitab para Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana	84
Figura 2.6 Gráfico 2 de Probabilidad de Minitab para Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana	85
Figura 2.7 Gráfico 3 de Probabilidad de Minitab para Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana	85
Figura 2.8 Algoritmo para Calcular Ocurrencia de Fallas Dependientes o No Dependientes del Tiempo	88
Figura 2.9 Gráfico de Pareto de Minitab del Diseño Experimental de 5 factores con 2 niveles de Conceptos de Detección	92
Figura 2.10 Tabla de ANOVA de Minitab del Diseño Experimental de 5 factores con 2 niveles de Conceptos de Detección	92
Figura 2.11 Tabla Multicriteria de Conceptos de Detección	93
Figura 2.12 Gráfico Promethe II de Decision Lab de Método Multicriteria de Conceptos de Detección	94
Figura 2.13 Gráfico de Barras de Peso de Decision Lab de Método Multicriteria con 70% a la Detección 1	94
Figura 2.14 Gráfico GAIA de Decision Lab de Método Multicriteria de Conceptos de Detección	95
Figura 2.15 Gráfico de Barras de Peso de Decision Lab de Método Multicriteria con 70% a la Detección	95

Figura 2.16	Gráfico de Barras de Peso de Decision Lab de Método Multicriteria con 70% a la Detección 3	95
Figura 2.17	Gráfico de Barras de Peso de Decision Lab de Método Multicriteria con 70% a la Detección	96
Figura 2.18	Resultados de Crystall Ball a la Simulación Monte Carlo para identificar tipo de distribución del Número de Prioridad de Riesgo de los AMEFs aplicados a una Organización de Servicio	99
Figura 3.1	Resultados de Minitab de Regresión Logística para prueba de hipótesis entre No. de Falla y No. de Mes (Caso 1: Incremento de Ventas)	104
Figura 3.2	Resultados de Minitab de Prueba de Xi cuadrada para prueba de hipótesis entre No. de Falla y No. de Mes (Caso 2: Reducción de Inventario Obsoleto)	106
Figura 3.3	Diagrama de Flujo de Proceso para Caso 1 (Incremento de Ventas)	106
Figura 3.4	Diagrama de Flujo de Proceso para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	107
Figura 3.5	Árbol de Variables Críticas de Calidad para Caso 1 (Incremento de Ventas)	108
Figura 3.6	Árbol de Variables Críticas de Calidad para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	108
Figura 3.7	Matriz Causa-Efecto de Diagrama de Flujo Caso 1 (Incremento de Ventas)	110
Figura 3.8	Matriz Causa-Efecto de Diagrama de Flujo Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	111
Figura 3.9	Diagrama Causa-Efecto de Caso 1 (Incremento de Ventas)	112
Figura 3.10	Diagrama Causa-Efecto de Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	113
Figura 3.11	Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto para Caso 1 (Incremento de Ventas)	114
Figura 3.12	Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	115
Figura 3.13	1ra parte de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)	117
Figura 3.14	2da parte de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)	118
Figura 3.15	1ra parte de AMEF para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	119
Figura 3.16	2da parte de AMEF para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	120
Figura 3.17	Análisis de Capacidad de Proceso con Minitab antes de la aplicación de AMEF para Caso 1	122
Figura 3.18	Análisis de Capacidad de Proceso con Minitab después de la aplicación de AMEF para Caso 1	122
Figura 3.19	Grafico de Control Comparativo con Minitab entre los Resultados antes y después de la aplicación para caso 1 (Incremento de Ventas)	123
Figura 3.20	Análisis de Capacidad de Proceso de Minitab antes de la aplicación de AMEF para caso 2	124
Figura 3.21	Análisis de Capacidad de Proceso de Minitab después de la aplicación de AMEF para caso 2	125
Figura 3.22	Grafico de Control Comparativo de Minitab entre los Resultados antes y después de la aplicación de AMEF para caso 2	125

TABLAS

Tabla 1.1	Elementos de una Diagrama Factor Evento-Causa	41
Tabla 1.2	Elementos de un Árbol de Fallas	46

Tabla 1.3 Elementos de una Árbol de Fallas	47
Tabla 2.1 Ponderación Aeroespacial de la Severidad	69
Tabla 2.2 Ponderación Automotriz de la Severidad	69
Tabla 2.3 Ponderación de la Severidad por Tipo de Falla	70
Tabla 2.4 Ponderación de la Severidad de los Servicios con escala de 1 a 4	72
Tabla 2.5 Ponderación de la Severidad para los Servicios con escala de 1 a 10	72
Tabla 2.6 Ponderación Aeroespacial de la Ocurrencia	73
Tabla 2.7 Ponderación Automotriz de la Ocurrencia	73
Tabla 2.8 Ponderación de la Ocurrencia a partir del valor de DPO con escala de 1 a 4	74
Tabla 2.9 Ponderación de Ocurrencia a partir de valor de DPO con escala de 1 a 10	75
Tabla 2.10 Número de Fallas vs Número de Horas, en el mes de enero en un concesionario automotriz	75
Tabla 2.11 Ponderación Estricta de Ocurrencia a partir del valor de DPO con escala de 1 a 10	77
Tabla 2.12 Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Exponencial	78
Tabla 2.13 Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Gamma	79
Tabla 2.14 Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Weibull	79
Tabla 2.15 Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Normal	80
Tabla 2.16 Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Lognormal	80
Tabla 2.17 Tasa de Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana	82
Tabla 2.18 Tasa de Falla por hora calculada de acuerdo a una distribución Weibull con valor de forma=1.107 y un valor de escala de=0.84099 para Acometida de Servicio en Zona Metropolitana	86
Tabla 2.19 Ponderación de Ocurrencia de acuerdo al tipo de distribución de tasa de falla por hora con escala de 1 a 4	87
Tabla 2.20 Ponderación de Ocurrencia de acuerdo al tipo de distribución de tasa de falla por hora con escala de 1 a 10	87
Tabla 2.21 Ponderación de Conceptos de Detección en nivel bajo y alto según escala de 1 a 10	91
Tabla 2.22 Corridas Aleatorias de un Diseño Experimental de 5 factores y 2 niveles	91
Tabla 2.23 Escala de Relación (Ponderación) para Método Multicriteria Promethe-Gaia de Conceptos de Detección	93
Tabla 2.24 Ponderación de la Detección con escala de 1 a 10 de acuerdo al Método Multicriteria Promethe-GAIA de Conceptos de Detección	96
Tabla 2.25 Ponderación de la Detección con escala de 1 a 4 de acuerdo al Método Multicriteria Promethe-GAIA de Conceptos de Detección	98
Tabla 3.1 Tabla de Ocurrencia de Falla de Incremento de Ventas (Caso 1)	103
Tabla 3.2 Tabla de Ocurrencia de Falla de Reducción de Inventario Obsoleto (Caso 2)	105
Tabla 3.3 Tabla de Resumen de Ocurrencia de Falla de Reducción de Inventario Obsoleto (Caso 2)	105
Tabla 3.4 Resultados antes de la aplicación de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)	121
Tabla 3.5 Resultados después de la aplicación de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)	121
Tabla 3.6 Resultados antes de la aplicación de AMEF para caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	123

Tabla 3.7 Resultados después de la aplicación de AMEF para caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	124
Tabla 3.8 Resumen de Resultados antes y después de la aplicación de AMEF para caso 1 (Incremento de Ventas)	127
Tabla 3.9 Resumen de Resultados antes y después de la aplicación de AMEF para caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)	128
APENDICES	136
Apéndice A Ejemplo de Sistema Poka-Yoke de placas en proceso de soldadura	137
Apéndice B Análisis de Barreras de Control para un ejemplo de mal posicionamiento de interruptor	138
Apéndice C Diagrama Factor Evento-Causa para un ejemplo de mal posicionamiento de interruptor	139
Apéndice D Ejemplo de Árbol de Fallas para fuga de agua de una llave de agua	140
Apéndice E Ejemplo de Croquis de Proceso (Mapa de Valor Agregado) del proceso de Ventas de Autos Nuevos	141
Apéndice F Ejemplo de un Formato de Plan de Control	142
Apéndice G Ejemplo de una Casa de la Calidad (QFD) para el diseño de libros de texto	143
Apéndice H Estadístico de prueba o herramienta estadística a utilizar para el tipo de dato (discreto o continuo) de la variable de entrada(x) y de la variable de salida ($y=f(x)$)	144
Apéndice I Análisis de prueba de hipótesis en el caso en que “x” (variable de entrada) sea discreto y “y” (variable de salida) sea continuo	145
Apéndice J Modelo de Operación de Negocio para compañías orientadas a la manufactura.	146
Apéndice K Modelo de Operación de Negocio para muchas Compañías de Servicio. . .	147
Apéndice L Algunos tipos de Servicios con sus respectivas características	148
Apéndice M Como la Calidad de Servicio afecta el Valor del Cliente y el Costo Total.	149
Apéndice N Relación entre Diseño del Servicio y Servicio de Entrega.	150

Introducción

El Análisis de Modo y Efecto de Fallas Potenciales (AMEF) es una herramienta que surgió con fines militares y espaciales en E.U.A en la década de los 60's. Dicha herramienta fue adoptada con el paso del tiempo en otro tipo de sectores como: el automotriz, el aeronáutico, el naval y el de manufactura en general.

El AMEF es un plan de mejora que se desarrolla a partir de la selección de las fallas más críticas (de un producto o proceso) de acuerdo a su grado de severidad, ocurrencia y detección, posteriormente se calcula el número de prioridad de riesgo (NPR) que precisamente es la multiplicación simultánea de la severidad, la ocurrencia y la detección.

Con el número de prioridad de riesgo (NPR) el AMEF selecciona las acciones de mejora más importantes que ayudarán a solucionar o mitigar un problema en específico. El AMEF en los sistemas de manufactura está orientado hacia la prevención de fallas en el diseño de un producto ó hacia la prevención de fallas originadas en los propios procesos de manufactura de un producto.

El AMEF ha sido una herramienta de prevención que ha sido probada en las organizaciones de manufactura y que contribuyó a solucionar un sinnúmero de problemas asociados a la calidad de un producto en las pasadas cuatro décadas.

En la pasada década (de los 90's) hubo un auge en adopción de sistemas de calidad en organizaciones de servicio como hospitales, bancos, aseguradoras, servicios de telecomunicación, servicios energéticos, comercializadoras y servicios gubernamentales entre otros muchos. Sin embargo hoy en día la aplicación del AMEF sigue siendo desconocida en estas organizaciones y en muchas otras organizaciones de servicio en México. Sin duda la adopción de la metodología seis sigma en las empresas de servicio en México ha permitido conocer el AMEF, sin embargo tampoco son muchas organizaciones de servicio las que han adoptado dicha metodología.

Incluso las normas y libros de texto que tratan acerca del AMEF, no profundizan a detalle en alguno de los tres aspectos generales (que se listan a continuación) para poder implementar un AMEF en una organización de servicio, estos son:

- a) No sustenta la escala de ponderación que debe utilizarse para calificar en una falla la severidad, la ocurrencia y la detección.
- b) Omite el hecho de que la ocurrencia de una falla puede ser afectada por la variable tiempo o por alguna otra variable externa a la ocurrencia.
- c) No sustenta en qué momento y cómo se debe redefinir el número de prioridad de riesgo del AMEF.

Estas tres incógnitas nos llevan a proponer como hipótesis que: “Sobre la base de un sustento teórico y probabilístico que permitan la ponderación de los tres parámetros del AMEF, -severidad, ocurrencia y detección-, es posible establecer criterios particulares para aplicar dichos parámetros en el sector de los servicios”.

En el Capítulo I, se expone el Marco Teórico sobre el cual se basa el trabajo de investigación. En este se presentan las definiciones generales y términos que se usan a lo largo del trabajo de tesis, los antecedentes del AMEF, el marco teórico de la severidad, el marco teórico de la ocurrencia, el marco teórico de la detección, la toma de decisiones y ponderación, y por último la relación del AMEF con otras técnicas para la calidad. El Marco Teórico expuesto en el Capítulo I pretende plasmar los conceptos, las teorías y las herramientas de las cuales hará uso el trabajo de investigación para resolver las implicaciones y consideraciones que se deben tomar en cuenta para que un AMEF pueda ser implementado en una organización de servicio. Así mismo, servirá para demostrar mediante la aplicación del AMEF a problemas reales de una organización de servicio, su efectividad como herramienta de mejora y prevención.

La primera parte del Capítulo II expone el comportamiento de las organizaciones de servicio y lo liga con la importancia que tiene el AMEF como una herramienta para coadyuvar a los factores de éxito en esas organizaciones. Así mismo, permite justificar al AMEF como una herramienta de uso preventivo y de análisis de riesgos potenciales en los servicios.

La segunda parte del Capítulo II expone la metodología que fue desarrollada, para encontrar la aplicación de los conceptos revisados en el marco teórico (Capítulo I) dentro de la implementación del AMEF en los servicios. Así mismo, sirve para resolver las tres interrogantes mencionadas anteriormente (incisos a,b,c).

En el Capítulo III se expone el procedimiento para implementar un AMEF según las herramientas de la metodología seis sigma; también se discuten los resultados que se obtuvieron con la implementación del AMEF en dos casos reales de un concesionario automotriz. De esta forma, el Capítulo III sirve para respaldar con la solución de dos problemas las suposiciones planteadas en el Capítulo II.

El Capítulo IV expone las conclusiones a que se llegó con el desarrollo del trabajo de investigación expuesto en los Capítulos I, II y III.

Por último habrá que señalar que el trabajo de investigación pretende solucionar los cuestionamientos que surgen para poder implementar un AMEF en una organización de servicio, así mismo pretende dar una justificación de las bondades que tiene el AMEF mediante la aplicación de herramientas de calidad relacionadas con él en ejemplos reales de organizaciones de servicio.

Capítulo I

Marco Teórico

1.1 Definiciones Generales

1.1.1 Confiabilidad

La Confiabilidad está definida en la ANSI/ASQC estándar A3-1978^[1] como “la habilidad de un artículo para desempeñar una función requerida bajo condiciones establecidas por un período determinado de tiempo”. Otra definición es la que usa la ISO 8402^[2] en la cual la confiabilidad se define como “la habilidad de un artículo para desempeñar una función requerida, bajo un ambiente dado y condiciones de operación, por un período de tiempo establecido”. Otra definición de confiabilidad se da en la BS 4778^[3], en ésta se define la confiabilidad como “la habilidad de un artículo para desempeñar una función requerida en un instante establecido de tiempo o en un período establecido de tiempo”.

1.1.2 Falla

De acuerdo con la IEC50(191)^[4] la falla es el evento cuando una función requerida es terminada (excediendo los límites aceptables).

1.1.3 Defecto

El defecto^[4] es “el estado de un artículo caracterizado por la inhabilidad de desempeñar una función requerida, excluyendo la inhabilidad durante el mantenimiento preventivo u otras acciones planeadas, o debido a la carencia de recursos externos”. De aquí que un defecto es un estado resultante de una falla.

1.1.4 Error

De acuerdo a la IEC50(191)^[4] un error es “una discrepancia entre un valor ó condición computado, observado o medido y el valor o condición verdadero, especificado o teóricamente correcto. Un error no es (aún) una falla ya que está dentro de los límites aceptables o de la desviación del desempeño deseado (valor objetivo). Un error es a veces referido como una falla incipiente.

1.1.5 Modo de Falla

Un modo de una falla^[5] es una descripción de un defecto, esto es, como se puede observar el defecto. El modo del defecto debe ser por esa razón un término más apropiado. La IEC50(191)^[4] recomienda usar el término modo del defecto, sin

embargo el término modo de falla es tan ampliamente usado que esto puede causar confusión.

1.1.6 Severidad

Se define^[6] como la seriedad que provocan los efectos o consecuencias de un modo de falla, las consecuencias pueden ser determinadas por su grado de perjuicio, daño de propiedad o daño del sistema que finalmente pudo ocurrir, la severidad siempre se considerara como la peor consecuencia potencial de una falla.

1.1.7 Ocurrencia

Se define^[6] como la frecuencia de un modo de falla.

1.1.8 Detección

Es la habilidad^[6] de identificar o descubrir un modo de falla.

1.2 Antecedentes del AMEF

1.2.1 Breve Historia del AMEF

El Análisis de Modos y Efectos de Fallas potenciales , AMEF (FMEA por sus siglas en inglés) fue desarrollado en el ejército de los Estados Unidos y era conocido como el procedimiento militar MIL-P-1629, titulado "Procedimiento para la Ejecución de Efectos y Modos de Falla, y Análisis de Fallas Críticas"^[7], fue elaborado por primera vez el 9 de noviembre de 1949. El AMEF fue desarrollado originalmente para clasificar fallas de acuerdo a su impacto para el éxito de las misiones y la seguridad del equipo y personal. El AMEF también fue adoptado en la NASA (National and Aeronautics and Space Administration) y tuvo aplicaciones en las misiones espaciales que tuvieron lugar en la década de los años sesenta. A principios de la década de los años ochenta, las empresas automotrices adoptaron el AMEF en sus procesos de desarrollo de productos^[7]. La empresa Ford lo utilizó para detectar fallas en el modelo de auto "Pinto". Así mismo, a finales de los ochenta la norma de calidad para proveedores y fabricantes automotrices (QS 9000) adoptó el AMEF como uno de sus requerimientos para llevar a cabo la Planeación Avanzada de la Calidad de Producto (APQP por sus siglas en inglés).

En la actualidad la ISO 9004:2000 lo cita como una de las herramientas para efectuar acciones preventivas en su numeral 8.5.4. El AMEF ha ido trascendiendo a otros sectores distintos al de la manufactura de bienes de consumo, y su adopción hoy en día en otra clase de empresas es más amplia; el AMEF también es considerado una de las herramientas dentro del método Definir, Medir, Analizar Mejorar y Controlar (DMAIC por sus siglas en inglés) y como parte del Diseño para Seis Sigma (DFSS por sus siglas en inglés) de la exitosa metodología desarrollada en la compañía Motorola en la década de los 80's.

1.2.2 Qué es el AMEF

El AMEF es una técnica preventiva para identificar y minimizar el potencial de una falla, mediante el cual se describen un grupo de actividades sistemáticas independientes para: organizar y evaluar la falla potencial de un producto y/o proceso al igual que el efecto de la falla^[8]. El AMEF identifica acciones que pueden reducir o eliminar la ocurrencia de la falla potencial, por lo tanto el AMEF es un proceso sistemático para la identificación de las fallas potenciales (antes de que éstas ocurran) ya sea en el diseño de un producto o en el proceso de fabricación de un producto (también lo podría ser en el proceso de elaboración o de operación de un servicio). Los objetivos principales del AMEF son^[9]:

- a) Reconocer y evaluar los modos de fallas potenciales y las causas asociadas con el diseño y manufactura de un producto.
- b) Determinar los efectos de las fallas potenciales en el desempeño del sistema.
- c) Identificar las acciones que podrán eliminar o reducir la oportunidad de que ocurra la falla potencial.
- d) Analizar la confiabilidad del sistema.
- e) Documentar el proceso.

1.2.3 Estructura del AMEF



Fig.1.1 “Estructura del AMEF” tomada de [38]

La estructura del AMEF sigue las siguientes operaciones^[10]:

- a) Descripción de la etapa de proceso, parte o función (en caso de ser AMEF de diseño). En este punto se debe hacer uso primeramente de un diagrama de flujo o de un plano de explosión de partes para identificar cada una de las etapas de un proceso o cada una de las subpartes de un componente, respectivamente.

b) Describir los modos de falla, es decir identificar una situación potencial de una falla que se pueda presentar en la etapa actual del proceso o de la subparte que está siendo estudiada.

c) Describir el efecto de los modos de falla; en este paso se tiene que hacer un análisis minucioso de las situaciones que pueden ser provocadas a partir del modo de falla.

d) Seleccionar la ponderación de la severidad la cual califica la importancia o trascendencia del efecto del modo de falla; la severidad define cuándo una característica es crítica, como aquella de seguridad, por ejemplo, que pueda afectar la integridad de una persona o incumpla una normatividad gubernamental, o bien una característica de calidad que afecta la confiabilidad del producto de tal forma que tenga que ser retirado del mercado o completamente desechado.

e) Describir la causa de los modos de falla; en este paso es recomendable construir previamente un diagrama causa y efecto, y a partir del mismo identificar o proponer las causas que originan a los modos de falla.

f) Seleccionar la ponderación de la ocurrencia, la cual califica la frecuencia de la causa de falla.

g) Descripción de los medios de control actuales de prevención o detección de la causa de falla o del modo de falla.

h) Seleccionar la ponderación de la detección, la cual califica que tan eficientes son los medios de control para prevenir o detectar la causa del modo de falla o el modo de falla.

i) Calcular el Número de Prioridad y Riesgo (NPR), el cual es el producto de los valores otorgados (ponderados) de la ocurrencia, la severidad y la detección. (ver apartado 1.2.4).

j) Describir las acciones recomendadas que son las acciones que el equipo de mejora propone para valores de alta severidad y alto NPR. Estas acciones son encaminadas para controlar o eliminar los modos de falla. Adicionalmente se puede proponer a los responsables, la fecha de realización de las acciones recomendadas. Y nuevamente evaluar el valor de la severidad, ocurrencia, detección y NPR después de haber implementado las acciones recomendadas.

1.2.4 Cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR)

El número de prioridad de riesgo (NPR) es el producto matemático de la severidad, la ocurrencia y la detección, es decir:

$$\text{NPR} = \text{S} \cdot \text{O} \cdot \text{D}$$

Este valor se emplea para identificar los riesgos más serios que requieren acciones preventivas urgentes.

El valor del NPR indicará^[11]:

- | | |
|-------------------------------|----------|
| • ALTO RIESGO DE LA FALLA | 500-1000 |
| • MODERADO RIESGO DE LA FALLA | 125-433 |
| • BAJO RIESGO DE LA FALLA | 1-124 |
| • NULO RIESGO DE LA FALLA | 0 |

1.3 Marco Teórico de la Severidad

1.3.1 Categorías para Modos de Falla

Es importante darse cuenta que el modo de una falla es una manifestación de una falla mientras es vista desde afuera^[12], esto es, la terminación de una o más funciones.

Un esquema de clasificación para los modos de falla ha sido sugerido por Blanche y Shrivastava (1994)^[13]:

1. Fallas Intermitentes: Son fallas que resultan en una pérdida de algunas funciones sólo por un período muy corto de tiempo. El bloque funcional revertirá a éstas el estándar operacional completo inmediatamente después de la falla.
2. Fallas Extendidas: Son fallas que resultan en una pérdida de algunas funciones y que continuarán hasta que alguna parte del bloque funcional sea remplazado o reparado. Las fallas extendidas pueden ser divididas en:
 - (a) Fallas Completas: Fallas que causan pérdida completa de una función requerida.
 - (b) Fallas Parciales: Fallas que conducen a la pérdida de algunas funciones pero no causan una completa pérdida de la función requerida.

Las fallas completas y parciales pueden ser clasificadas en:

- (c) Fallas Repentinas: Fallas que no pudieron ser predichas por una primera prueba o reexaminación.
- (d) Fallas Graduales: Fallas que pudieron ser predichas por prueba o reexaminación. Una falla gradual representará una tendencia gradual de un rango de valores especificados de desempeño. El reconocimiento

de fallas graduales requiere comparación de dispositivos actuales de desempeño con una especificación de desempeño; en algunos casos podría ser una tarea difícil.

Las fallas extendidas son divididas dentro de cuatro categorías; a dos de éstas se les han dado nombres específicos:

- (a) Fallas Catastróficas: Una falla que es tanto repentina como completa.
- (b) Falla de Degradación: Una falla que es tanto parcial como gradual.

En algunas aplicaciones es también útil clasificar fallas como fallas primarias, fallas secundarias o defectos de comando (ver Henley y Kumamoto 1991^[14]):

- (a) Una falla primaria es una falla causada por envejecimiento natural de un bloque funcional. La falla primaria ocurre bajo condiciones previstas durante el diseño de un bloque funcional. Una reparación es necesaria para regresar al bloque funcional a su estado de funcionamiento.
- (b) Una falla secundaria es una falla causada por excesivo uso (esfuerzo) fuera de las consideraciones de diseño del bloque funcional. Tales usos excesivos pueden originarse de fuentes de energía térmica, mecánica, eléctrica, química, magnética o radioactiva. Los usos excesivos pueden ser causados por componentes cercanos, el ambiente, o por los operadores o personal de planta. Una reparación es necesaria para regresar el bloque funcional al estado de funcionamiento.
- (c) Defecto de Comando es una falla causada por una señal impropia de control o ruido. Una reparación es comúnmente no usada para regresar el bloque funcional a su estado de funcionamiento. El defecto de comando es a veces referido como falla transitoria.

1.3.2 Categorías para Modos de Fallas Dependientes

Cuando un sistema consta de varios componentes, éstos pueden fallar no necesariamente de manera independiente. Se debe hacer una distinción entre dos principales tipos de dependencia. Si la falla de un componente conduce a incrementar la tendencia para que falle otro componente, la dependencia se dice que es positiva. Por el otro lado, si la falla de un componente conduce a reducir la tendencia para que falle otro componente, la dependencia se dice que es negativa^[15].

En aplicaciones de confiabilidad, la dependencia positiva es generalmente el tipo más relevante de dependencia. La dependencia negativa puede sin embargo ocurrir en la práctica.

Las fallas dependientes pueden ser clasificadas en tres grupos principales:

1. Fallas de Causa Común: Un falla de causa común es, de acuerdo con NUREG/CR-6268^[16], “una falla dependiente en la cual dos o más componentes presentan un estado de defecto simultáneamente, o durante un intervalo corto de tiempo, y dichos defectos son el resultado de una causa compartida”. Una causa común de falla puede ser causada según^[16]:
 - a) Un diseño común o una deficiencia común de material; eso resulta en la falla múltiple de componentes para desempeñar una función o una falla múltiple que se opone a las condiciones de diseño.
 - b) Un error común de instalación, que resulta en múltiples desajustes de los componentes siendo funcionalmente inoperables.
 - c) Un mantenimiento erróneo común, que resulta en múltiples desajustes de los componentes siendo funcionalmente inoperables.
 - d) Un ambiente severo común, tal como la vibración, radiación, humedad o contaminación, lo que causa una falla múltiple de componentes.

El número de componentes que fallan debido a una causa común o raíz común es llamada como multiplicidad de fallas.

Cuando se establecen modelos para una causa común de falla en sistemas que consisten de varios componentes se debe distinguir cuidadosamente entre:

- e) Fallas simultaneas de preparación de componentes debido a causas comunes, que son explícitamente representadas en el modelo del sistema. Si tales dependencias son bien entendidas, éstas deben ser tratadas como componentes.
 - f) Fallas simultaneas de preparación de componentes debido a causas comunes, que no son explícitamente representadas en el modelo del sistema. Tales eventos son llamados a veces como “causas comunes residuales de falla”.
2. Fallas de Cascada: Las fallas de cascada son múltiples fallas iniciadas por la falla de un componente en el sistema, que resulta en una reacción en cadena o “efecto dominó”^[17]. Cuando varios componentes comparten una carga común, la falla de uno de los componentes puede conducir al incremento de la carga en el resto de los componentes y en consecuencia a incrementar la probabilidad de falla. Las fallas de cascada son especialmente frecuentes en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

Los componentes pueden también tener influencia de uno a otro por medio de un ambiente interno. Un mal funcionamiento de un componente puede, por ejemplo conducir a un ambiente de trabajo más hostil para otro componente, como el incremento

de la presión, la temperatura, la humedad, y otras. Las fallas de cascada son algunas veces llamadas fallas de propagación^[17].

3. Dependencias Negativas: Las dependencias negativas son fallas simples que reducen la probabilidad de fallas de otros componentes^[18]. Por ejemplo, un fusible eléctrico falla de tal forma que la corriente del circuito es desconectada, la carga sobre los dispositivos eléctricos es retirada y su probabilidad de falla es reducida. También cuando un sistema es apagado para ser reparado desde un componente específico; la carga de otro componente es por lo general removida y su probabilidad de falla es consecuentemente reducida durante el tiempo de reparación.

1.3.3 Categorías para Modos de Fallas de Sistemas de Seguridad Instrumentada

Un sistema de seguridad instrumentada (SSI) es una capa de protección independiente que es instalada para mitigar el riesgo asociado con la operación de un sistema específico peligroso, dicha capa de protección se atribuye como un equipo bajo control^[19]. Un sistema de seguridad instrumentada está compuesto de sensores, ordenadores lógicos y artículos de actuación. Algunos ejemplos de un sistema de seguridad instrumentada pueden ser los equipos de detección y alarmas contra incendios, o sustancias tóxicas, los equipos de paro en actividades peligrosas para los usuarios, los equipos contra paros por energía en actividades peligrosas, los sistemas automáticos de frenos en trenes, entre muchas otras aplicaciones.

Para los sistemas o subsistemas de seguridad instrumentada según la IEC61508^[20] se puede usar la siguiente clasificación de modos de falla:

1. Fallas Peligrosas. EL SSI no satisface las funciones requeridas de seguridad que le son demandadas. Estas fallas pueden dividirse en :
 - a) Peligrosas Indetectables: Fallas peligrosas que ocurren en la demanda de una activación preventiva; éstas sólo son reveladas por prueba o cuando la demanda ocurre. Las fallas peligrosas indetectables alguna vez son llamadas como fallas latentes.
 - b) Peligrosas Detectables: Son fallas peligrosas que son detectadas inmediatamente cuando éstas ocurren, por ejemplo de forma automática o en autoevaluaciones que realice el SSI. El período promedio de incapacidad debido a la falla peligrosa detectable, es el tiempo medio que transcurre desde que la falla es detectada hasta que la función es restaurada.
2. Fallas Seguras: EL SSI presenta una falla que no es peligrosa. Estas fallas pueden dividirse en:
 - a) Segura Indetectable: Son fallas no peligrosas que no son detectadas por autoevaluaciones del SSI.

- b) Segura Detectable: Son fallas no peligrosas que son detectadas por autoevaluaciones del SSI. En algunas configuraciones una detección temprana de las fallas puede prevenir un error del sistema.

Los modos de falla pueden ser también clasificados de acuerdo a la causa de la falla^[21] como:

1. Fallas Aleatorias de Hardware: Estas son fallas físicas dónde el servicio prestado se desvía del servicio especificado debido a la degradación física del artículo. Estas fallas pueden dividirse en:
 - a) Fallas de Envejecimiento: Estas son fallas que ocurren bajo condiciones de diseño. Las fallas de envejecimiento también son llamadas fallas primarias.
 - b) Fallas de Esfuerzo: Estas fallas ocurren debido a esfuerzos excesivos de un artículo. Los esfuerzos excesivos pueden ser provocados por causas externas o por errores humanos durante la operación y mantenimiento. Las fallas de esfuerzo también son llamadas fallas secundarias.
2. Fallas Sistemáticas: Estas son fallas no físicas dónde el servicio prestado se desvía del servicio especificado sin una degradación física del artículo. Las fallas sólo pueden ser eliminadas por una modificación de diseño, proceso de manufactura, procedimiento operacional, o documentación. Las fallas sistemáticas pueden dividirse en:
 - a) Fallas de Diseño: Estas fallas son iniciadas durante el diseño, la manufactura o la instalación y pueden estar latentes a partir del primer día de operación, algunos ejemplos incluyen: fallas de software, sensores que no discriminan entre demandas falsas o verdaderas, detectores de fuego y gas que son instalados en lugares inadecuados, etc.
 - b) Fallas de Interacción: Estas fallas son iniciadas por errores humanos durante la operación o las pruebas de mantenimiento.

1.4 Marco Teórico de la Ocurrencia

1.4.1 Variable de Estado

El estado de un artículo en un tiempo t puede ser descrito por una variable de estado^[22] $X(t)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ Si el artículo está funcionando en un tiempo } t \\ 2 \text{ } X(t)= 0 \text{ Si el artículo está en estado de falla en un tiempo } t \end{array} \right.$$

Las variables de estado de un artículo no reparable se ilustran en la figura 1.2 y será generalmente una variable aleatoria.

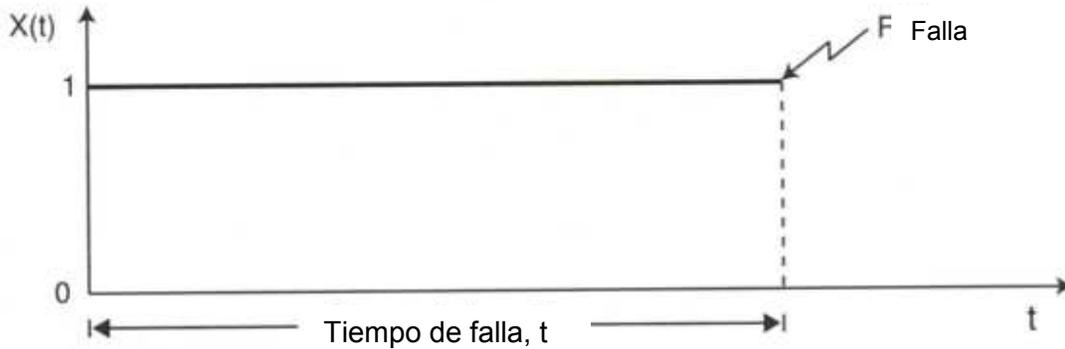


Fig. 1.2 “Variable de Estado de un Artículo No Reparable”. Tomada de [12]

1.4.2 Tiempo de Falla

Por el tiempo de falla de un artículo, se entiende el tiempo que transcurre desde que el artículo es puesto en operación hasta que éste falla por primera vez, siendo $t=0$ el punto de inicio^[22]. Al menos por alguna extensión de tiempo, la falla está sujeta a la oportunidad de variaciones. Es por esta razón natural interpretar el tiempo de falla como una variable aleatoria T . La conexión entre la variable de estado $X(t)$ y el tiempo de falla T es ilustrado en la figura 1.2.

Debe notarse que el tiempo de falla no siempre se mide como tiempo. Puede ser medido también por otros conceptos indirectos como el número de ciclos, el kilometraje, etc.

El tiempo de falla puede ser en general una variable discreta. Dicha variable discreta puede aproximarse a una variable continua, por lo que se puede asumir que el tiempo de falla T está continuamente distribuido con una función de densidad de probabilidad $f(t)$ de tal manera que

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad \text{para } t > 0 \quad (1.2)$$

$F(t)$ entonces denota la probabilidad de que el artículo fallará dentro del intervalo de tiempo $(0, t]$. La función de densidad de probabilidad $f(t)$ esta definida como:

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (1.3)$$

Esto implica que cuando Δt es pequeña

$$\Pr(t < T \leq t + \Delta t) \approx f(t) \cdot \Delta t \quad (1.4)$$

1.4.3 Función de Confiabilidad

La función de confiabilidad^[22] de un artículo está definida por

$$R(t) = 1 - F(t) = \Pr(T > t) \quad \text{para } t > 0 \quad (1.5)$$

o equivalentemente

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (1.6)$$

Por lo tanto $R(t)$ es la probabilidad de que un artículo no falle en un intervalo de tiempo de $(0, t]$ o en otras palabras, la probabilidad de que un artículo sobreviva el intervalo de tiempo $(0, t]$ y siga funcionando en el tiempo t . La función de confiabilidad $R(t)$ es también llamada función de sobrevivencia y se ilustra en la figura 1.3.

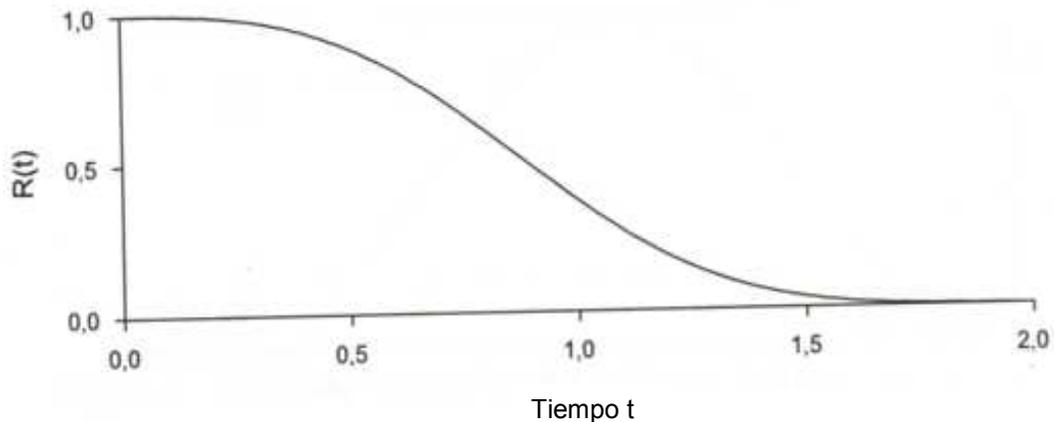


Fig. 1.3 “Función de Confiabilidad”. Tomada de [12]

1.4.4 Función de Índice de Falla

La probabilidad de que un artículo fallará en un intervalo de tiempo $(t, t + \Delta t)$ cuando se sabe que el artículo está funcionando en tiempo t es

$$\Pr(t < T \leq t + \Delta t \mid T > t) = \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t)}{\Pr(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \quad (1.7)$$

Al dividir esta probabilidad por el intervalo de tiempo Δt y haciendo que $\Delta t \rightarrow 0$ se obtiene la función de índice de falla $z(t)$ de un artículo

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \quad (1.8)$$

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.9)$$

Esto implica que cuando Δt es pequeña

$$\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \approx z(t) \cdot \Delta t \quad (1.10)$$

La similitud y la diferencia entre la función de densidad de probabilidad $f(t)$ y la función de índice de falla $z(t)$ es

$$\Pr(t < T \leq t + \Delta t) \approx f(t) \cdot \Delta t \quad (1.11)$$

$$\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \approx z(t) \cdot \Delta t \quad (1.12)$$

Digamos un nuevo artículo comienza en un tiempo $t=0$ y en el tiempo $t=0$ se pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de que este artículo fallará en un intervalo $(t, t+\Delta t]$? De acuerdo a Ec.(1.11) esta probabilidad es aproximadamente igual a la función de densidad de probabilidad $f(t)$ en el tiempo t multiplicada por el intervalo Δt . Lo que sigue es considerar un artículo que ha sobrevivido hasta un tiempo t , y se pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de que este artículo fallará en el siguiente intervalo $((t, t+\Delta t])$? Esta probabilidad condicional está de acuerdo a la Ec.(1.12), aproximadamente igual a la función índice de falla $z(t)$ en el tiempo t multiplicado por el intervalo Δt ^[22].

Si se tiene un número grande de artículos idénticos en operación en un tiempo $t=0$, entonces $z(t) \cdot \Delta t$ burdamente representará la proporción relativa de artículos que sigan funcionando en un tiempo t y fallando en $(t, t+\Delta t]$

De

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} (1 - R(t)) = -R'(t) \quad (1.13)$$

entonces

$$z(t) = \frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (1.14)$$

Desde que $R(0)=1$ entonces

$$\int_0^t z(t) = -\ln R(t) \quad (1.15)$$

y

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t z(u)du\right) \quad (1.16)$$

La función de confiabilidad (supervivencia) $R(t)$ y la función de distribución $F(t) = 1 - R(t)$ son por esa razón únicamente determinadas por la función índice de falla $z(t)$. De Ec.(1.9) y de Ec.(1.16) podemos observar que la función de densidad de probabilidad $f(t)$ puede expresarse por:

$$f(t) = z(t) \cdot \exp\left(-\int_0^t z(u)du\right) \quad \text{para } t > 0 \quad (1.17)$$

En estadística actuarial la función índice de falla es llamada fuerza de mortalidad; este término ha sido adoptado por varios autores de libros de confiabilidad para evitar la confusión, entre la función índice de falla y el índice de ocurrencia de fallas de un artículo reparable. La función índice de falla es una función de la distribución de vida de un artículo simple y una indicación de la “propensión de la falla” de un artículo después de un tiempo t que ha transcurrido, mientras que el índice de ocurrencia de falla lo es para un proceso estocástico^[22].

De Ec.(1.16) se observa que la función de confiabilidad $R(t)$ es únicamente determinada por la función índice de falla $z(t)$. Para determinar $z(t)$ para un dado número de artículos, el siguiente experimento puede ser realizado:

Dividir el intervalo de tiempo $(0, t)$ en intervalos separados de igual duración Δt . Luego poner n artículos idénticos en operación en un tiempo $t=0$, cuando el artículo falla se anota el tiempo y se segrega el artículo. Para cada tiempo registrado se tiene:

El número de artículos $n(i)$ que falla en el intervalo i

Los tiempos de funcionamiento para cada artículo individual son $(T_{1i}, T_{2i}, \dots, T_{ni})$ en el intervalo i . Entonces T_{ji} , es el tiempo del artículo j que ha estado en funcionamiento en un intervalo de tiempo i . T_{ji} es por esa razón igual a 0 si el artículo j ha fallado antes del intervalo i , donde $j=1, 2, \dots, n$.

Entonces $\sum_{j=1}^n T_{ji}$ es el tiempo total de funcionamiento para los artículos en el intervalo

$$i. \text{ Ahora } z(i) = \frac{n(i)}{\sum_{j=1}^n T_{ji}} \quad (1.18)$$

Lo cual muestra que el número de fallas por unidad de tiempo de funcionamiento en el intervalo i es una estimación natural del “índice de falla” en el intervalo i para los artículos que están en funcionamiento en el comienzo de este intervalo.

Si $m(i)$ denota el número de artículos que están en funcionamiento al comienzo del intervalo i :

$$z(i) \approx \frac{n(i)}{m(i)\Delta t} \quad (1.19)$$

y entonces

$$z(i)\Delta t \approx \frac{n(i)}{m(i)} \quad (1.20)$$

Un histograma que representa $z(i)$ como una función de i , típicamente es de la forma que aparece en la figura 1.4.

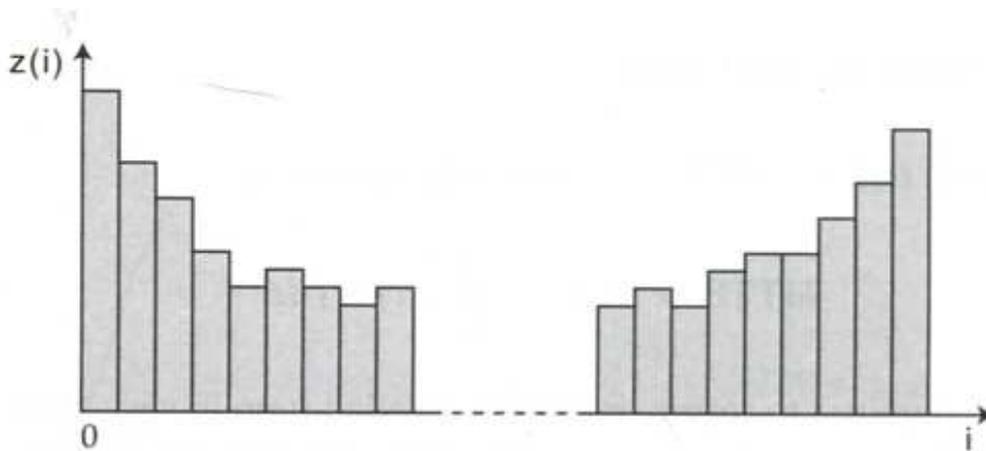


Fig. 1.4 “Histograma de $Z(i)$ ”. Tomada de [12]

Si n es muy largo, se pueden usar intervalos de tiempo muy pequeños. Si $\Delta t \rightarrow 0$ se espera que la función $z(i)$ tenderá a una curva “valle” como se ilustra en la figura 1.5.

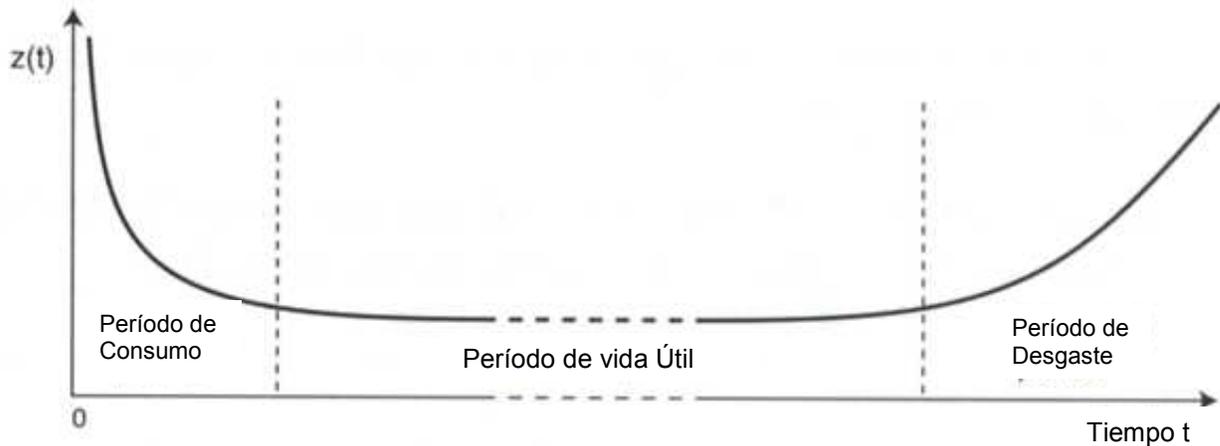


Fig. 1.5 “Curva de la bañera Z(t) si $\Delta t \rightarrow 0$ ”. Tomada de [12]

Esta curva comúnmente es llamada una curva de tina (bañera) al tener su forma característica. El índice de falla es por lo general alto en la fase inicial. Esto puede explicarse por el hecho de que ahí existan defectos sin descubrirse (conocidos como “mortalidad infantil”) en los artículos; esto pronto se mostrará cuando los artículos sean activados. Cuando el artículo ha sobrevivido el período de mortalidad infantil, el índice de falla por lo general se estabiliza en un nivel donde éste permanece por un cierta cantidad de tiempo hasta que empieza a incrementarse al igual que el artículo empieza a desgastarse. De la forma de tina, el tiempo de vida de un artículo puede dividirse en tres intervalos típicos: el período de consumo, el período de vida útil, y el período de desgaste. El período de vida útil es también llamado el período de oportunidad de falla. Generalmente los artículos son probados antes de ser distribuidos a los usuarios, y es entonces que mucha de la mortalidad infantil será evitada en los artículos que son entregados para ser usados. Para la mayoría de artículos mecánicos la función índice de falla mostrará generalmente una ligera tendencia de aumento en el período de vida útil^[22].

1.4.5 Distribución Exponencial

Considérese un artículo que es puesto en operación en un tiempo $t=0$. El tiempo de falla T de un artículo tiene una función de densidad de probabilidad:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & \text{para } t > 0, \lambda > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (1.21)$$

Esta distribución es llamada la distribución exponencial con parámetro λ el cual algunas veces se escribe $T \approx \exp(\lambda)$.

La función de confiabilidad (sobrevivencia) de un artículo es

$$R(t) = \Pr(T > t) = \int_t^{\infty} f(u) du = e^{-\lambda t} \quad \text{para } t > 0 \quad (1.22)$$

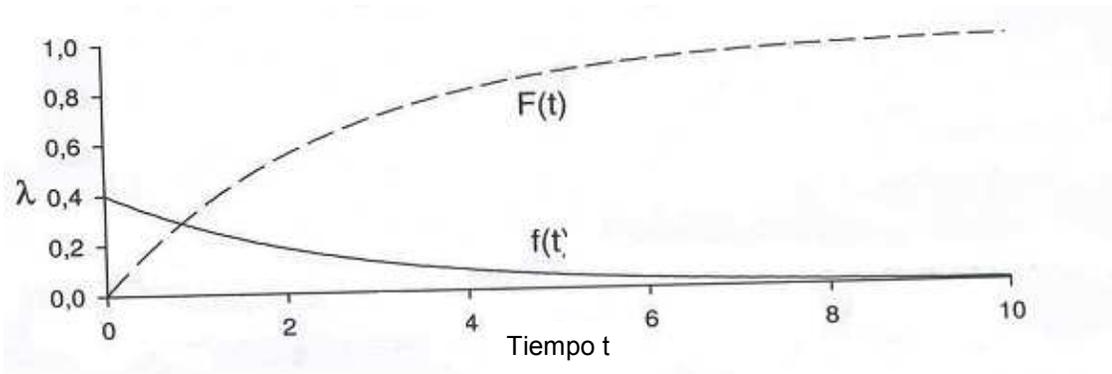


Fig. 1.6 "Función de confiabilidad exponencial". Tomada de [12]

La función índice de falla es

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (1.23)$$

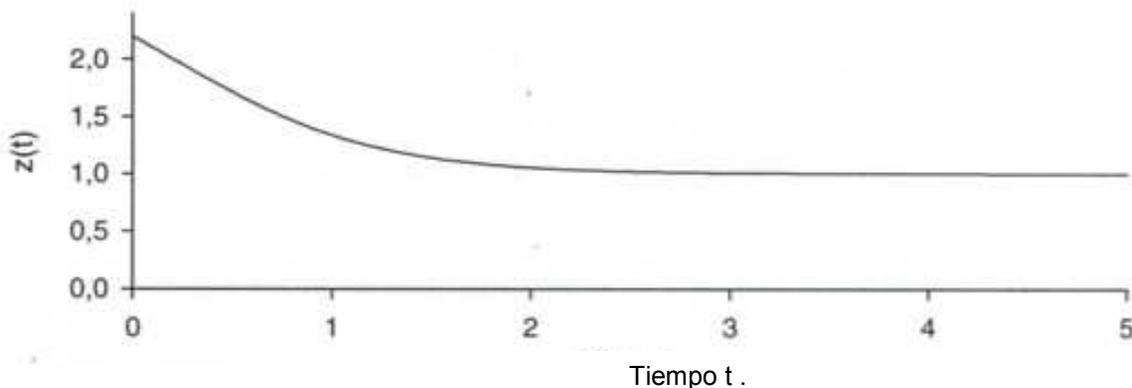


Fig. 1.7 "Función Índice de Falla Exponencial". Tomada de [12]

exponencial de vida es constante; esto indica que una distribución exponencial puede ser una distribución real para un artículo durante su período de vida útil^[12].

1.4.6 Distribución Gamma

Considérese que un artículo está expuesto a series de sobresaltos (golpes, sacudidas, descargas, choques, etc.) que ocurren de acuerdo a un proceso homogéneo de Poisson con índice λ . Los intervalos de tiempo T_1, T_2, \dots entre los sobresaltos consecutivos son entonces independientes y exponencialmente distribuidos con parámetro λ . Asumiendo que el artículo falla exactamente en el sobresalto k y no antes, el tiempo de falla del artículo es entonces

$$T = T_1 + T_2 + \dots + T_k \quad (1.24)$$

T tiene una distribución gamma (k, λ) algunas veces escrito como $T \approx \text{gamma}(k, \lambda)$, la función de densidad de probabilidad es

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(k)} (\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t} \quad (1.25)$$

Donde $\Gamma(\cdot)$ denota la función gamma donde $t > 0$, $\lambda > 0$ y k es un entero positivo, el parámetro λ denota el índice (frecuencia de choques) y es un parámetro externo del artículo. El entero k puede ser interpretado como una medida de la habilidad para resistir los sobresaltos. En la realidad no está restringido únicamente a valores enteros, pero si a valores constantes positivos^[12].

La función de confiabilidad está dada por:

$$R(t) = 1 - F(t) = \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (1.26)$$

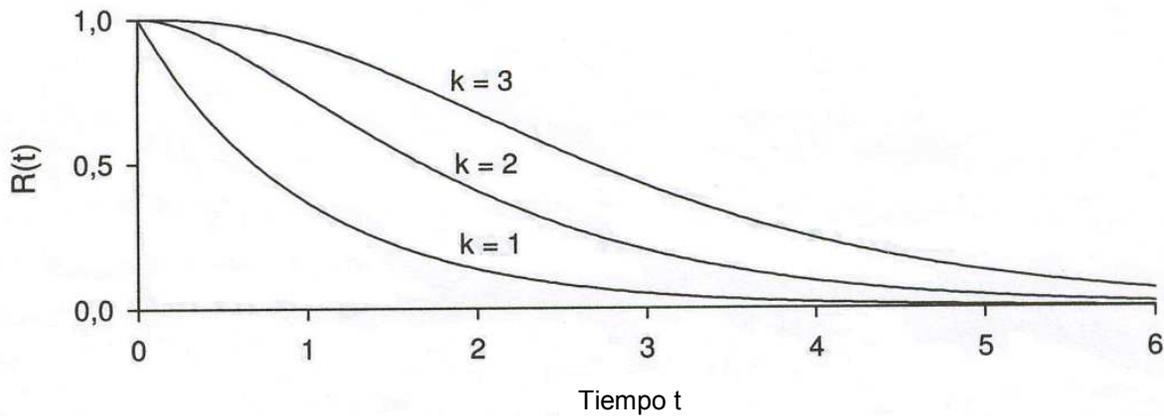


Fig. 1.8 “Función de confiabilidad Gamma”. Tomada de [15]

La correspondiente función índice de falla es

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda (\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t} / \Gamma(k)}{\sum_{n=0}^{k-1} (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n!} \quad (1.27)$$

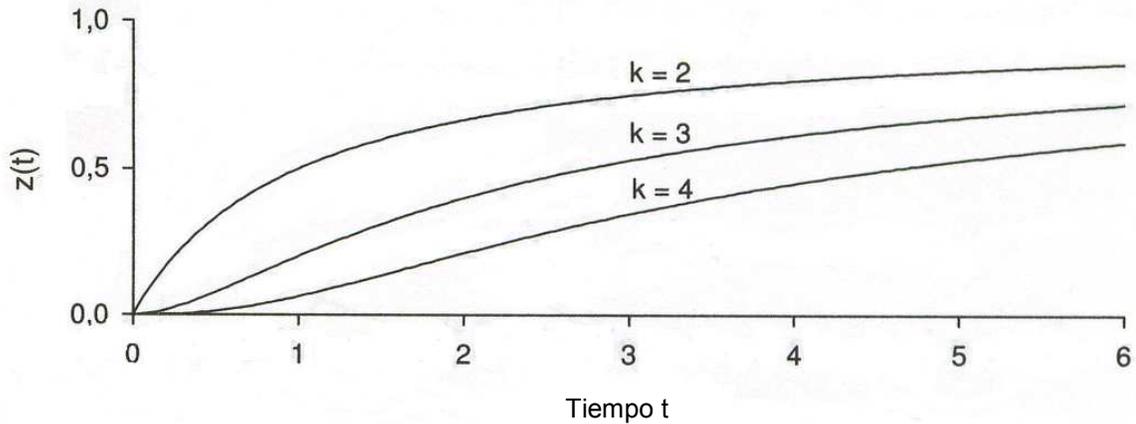


Fig. 1.9 "Función Índice de Falla Gamma". Tomada de [15]

1.4.7 Distribución Weibull

La distribución Weibull es una de las distribuciones más ampliamente usadas en el análisis de confiabilidad. La distribución Weibull es muy flexible, y puede, a través de una apropiada elección de parámetros, modelar varios tipos de índices de comportamientos de falla.

El tiempo de falla T de un artículo tiene una distribución Weibull con parámetros $\alpha (>0)$ y $\lambda (>0)$ [$T \approx \text{Weibull}(\alpha, \lambda)$] si la función de distribución viene dada por

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \begin{cases} 1 - e^{-(\lambda t)^\alpha} & \text{para } t > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (1.28)$$

La correspondiente densidad de probabilidad es

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \begin{cases} \alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1} e^{-(\lambda t)^\alpha} & \text{para } t > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (1.29)$$

Donde λ es un parámetro de escala, y α se refiere a un parámetro de forma. Nótese que cuando $\alpha=1$ la distribución Weibull es igual a la distribución exponencial^[12].

La función de confiabilidad es

$$R(t) = \Pr(T > 0) = e^{-(\lambda t)^\alpha} \text{ para } t > 0 \quad (1.30)$$

La función índice de falla es

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1} \text{ para } t > 0 \quad (1.31)$$

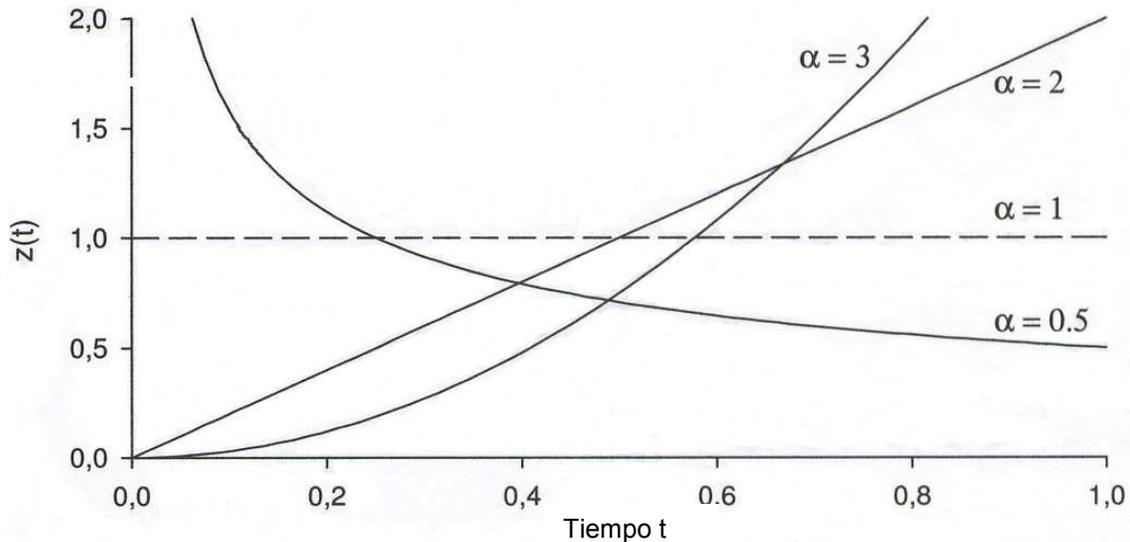


Fig. 1.10 "Función Índice de Falla Weibull". Tomada de [17]

Cuando $\alpha=1$ el índice de falla es constante; cuando $\alpha > 1$, el índice de falla se incrementa; y cuando $0 < \alpha < 1$ el índice de falla se decrecienta. Cuando $\alpha=2$ la distribución resultante es conocida como la distribución de Rayleigh. La distribución de Weibull es flexible y puede ser usada para modelar distribuciones de vida donde la función índice de falla es decreciente, constante y creciente^[19].

1.4.8 Distribución Normal

La distribución más comúnmente usada en estadística es la distribución normal. Una variable aleatoria T se dice que está normalmente distribuida con media ν y varianza τ^2 , $T \approx N(\nu, \tau^2)$ cuando la densidad de probabilidad de T es

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \tau} e^{-(t-\nu)^2 / 2\tau^2} \text{ para } -\infty < t < \infty \quad (1.32)$$

La distribución $N(0,1)$ es llamada la distribución normal estándar. La función de distribución de la distribución normal estándar es generalmente denotada por $\Phi(\cdot)$; la densidad de probabilidad de la distribución normal estándar es

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \quad (1.33)$$

La función de distribución de $T \approx N(\nu, \tau^2)$ puede escribirse como:

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \Phi\left(\frac{t-\nu}{\tau}\right) \quad (1.34)$$

La distribución normal es (algunas veces) usada como una distribución de tiempo de vida, incluso permite valores negativos con probabilidades positivas.

La función de confiabilidad es

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\nu}{\tau}\right) \quad (1.35)$$

La función índice de falla de la distribución normal es

$$z(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\phi((t-\nu)/\tau)}{1 - \Phi((t-\nu)/\tau)} \quad (1.36)$$

Si $z_\Phi(t)$ denota la función índice de falla de la distribución normal estándar, la función índice de falla de $N(\nu, \tau^2)$ será:

$$z(t) = \frac{1}{\tau} \cdot z_\Phi\left(\frac{t-\nu}{\tau}\right) \quad (1.37)$$

La función índice de falla se incrementa para toda t y se aproxima $z(t)=t$ cuando $t \rightarrow \infty$.

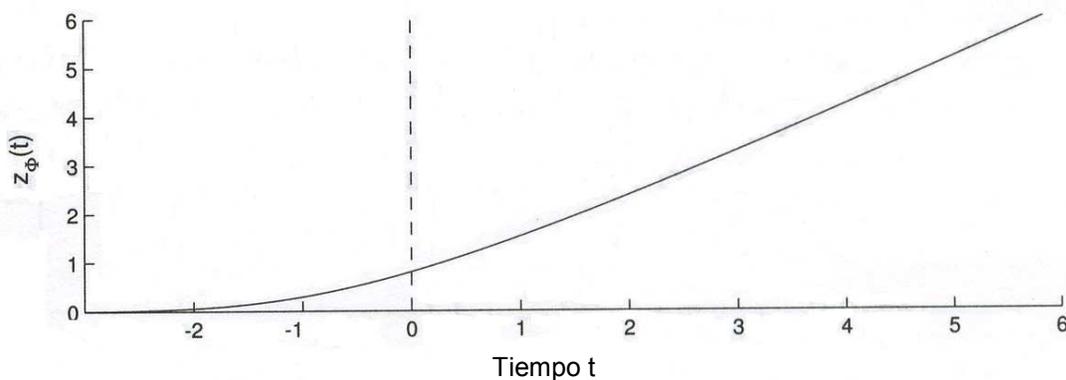


Fig. 1.11 "Función Índice de Falla Normal" tomada de [18]

Cuando una variable aleatoria tiene una distribución normal pero con un límite superior o un límite inferior para los valores de la variable aleatoria, la distribución resultante es llamada distribución normal truncada. Cuando sólo hay un límite inferior se dice que la distribución es truncada por la izquierda. Cuando sólo hay un límite superior se dice que la distribución es truncada por la derecha. Cuando hay tanto un límite inferior como un límite superior se dice que es doblemente truncada^[18].

Una distribución normal, truncada por la izquierda a 0, es algunas veces usada como una distribución de vida. Esta distribución normal truncada por la izquierda tiene una función de confiabilidad.

$$R(t) = \Pr(T > t | T > 0) = \frac{\Phi((t-\nu)/\tau)}{\Phi(\nu/\tau)} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (1.38)$$

La correspondiente función índice de falla viene a ser

$$z(t) = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\phi((t-\nu)/\tau)}{1 - \Phi((t-\nu)/\tau)} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (1.39)$$

Nótese que la función índice de falla de la distribución normal truncada por la izquierda es idéntica a la función índice de falla de una distribución normal no truncada cuando $t \geq 0$.

1.4.9 Distribución Lognormal

El tiempo de falla T de un artículo se dice que es logarítmicamente distribuido con los parámetros ν y τ^2 , $T \approx \ln(\nu, \tau^2)$ si $Y = \ln T$ es normalmente distribuido con media ν y varianza τ^2 . La función de densidad de probabilidad de T es^[12]

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \tau \cdot t} e^{-(\ln t - \nu)^2 / 2\tau^2} & \text{para } t > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (1.40)$$

La función de confiabilidad viene a ser

$$R(t) = \Pr(T > t) = \Pr(\ln T > \ln t) \quad (1.41)$$

$$R(t) = P\left(\frac{\ln T - \nu}{\tau} > \frac{\ln t - \nu}{\tau}\right) = \Phi\left(\frac{\nu - \ln t}{\tau}\right) \quad (1.42)$$

Donde $\Phi(\cdot)$ es la función de distribución de la distribución normal estándar.

La función índice de falla de una distribución lognormal es

$$z(t) = -\frac{d}{dt} \left(\ln \Phi \left(\frac{\nu - \ln t}{\tau} \right) \right) = \frac{\phi((\nu - \ln t)/\tau) / \tau \cdot t}{\Phi((\nu - \ln t)/\tau) / \tau} \quad (1.43)$$

donde $\phi(t)$ denota la densidad de probabilidad de la distribución normal estándar

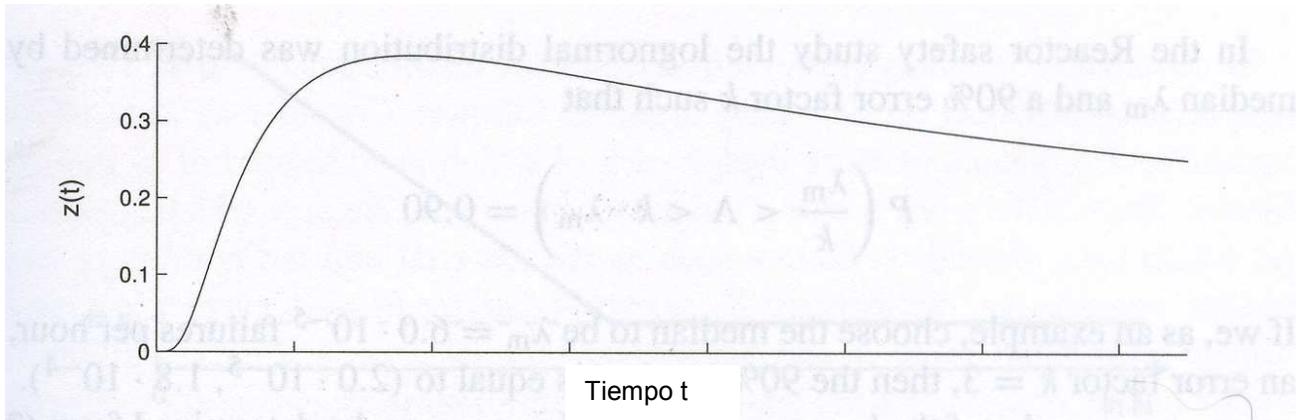


Fig. 1.12 "Función Índice de Falla Lognormal". tomada de [14]

1.4.10 Teorema de Bayes

El teorema de Bayes (también conocido como la regla de Bayes o ley de Bayes) es un resultado de la teoría de las probabilidades, que relaciona las distribuciones condicionales y marginales de la probabilidad de variables aleatorias. En algunas interpretaciones de la probabilidad, el teorema de Bayes dice cómo actualizar o revisar inferencias a la luz de una nueva evidencia *a posteriori*.

La probabilidad del acontecimiento A condicionada a otro acontecimiento B es generalmente diferente de la probabilidad de B condicionada a A . Sin embargo, hay una relación definida entre los dos, y el teorema de Bayes es la declaración de esa relación.

Como teorema formal, el teorema de Bayes es válido en todas las interpretaciones de la probabilidad. Sin embargo, las interpretaciones frecuentistas y las interpretaciones bayesianas discrepan sobre las clases de fenómenos a las cuales las probabilidades (bayesianas ó frecuentistas) se deban asignar: los frecuentistas asignan probabilidades a los acontecimientos aleatorios según sus frecuencias de ocurrencia o a los subconjuntos de poblaciones como proporciones de un todo (conjunto). Los Bayesianos en cambio asignan probabilidades a los acontecimientos aleatorios que son inciertos al considerárseles como una frecuencia, ya que dichos acontecimientos dependen a su vez de otros eventos aleatorios^[23].

El teorema de Bayes relaciona las probabilidades condicionales y marginales de los acontecimientos estocásticos A y B :

$$\Pr(A/B) = \frac{\Pr(B/A)\Pr(A)}{\Pr(B)} = \alpha L(A/B)\Pr(A) \quad (1.44)$$

donde $\alpha = \frac{1}{\Pr(B)}$ y $L(A/B)$ es la probabilidad de B dado A . Note la relación

$$L(A/B) = \Pr(B/A) \quad (1.45)$$

.Cada término en el teorema de Bayes tiene un nombre convencional:

- $\Pr(A)$ es la probabilidad a priori o probabilidad marginal de A . Es "a priori" en el sentido que no considera ninguna información sobre B .
- $\Pr(A|B)$ es la probabilidad condicional de A dado B . También se llama probabilidad a posteriori porque se deriva o depende del valor especificado de B .
- $\Pr(B|A)$ es la probabilidad condicional de B dado A .
- $\Pr(B)$ es la probabilidad apriori o marginal de B , y actúa como constante de normalización.

Con esta terminología, el teorema se puede parafrasear como:

$$\text{Probabilidad a posteriori de } A \text{ dado } B = \frac{(\text{Probabilidad a posteriori de } B \text{ dado } A)(\text{Probabilidad a priori de } A)}{\text{Constante de Normalización}} \quad (1.46)$$

De esta forma el teorema de Bayes, considera que la probabilidad a posteriori de A dado B es proporcional a la probabilidad a posteriori de B dado A en las veces de la probabilidad a priori de A .

1.4.10.1 Derivación de probabilidades condicionales

La probabilidad del acontecimiento A dado el acontecimiento B es

$$\Pr(A/B) = \frac{\Pr(A \cap B)}{\Pr(B)} \quad (1.48)$$

Así mismo, la probabilidad del acontecimiento B dado el acontecimiento A es

$$\Pr(B/A) = \frac{\Pr(A \cap B)}{\Pr(A)} \quad (1.49)$$

Cambiando y combinando estas dos ecuaciones, se encuentra que

$$\Pr(A/B)\Pr(B) = \Pr(A \cap B) = \Pr(B/A)\Pr(A) \quad (1.50)$$

Esta expresión a veces se llama la regla del producto para las probabilidades, al dividir ambos lados por $\Pr(B)$ y asumiendo que es diferente a cero, obtenemos el teorema de Bayes^[23]:

$$\Pr(A/B) = \frac{\Pr(B/A)\Pr(A)}{\Pr(B)} \quad (1.51)$$

1.4.10.2 Formas alternativas del teorema de Bayes

El teorema de Bayes es expresado a menudo al notar esto

$$\Pr(B) = \Pr(A \cap B) + \Pr(A^c \cap B) = \Pr(B/A)\Pr(A) + \Pr(B/A^c)\Pr(A^c) \quad (1.52)$$

donde A^c es el evento complementario de A (a menudo llamada "No A"). El teorema se puede exponer en forma modificada como

$$\Pr(A/B) = \frac{\Pr(B/A)\Pr(A)}{\Pr(B/A)\Pr(A) + \Pr(B/A^c)\Pr(A^c)} \quad (1.53)$$

Más generalmente, donde $\{A_j\}$ forma una partición del espacio del acontecimiento^[23],

$$\Pr(A_i/B) = \frac{\Pr(B/A_i)\Pr(A_i)}{\sum_j \Pr(B/A_j)\Pr(A_j)} \quad \text{para cualquier } A_i \text{ en la partición.} \quad (1.54)$$

1.4.10.3 El teorema de Bayes en términos de probabilidades y del cociente de la probabilidad

El teorema de Bayes se puede también escribir cuidadosamente en términos de un cociente de probabilidad Λ y de las probabilidades O como:

$$O(A/B) = O(A) \cdot \Lambda(A/B) \quad (1.55)$$

donde $O(A/B)$ son las probabilidades de A dado B

$$O(A/B) = \frac{\Pr(A/B)}{\Pr(A^c/B)} \quad (1.56)$$

donde están las probabilidades de B dado A,

$$O(A) = \frac{\Pr(A)}{\Pr(A^c)} \quad (1.57)$$

y $O(A)$ son las probabilidades *de A por sí mismo*

$$\Lambda(A/B) = \frac{L(A/B)}{L(A^c/B)} = \frac{\Pr(B/A)}{\Pr(B/A^c)} \quad (1.58)$$

mientras $\Lambda(A/B)$ es el cociente de la probabilidad.

1.4.10.4 El teorema de Bayes para las densidades de probabilidad

Hay también una versión del teorema de Bayes para las distribuciones continuas, lo cual es algo más difícil de expresar, ya que las densidades de la probabilidad en sentido estricto no son probabilidades, así que el teorema de Bayes tiene que ser establecido por un proceso de límite. Sin embargo el teorema de Bayes para las densidades de probabilidad es formalmente similar al teorema para las probabilidades discretas^[24].

$$f(x/y) = \frac{f(x,y)}{f(y)} = \frac{f(y/x)f(x)}{f(y)} \quad (1.59)$$

y hay una declaración análoga de la ley de la probabilidad total:

$$f(x/y) = \frac{f(y/x)f(x)}{\int_{-\infty}^{\infty} f(y/x)f(x)dx} \quad (1.58)$$

Como en el caso discreto, los términos tienen nombres estándares. $f(x, y)$ es la distribución común *de X y de Y*, $f(x|y)$ es la distribución a posteriori *de X dado Y=y*, $f(y|x) = L(x|y)$ es la función de la probabilidad *de X dada Y=y*, y $f(x)$ y $f(y)$ son las distribuciones marginales *de X y de Y* respectivamente, con $f(x)$ siendo la distribución a priori *de X*.

En este caso se ha hecho un abuso convencional de la notación, usando f para cada uno de estos términos, aunque cada uno es realmente una función diferente, las funciones son distinguidas por los nombres de sus argumentos.

1.5 Marco Teórico de la Detección

1.5.1 Análisis Funcional

Para ser capaz de identificar todas las fallas potenciales, la ingeniería de confiabilidad tiene que tener una comprensión minuciosa de varias funciones y de cada bloque funcional y el criterio de desempeño relacionado con varias funciones. Un análisis funcional es por esa razón un paso importante en el análisis de confiabilidad de sistemas. Los objetivos de un análisis funcional son^[12]:

- i. Identificar todas las funciones de un sistema.
- ii. Identificar las funciones requeridas en los varios modos operacionales de un sistema.
- iii. Proveer una descomposición jerárquica de las funciones de un sistema.
- iv. Describir cómo cada una de las funciones es realizada.
- v. Identificar las interrelaciones entre las funciones.
- vi. Identificar interfaces con otros sistemas y con el ambiente.

Una función es un efecto deliberado de un bloque funcional y debe ser definido tal que cada función tenga un simple propósito definido. Es recomendable dar nombres a las funciones que tengan una estructura declarativa y decir “qué es” lo que tiene que hacerse más que el “cómo”. Las funciones deben preferentemente ser expresadas como una declaración que comprenda el verbo más un sustantivo; por ejemplo cerrar fluido, contener fluido, drenar fluido, transmitir señal^[12]. En la práctica, cualquiera que sea, es frecuente y difícil el especificar una función con sólo dos palabras por lo que se tendrán que añadir una o dos palabras extras.

1.5.2 Identificación de los Modos de Falla

Para identificar los modos de falla se tienen que estudiar las salidas de varias funciones. Algunas funciones pueden tener varias salidas, algunas salidas pueden tener una definición muy estricta, para facilitar esta tarea se deberá de determinar si los requerimientos de la salida se cumplen o no^[12]. En otros casos la salida puede ser especificada como un valor objetivo con una desviación aceptable.

1.5.3 Causas de Fallas y Efectos de Fallas

Las funciones de un sistema pueden ser comúnmente divididas en subfunciones, los modos de falla en un nivel de una jerarquía son generalmente causados por modos de falla en los próximos niveles bajos. Es importante ligar los modos de falla en los niveles bajos hacia los principales niveles altos de respuesta, y de tal forma proveer trazabilidad a los sistemas esenciales de respuesta mientras la estructura funcional es refinada^[12].

Un requerimiento funcional es una especificación de un criterio de desempeño relacionado a la función. Si por ejemplo la función es “bombear agua” un

requerimiento funcional podrá ser que la salida de agua deba estar entre 100 y 110 litros por minuto. Para algunas funciones se pueden tener varios requerimientos funcionales^[12].

1.5.4 Causa de Falla, Mecanismos y Causa Raíz

De acuerdo con el IEC50(191)^[4] la causa de una falla son “la circunstancias durante el diseño, manufactura o uso que conducen a la falla”. La causa de una falla es una información necesaria con el fin de evitar fallas o recurrencia de fallas”. Las causas de las fallas pueden ser clasificadas en relación al ciclo de vida de los bloques funcionales, donde varias causas de fallas se definen como:

1. Falla de Diseño: Una falla debida a un inadecuado diseño de un bloque funcional.
2. Falla de Debilidad: Una falla debido a una debilidad de un bloque funcional, ésta se presenta cuando está sujeto el bloque funcional a un esfuerzo dentro de sus capacidades establecidas (la debilidad puede ser inherente o inducida).
3. Falla de Manufactura: Una falla debido a la no conformidad durante la manufactura para el diseño de un bloque funcional o para un proceso de manufactura específico.
4. Falla de Envejecimiento: Una falla cuya probabilidad de ocurrencia incrementa con el paso del tiempo, como resultado de un proceso inherente en el bloque funcional.
5. Falla de Mal Uso: Una falla debido a la aplicación de esfuerzos durante el uso que exceden las capacidades establecidas de un bloque funcional.
6. Falla de Maltrato: Una falla causada por un manejo incorrecto o pérdida de cuidado de un bloque funcional.

Hay por ejemplo una obvia coincidencia parcial entre las fallas de debilidad, diseño y manufactura. Ejemplo de esto es la pérdida de la calibración de sensores durante pruebas o la mala colocación de piezas, entre otros.

Los mecanismos de falla son en IEC50(191)^[4] definidos como “físicos, químicos u otros procesos que conducen hacia la falla”. Una interpretación común de estos términos son las causas, tales como la corrosión, la dureza, golpeteos, etc.

La descripción para este nivel de causa de falla, cualquiera que éste sea, no es suficiente^[4] para evaluar posibles remedios. Estas causas fundamentales algunas veces son referidas como causas raíz, causas sobre las cuales pueden decidirse acciones remediales.

1.5.5 Efectos de Falla

La relación entre la causa y el efecto es que cada modo de falla puede ser causado por muchas diferentes causas de falla, conduciendo a muchos diferentes efectos de falla. Para tener un entendimiento más amplio de la relación de estos términos, el nivel que está siendo analizado es un aspecto que debe ser considerado. Un modo de falla en el nivel más bajo es una de las causas de falla en el siguiente nivel más alto, y que el efecto de la falla en el nivel más bajo es igual al modo de falla en el siguiente nivel más alto.

1.5.6 Análisis de Causa Raíz

La determinación de la causa raíz es un proceso sistemático para detectar y analizar las posibles causas de un problema para finalmente establecer acciones de corrección o de prevención. Durante el análisis de causa raíz se tendrá una dependencia fuerte en habilidades de razonamiento y de lógica para llegar a establecer conclusiones. Para hacer el razonamiento visible se usan herramientas como listas, hojas de trabajo, graficas y toda aquella información que genere suposiciones y pruebe las conclusiones^[25].

Cuando se llegan a acciones de corrección que resultarán en procedimientos, procesos y restricciones, que son innecesarios o vanamente extensos, se dice que se tienen conclusiones pobres como resultado de un error en nuestro razonamiento o de datos incompletos e inexactos.

El propósito para determinar la causa raíz es primeramente coleccionar y analizar datos para después determinar porque el problema ocurrió. El análisis de causa raíz tiene varias metas^[25]:

- a) Para determinar presuntas causas de los problemas de desempeño (equipo, procedimientos, personal y procesos de trabajo).
- b) Para eliminar causas presuntas y aparentes que los datos no soportan.
- c) Para seleccionar causas que necesitan verificación.
- d) Para determinar la causa raíz y las causas que contribuyen (causas contribuyentes) a un problema que requiere una acción correctiva.

Se deberán considerar las metas anteriores para poder establecer un enfoque en las acciones de corrección.

Por otra parte, se pueden referir a las causas de un problema en diferentes formas como lo son^[25]:

- a) Causas Presuntas: Causas que pueden ser aparentes en el comienzo de la investigación o que emergen durante el proceso de colección de datos. Estas pueden ser hipótesis que explican los efectos del problema, sin embargo necesitan validación.

b)Causas Contribuibles: Son las causas que por sí solas no ocasionan el problema, sin embargo son lo suficientemente importantes para la toma de una acción correctiva destinada a mejorar la calidad del proceso o producto (en esta clasificación se incluyen las causas posibles y las causas secundarias de un problema)

c)Causa Raíz: Es la principal razón básica de un problema, la que si es corregida, prevendrá la recurrencia de un problema.

Es importante hacer una distinción entre la causa primaria o la causa raíz de las causas contribuibles, para desarrollar acciones correctivas necesarias que prevengan el problema de su recurrencia. Sin una investigación minuciosa de la situación problemática, se pueden iniciar acciones de corrección que no eliminarán o aliviarán el problema y dará lugar al desperdicio de valiosos recursos.

Una vez definido el problema basado en los hechos, se pueden enfocar los esfuerzos de análisis de causa raíz, en planear una estrategia y a empezar a obtener datos necesarios para establecer hipótesis y probar posibles causas. Una vez definido el problema, se necesitará planear una estrategia para determinar la causa raíz. Se deberá hacer una organización y reorganización de los datos y se deberá determinar adicionalmente que acción será apropiada para coleccionar datos adicionales necesarios. Una vez que se cuenten con todos los datos se deberá poner particular atención en el análisis de cambios con el cual se podrán exponer las posibles causas^[25].

El análisis de causa raíz es un proceso iterativo, cuyo éxito recae en el evaluar el impacto de cada nueva pieza de evidencia e integrar la nueva información en el análisis de los documentos, para ser capaz de regresar a cualquier punto en la investigación, se deberá documentar sistemáticamente^[25]:

- a) La secuencia de todos los eventos relevantes.
- b) La fuente de todos los hechos usados como evidencia.
- c) La base de todas las suposiciones.
- d) Las razones para todas las conclusiones.
- e) Las fuentes de los datos.

Para establecer conclusiones se necesitará una clara descripción de las causas de un evento tanto la causa raíz como las causas contribuibles. El proceso que se use para determinar la causa raíz y las causas contribuibles debe incluir los siguientes pasos^[25]:

- a) Establecer Hipótesis o formular causas presuntas.
- b) Probar o Validar las causas presuntas.
- c) Separar la causa raíz de las causas contribuibles.
- d) Verificar la causa raíz.

Al iniciarse la investigación se estará tratando de determinar la causa de la situación. Para separar todas las causas resulta de ayuda establecer declaraciones que claramente muestren ambos, tanto la causa como el efecto.

Validar o probar las causas presuntas recae en el uso de la información y en el razonamiento para soportarlas o eliminarlas. Dos frases pueden ayudar al razonamiento de la información^[25]:

- a) “Si arreglo ésto, se prevendrá el problema para que ya no vuelva a pasar”.
- b) “Si es la causa raíz, se explica la situación problemática al igual que las situaciones comparables”.

Para separar la causa raíz de las causas contribuibles se usará un criterio de árbol para determinar si cada causa validada es una causa raíz, o una causa secundaria:

- a) El problema no ha ocurrido sin que la causa esté presente.
- b) El problema no recurrirá debido al mismo factor causal si la causa es corregida o eliminada.
- c) La corrección o eliminación de la causa prevendrá la recurrencia de condiciones similares.

Si en la lógica de los cuestionamientos se obtiene un “sí”, se habrá encontrado la causa raíz; si por el contrario se obtiene un “no”, se habrá encontrado una causa contribuible.

Finalmente para verificar la causa raíz se pueden usar los siguientes métodos^[26]:

- a) Verificar todos los hechos por consistencia:

- Testigos
- Evidencia física
- Registros y software
- Testimonio de expertos
- Información de ingeniería
- Información analítica

- b) Verificar todo el análisis usando hechos verificados:

- Análisis de barreras
- Análisis de cambio
- Análisis de eventos y factores causales

- c) Resolver Inconsistencias y Discrepancias.

1.6 Toma de Decisiones y Ponderación

1.6.1 Evaluando Decisiones y El Proceso de Toma de Decisiones

La toma de decisiones es el proceso de seleccionar el curso de una acción de entre dos o más alternativas. La toma de decisiones es una tarea crítica en el escenario de la calidad total^[27].

La base para evaluar la toma de decisiones es mediante el examen de los resultados. Para realizar tal consideración es viable analizar tanto los resultados positivos así como los negativos, cabe mencionar que muchas veces los resultados negativos permiten nuevas líneas de investigación que podrán mejorar los resultados a corto, mediano y largo plazo. Por otra parte los resultados positivos a corto plazo no siempre aseguran que estos se vayan a mantener a futuro, por lo que no siempre son una base para garantizar nuestras mejores decisiones^[27].

El proceso de toma de decisiones se define como una secuencia lógica de actividades a través de la cuales las decisiones se toman^[28].

Este proceso incluye los siguientes pasos^[28]:

- a) Identificar o Anticiparse al Problema.
- b) Reunir los hechos.
- c) Considerar Alternativas.
- d) Escoger la mejor alternativa .
- e) Implementar la mejor alternativa.
- f) Monitorear la mejor alternativa y realizar ajustes.

Para realizar la identificación del problema se recomienda no asumir nada. La identificación es un proceso que debe ser basado en observar, oír, preguntar, analizar, percibir o sentir. Para la identificación de un problema también se requiere un conocimiento de los recursos humanos involucrados, productos, procesos y sistemas tecnológicos.

Una vez identificado el problema se deben reunir los hechos que están detrás de él y separar las causas de los síntomas para determinar la causa raíz del problema^[29].

Para considerar las alternativas se deben seguir los siguientes dos pasos: a) listar todas las alternativas posibles y b) evaluar cada alternativa a la luz de los hechos.

El número de alternativas identificadas en el primer paso, estará limitado por varios factores como son las consideraciones prácticas, el costo, el rango de autoridad y la causa del problema. Sin embargo el segundo paso y el principal criterio contra el cual las alternativas deberán ser evaluadas es la salida deseada, es decir, si a la luz de los hechos la alternativa es la solución del problema^[29].

Después de que todas las alternativas han sido consideradas uno debe seleccionarla e implementarla, y después de que ha sido implementada se debe monitorear su progreso así como realizar los ajustes necesarios apropiadamente, se debe preguntar si la alternativa tiene el efecto deseado y sino qué ajustes se le deben hacer.

La selección de la mejor alternativa requiere estudio, lógica, razón, experiencia e incluso intuición. Ocasionalmente la alternativa escogida no producirá los resultados deseados, cuando esto suceda y los ajustes no son suficientes, será importante moverse hacia otra alternativa.

1.6.2 Toma Subjetiva de Decisiones VS Toma Objetiva de Decisiones

Todas las aproximaciones de la toma de decisiones caen dentro de una de dos categorías: objetiva o subjetiva. A pesar de que la aproximación usada en el desarrollo de la calidad total debe tener características de ambas, la meta es minimizar la subjetiva y maximizar la objetiva. La aproximación más parecida a un resultado en las decisiones para la calidad es la aproximación objetiva^[30].

La aproximación es objetiva, lógica y ordenada, ésta procede de manera secuencial (paso a paso) y asume que se dispone del tiempo necesario para realizar todos los pasos del proceso de toma de decisiones. También asume que se cuenta con información completa y exacta, lo que da paso a la libertad de seleccionar la mejor alternativa.

Sin embargo, la decisión objetiva tiene como base los supuestos anteriores y puede resultar difícil de realizar cuando se está tomando una decisión. Ya que no siempre se cuenta con el tiempo ni con toda la información, aún así no debe considerársele como imposible, pero sí limitada y afectada por el tiempo y la información.

Mientras que la decisión objetiva está basada en la lógica y la información completa y exacta, la decisión subjetiva está basada en la intuición, experiencia y en la información incompleta. Esta aproximación asume que se está bajo presión, corto en tiempo y que se opera sólo con información limitada. La meta de la decisión subjetiva es hacer la mejor decisión posible bajo las circunstancias. Al usar esta aproximación el peligro siempre existe de que se tomen decisiones rápidas, no eficientes, basadas en la falta de información y en las interpretaciones erróneas de la información disponible o de la carencia de otras fuentes de información. La aproximación subjetiva no permite realizar decisiones blandas. Las decisiones subjetivas por tal son anatema del contexto de la calidad total y deben ser evitadas siempre que sea posible^[30].

1.6.3 Toma Científica de Decisiones

La toma científica de decisiones es una manera sistemática de aprendizaje de los procesos a partir de los datos que arrojen estos con la finalidad de buscar las causas raíces de los problemas, más que una reacción superficial ante los síntomas. La aproximación científica ve más por las soluciones permanentes que las rápidas soluciones que en apariencia pudieran solucionar un problema^[27].

La aproximación científica en la toma de decisiones enfrenta a la complejidad. Para la aproximación científica la complejidad significa trabajo innecesario e improductivo que resulta cuando se quiere mejorar algo sin existir previamente un plan sistemático. La

complejidad por tal motivo se manifiesta en errores y defectos, paros y demoras, ineficiencia y por último variación.

Cuando se requiera tomar una decisión, la aproximación científica nos induce a cuestionarnos acerca de la complejidad de un sistema, así como buscar la implementación de una solución que ataque a las manifestaciones de la complejidad^[27].

Cuando se tenga que tomar una decisión se deberán de tener en cuenta^[26]:

a) Errores y Defectos: los errores causan defectos y los defectos reducen la competitividad; cuando un defecto ocurre existe el desecho y el retrabajo, lo que ocasionan costos al producto sin valor agregado.

b) Paros y Demoras: el equipo sufre descomposturas que ocasionan demoras en el trabajo. Cuando se tiene la intención de hacer un proceso más rápido sin tomar en cuenta su tasa óptima de desempeño, el incremento de errores y paros es casi inevitable.

d) Ineficiencia: La ineficiencia significa usar más recursos que los necesarios para completar una tarea. La ineficiencia por lo general ocurre cuando se cae en el hábito de hacer las cosas como siempre han sido hechas, sin preguntarse el porqué de ello.

e) Variación: En calidad la consistencia y la predicción son importantes; cuando un proceso es consistente se puede mejorar al hacer una reducción de la variación del proceso. En el proceso de toma de decisiones es importante separar las causas especiales de variación de las causas comunes de variación.

1.6.4 Método Monte Carlo

A pesar de que el método Monte Carlo es conocido desde hace décadas, tuvo un uso general sólo con el advenimiento de las computadoras, ya que necesita de muchos cálculos. J. Von Neumann y S. Ulam son considerados como los inventores del método Monte Carlo. Los números aleatorios juegan un papel fundamental en el método. Monte Carlo es un lugar famoso por sus casinos y en particular sus ruletas, en las cuales se generan números aleatorios; esto explica el nombre del método. El método incluye todos los cálculos numéricos los cuales simulan procesos que dependen de variables aleatorias. Generalmente estos cálculos son muy complejos como para ser resueltos de forma analítica. Los cálculos se realizan por las medias de números pseudo-aleatorios, los cuales tienen propiedades muy similares a los verdaderos números aleatorios. El método Monte Carlo puede ser usado para resolver problemas que no dependan de variables aleatorias, pero que pueden ser descritos con un modelo de probabilidad como el de la integración Monte Carlo^[31].

La relación entre el método Monte Carlo y el AMEF^[32] es que el primero puede ser un generador de combinaciones aleatorias para asignar pesos a otras variables (diferentes a la severidad, ocurrencia y detección) que se pretendan ponderar, es decir, el método Monte Carlo puede ayudar a conocer a que variables ponderadas se les puede asignar un mayor peso^[32]. Sin embargo, el método Monte Carlo no es el único método que puede dar estos datos. Existe también el método multicriteria Promethee-Gaia, como a continuación se verá.

1.6.5 Método Multicriteria Promethee-Gaia

Este método fue desarrollado por Jean Pierre Brans y Bertrand Mareschal en Bruselas, Bélgica. El método multicriteria está enfocado a la toma de una decisión sobre la base de elegir la mejor opción entre varios criterios^[33]. Este método consiste en asociar una función de preferencia a cada criterio al igual que a cada peso que describe su importancia relativa. El propósito de un método multicriteria es enriquecer los criterios dominantes con el fin de reducir los criterios incomparables. Este método tiene una serie de requisitos que se deben cumplir los cuales son^[33]:

- a) La amplitud de las desviaciones entre las evaluaciones de las alternativas de cada criterio debe ser tomada en cuenta.
- b) Como las evaluaciones de cada criterio son expresadas en sus propias unidades los efectos de las escalas deben ser completamente eliminados.
- c) En el caso de las comparaciones “par-prudente”, un apropiado método multicriteria debe proveer la siguiente información:
 - a es preferida de b
 - a y b son indiferentes
 - a y b son incomparables
- d) Los diferentes métodos multicriteria requieren diferente información adicional y operan diferentes procedimientos de cálculo por lo que las soluciones que proponen pueden ser diferentes.
- e) Un apropiado método no debe incluir parámetros técnicos con el fin de que no tenga significancia en quién toma decisiones.
- f) Un apropiado método debe proveer información en la naturaleza conflictiva de los criterios.
- g) Un método apropiado debe ofrecer herramientas de sensibilidad para probar fácilmente diferentes pesos en los criterios.

1.7 Estado del Arte: El AMEF y otras Técnicas para la Calidad

En este apartado se revisan otras técnicas de calidad que están relacionadas con el AMEF y que complementan la información que puede proporcionar éste.

1.7.1 Sistemas a Prueba de Errores: Poka-Yoke

Un *poka yoke* (en japonés, literalmente *a prueba de errores*) es un dispositivo (generalmente) destinado a evitar errores; algunos autores manejan el *poka yoke* como un *sistema anti-error* el cual garantiza la seguridad de los usuarios de cualquier maquinaria, proceso o procedimiento, en el cual se encuentren relacionados, de esta manera, previene accidentes de cualquier tipo^[34]. Estos dispositivos fueron introducidos en Toyota en la década de los 60, por el ingeniero Shigeo Shingo dentro de lo que se conoce como Sistema de Producción Toyota. Aunque con anterioridad ya existían *poka yokes*, no fue hasta su introducción en Toyota cuando se convirtieron en una técnica, hoy común en la gestión de la calidad.

Afirmaba Shingo que la causa de los errores estaba en los trabajadores y los defectos en las piezas fabricadas se producían por no corregir a aquéllos, consecuente con tal premisa cabían dos posibilidades u objetivos a lograr con el *poka-yoke*^[34]:

a) Imposibilitar de algún modo el error humano; por ejemplo, los cables para la recarga de baterías de teléfonos móviles y dispositivos de corriente continua sólo pueden conectarse con la polaridad correcta, siendo imposible invertirla, ya que los pines de conexión son de distinto tamaño o forma.

b) Resaltar el error cometido de tal manera que sea obvio para el que lo ha cometido. Shingo cita el siguiente ejemplo: un trabajador ha de montar dos pulsadores en un dispositivo colocando debajo de ellos un muelle; para evitar la falta de éste último en alguno de los pulsadores se hizo que el trabajador cogiera antes de cada montaje dos muelles de la caja donde se almacenaban todos y los depositase en una bandeja o plato; una vez finalizado el montaje, el trabajador se podía percatar de inmediato del olvido con un simple vistazo a la bandeja, algo imposible de hacer observando la caja donde se apilaban montones de muelles.

Actualmente los *poka yokes* suelen consistir en^[34]:

a) Un sistema de detección, cuyo tipo dependerá de la característica a controlar y en función del cual se suelen clasificar.

b) Un sistema de alarma (visual y sonora comúnmente) que avisa al trabajador de producirse el error para que lo subsane.

Las funciones de un sistema *poka yoke* pueden ser dos: realizar inspecciones al cien por ciento y si ocurren anomalías puede realizar inmediata acción y retroalimentar con información acerca del origen de las fallas. Los efectos de los métodos *poka yoke* en la reducción de defectos diferirán dependiendo de los sistemas de inspección con los que se les combine: inspecciones en la fuente, auto chequeos, o chequeos sucesivos.

De acuerdo con sus propósitos, los sistemas poka yoke caen en las categorías o tipos de funciones reguladoras, o en las categorías de funciones de fijación, de acuerdo con las técnicas que usen.

Los Poka Yoke de funciones reguladoras realizan dos funciones reguladoras^[34]:

- Métodos de Control
- Métodos de Aviso

Los métodos de control son los aquellos en los que, cuando ocurren anomalías, paran las máquinas o las bloquean para parar las operaciones, previniendo por tanto la ocurrencia de defectos en serie. Tales métodos tienen una función reguladora más poderosa que las del tipo aviso.

Los métodos de aviso son los que llaman la atención de los trabajadores cuando ocurren anomalías activando un zumbador o una luz. Como los defectos continúan ocurriendo si los trabajadores no advierten estas señales, este enfoque provee una función reguladora menos poderosa que los métodos de control.

Por otra parte las funciones de fijación de los sistemas poka yoke pueden dividirse en tres categorías:

- Métodos de Contacto
- Métodos de Valor Fijo
- Métodos de Pasos de Movimiento

Los métodos de contacto son los métodos en los que los mecanismos sensibles detectan anomalías en la forma o dimensiones del producto; tanto se haga contacto o no entre los productos y los mecanismos sensibles, sin embargo, se les denominan métodos de contacto.

Los métodos de valor fijo son los métodos en las que las anomalías se detectan verificando un número especificado de movimientos en los casos en los que las operaciones deben repetirse un predeterminado número de veces.

Los métodos de pasos de movimiento son los métodos en los que las anomalías se detectan detectando los errores en los movimientos estándares en los casos en los que las operaciones tienen que realizarse con movimientos predeterminados; estos métodos, extremadamente efectivos tienen un amplio rango de aplicaciones y la posibilidad de su uso tiene que examinarse en cualquier caso cuando se consideren las funciones de fijación poka yoke^[34].

Los errores provenientes del factor humano se pueden deber a las siguientes causas^[34]:

- a) Olvidar: el olvido del individuo

- b) Mal entendimiento: un entendimiento incorrecto/inadecuado
- c) Identificación: falta de identificación o identificación inadecuada
- d) Conocimiento de Principiante o Novatez: Por falta de experiencia del individuo
- e) Indolencia: errores producidos a propósito por ignorar reglas ó políticas
- f) Desapercibimiento: por descuido pasa por desapercibida alguna situación.
- g) Lentitud: por lentitud del individuo o algo relacionado con la operación o sistema.
- h) Falta de estándares: falta de documentación en procedimientos o estándar de operación(es) o sistema
- i) Sorpresas: por falta de análisis de todas las posibles situaciones que pueden suceder
- j) Intencionales: por falta de conocimiento, capacitación y/o integración del individuo con la operación o sistema se dan causas intencionales

Los sistemas poka yoke tratan de evitar los errores humanos. La realización de una operación obliga a las personas a llevar a cabo acciones repetitivas y la atención permanente para garantizar la calidad del producto produce fatiga y fastidio. La memoria física que adquiere el cuerpo humano, los “automatismos”, contribuye también a olvidar el trabajo y a no concentrarse^[34]. El apéndice “A” muestra un ejemplo de poka-yoke.

1.7.2 Análisis de Barreras de Control

Una barrera de control es una barrera física o administrativa que es necesaria para prevenir eventos o acciones indeseables y son ayudas hechas como parte de las condiciones de trabajo^[35]. De esta forma el análisis de barreras de control es un estudio de una actividad o un proceso que localiza en dónde no existen barreras de control o en dónde son ineficaces.

Para realizar un análisis de barreras de control se deben realizar los siguientes pasos:

- a. Identificar todas las barreras de control existentes (físicas o administrativas).
- b. Evaluar la efectividad de cada barrera de control.
- c. Determinar cómo falla una barrera de control.

- d. Determinar porqué falla una barrera de control.
- e. Determinar dónde habrá que implementar una barrera de control.
- f. Con la información aprendida de todas las fuentes de información, validar los resultados del análisis de barreras de control.

El apéndice “B” muestra un ejemplo de un análisis de barreras de control.

1.7.3 Diagrama Factor Evento-Causa

Un diagrama factor evento-causa (DFEC) es un diagrama de flujo que gráficamente despliega un evento entero. El corazón del DFEC es la línea de secuencia de eventos. Cuando se desarrolla un diagrama se selecciona el principio y final para capturar toda la información esencial pertinente de la situación. Cuando se establece una línea de evento se pueden agregar características adicionales tales como condiciones relacionadas, eventos secundarios y conjeturas. Los probables factores causales empiezan a ser evidentes por lo general cuando un factor causal no es obvio se identifica y empieza a ser evidente a través de esta técnica. El DFEC es particularmente útil para situaciones complicadas y complejas y es más explícito que largas descripciones narrativas^[35].

El DFEC provee una excelente oportunidad de desplegar gráficamente barreras de control, cambios, causas y efectos, así mismo mostrar cómo estos están involucrados en los problemas de desempeño humano y del equipo.

La tabla 1.1 muestra los elementos de un DFEC.

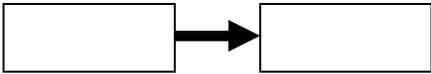
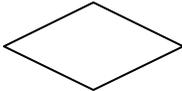
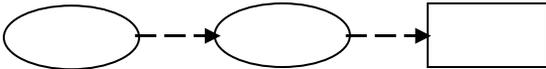
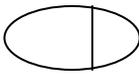
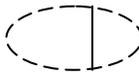
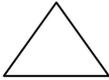
Figura	Descripción
	Evento
	Evento Primario
	Evento No Deseado
	Evento Secundario
	Evento Terminal
	Condiciones
	Evento Presunto
	Factor Causal
	Factor Causal Presunto
	Barrera
	Barrera Fallada
	Cambio

Tabla 1.1 “Elementos de una Diagrama Factor Evento-Causa”. Tomada de [25]

El apéndice “C” muestra un ejemplo de un diagrama factor Evento-Causa.

1.7.4 Análisis de Árbol de Fallas

El análisis de árbol de fallas es una técnica analítica deductiva de confiabilidad, así como un análisis de seguridad que es generalmente usado para sistemas dinámicos

complejos. Este provee una base de objetivos para el análisis y la justificación de cambios y adiciones^[35].

El análisis de árbol de fallas fue desarrollado en 1961 por Bell Telephone. Más tarde la compañía Boeing modificó el concepto a tal punto que el análisis de árbol de fallas es ampliamente usado en muchos campos e industrias.

Como es usado en la actualidad, el análisis de árbol de fallas es un modelo que lógicamente y gráficamente representa varias combinaciones de posibles eventos tanto de actividades normales como de fallas, las cuales ocurren en un sistema que conducirá a los eventos más indeseables. Este análisis usa un árbol para mostrar las relaciones entre las causas y los efectos entre un sencillo evento indeseable (falla) y sus varias causas contribuibles. El árbol muestra las ramas lógicas a partir de una falla sencilla en la parte superior del árbol hasta la causa raíz en la parte inferior del árbol. Para lograr este arreglo son usados símbolos lógicos estándares^[35].

Después de que el árbol ha sido construido y la causa raíz identificada, se pueden determinar las acciones requeridas para prevenir o controlar las causas. Por lo general se asocian probabilidades con la falla indeseable.

El análisis de árbol de fallas siempre (y no de otra forma) complementa al AMEF; en general su aplicación puede ser en un ámbito de sistema o subsistema con enfoque en identificar los factores raíces que pudieran causar una falla, así como sus relaciones independientes. Los beneficios de usar el análisis de árbol de fallas son^[35]:

- a) Ayuda a visualizar el análisis.
- b) Ayuda a identificar la confiabilidad de niveles más altos de ensambles o de un sistema.
- c) Determina la probabilidad de ocurrencia para cada una de las causas raíces.
- d) Provee evidencia documentada del cumplimiento de requerimientos de seguridad.
- e) Evalúa el impacto de los cambios en el diseño o de otras alternativas.
- f) Provee opciones para el análisis de confiabilidad cualitativo y cuantitativo de un sistema.
- g) Permite al analista concentrarse en una falla particular del sistema a la vez y provee al mismo de perspicacia dentro del comportamiento del sistema.
- h) Aísla las fallas críticas de seguridad.
- i) Identifica los modos de falla de un producto que pueden conducir a un accidente.

1.7.4.1 Reglas Generales de Construcción del Análisis de Árbol de Fallas

Cuando se construye un árbol de fallas, el alcance del análisis puede necesitar que sea reducido con el fin de hacerlo más manejable. Esto puede ser realizado al usar un diagrama de bloques, tal como un diagrama de bloques de confiabilidad para el sistema y equipo. Un árbol de fallas separado puede entonces ser construido para cada uno de los bloques. A la inversa, un árbol exitoso puede ser también construido para cada bloque con el fin de identificar que debe ocurrir para que el bloque sea exitoso^[35].

Por esa razón una vez que ha sido definido el nivel más alto “evento de falla” existe una serie de pasos que deben seguirse para analizar y construir propiamente el árbol de fallas^[35]:

Paso 1: Definir el sistema y cualquier suposición para ser usada en el análisis, también definir qué constituye una falla.

Paso 2: Si es necesario simplificar el alcance del análisis, desarrollar un diagrama sencillo de bloque del sistema mostrando las entradas, salidas e interfaces.

Paso 3: Identificar y listar el nivel más alto “evento de falla” a ser analizado. Si es necesario, desarrollar por separado un árbol de fallas para cada nivel superior, dependiendo de cómo es definido el nivel superior y de la especificación del evento o alcance del estudio.

Paso 4: Usar los símbolos del árbol de fallas y la forma lógica del árbol para identificar todas las causas contribuibles del evento del nivel superior. En otras palabras, usar el razonamiento deductivo, para identificar qué eventos pueden causar que el evento del nivel superior ocurra.

Paso 5: Pensar en las causas del paso 4 así como en los efectos intermedios, continuar con el árbol lógico para identificar causas para los efectos intermedios.

Paso 6: Desarrollar el árbol de fallas hasta el nivel más inferior de detalle requerido para el análisis.

Paso 7: Una vez completado, analizar el árbol de fallas para comprender la lógica y las interrelaciones de varios modos de falla y ganar comprensión de los modos únicos de falla. Adicionalmente este proceso de análisis debe enfocarse en aquellas fallas que potencialmente sean más viables de ocurrir.

Paso 8: Determinar donde la acción (de prevención o corrección) es necesaria o el cambio en el diseño es requerido para eliminar los modos de falla tanto como sea posible, o identificar cualquier control que pudiera contener la posible ocurrencia de la falla.

Paso 9: Documentar el análisis de proceso y entonces dar seguimiento para asegurar que todas las acciones apropiadas sean tomadas.

Una vez que los símbolos apropiados y la descripción de eventos ha sido desarrollada, el siguiente análisis del árbol de fallas involucra el cálculo de la probabilidad de ocurrencia del nivel superior. Para hacer esto los valores de la probabilidad de ocurrencia de los niveles inferiores son requeridas^[35],

$$P(\text{Falla de Sistema}) = 1 - ([1 - P(1)] [1 - P(2)] [1 - P(3)] \dots [1 - P(n)])$$

Donde $P(n)$ = Probabilidad de Ocurrencia del Evento n

Cuando la probabilidad de ocurrencia de los niveles inferiores ha sido determinada, la probabilidad de ocurrencia del nivel superior puede ser calculada usando técnicas de probabilidad de álgebra Booleana. En la mayoría de los casos será más conveniente hacer uso de la computadora para llevar a cabo estos cálculos. Una aproximación alterna para calcular la probabilidad de ocurrencia del nivel superior es convertir el árbol de fallas a su equivalente diagrama de bloques de confiabilidad.

Para hacer esta conversión cuando se usa el árbol de fallas un símbolo "O" corresponde a bloques en serie del diagrama de confiabilidad, y un símbolo "Y" corresponde a bloques en paralelo del diagrama. De esta manera la ecuación de confiabilidad del sistema en serie es:

$$R_{\text{sys}} = R_1 \times R_2 \times R_3$$

Donde R_1 = Confiabilidad del Elemento 1 = $1 - P(\text{Falle Elemento 1})$, así mismo

$$R_{\text{sys}} = \text{Confiabilidad del Sistema} = 1 - P(\text{Falle el Sistema})$$

La confiabilidad del sistema para un diagrama de confiabilidad de bloques en paralelo es:

$$R_{\text{sys}} = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)]$$

Donde R_1 = Confiabilidad del Elemento 1 = $1 - P(\text{Falle Elemento 1})$, así mismo

$$R_{\text{sys}} = \text{Confiabilidad del Sistema} = 1 - P(\text{Falle Sistema})$$

El punto final para el análisis de árbol de fallas es la idea acerca del o de los árboles de éxito. Los árboles complementarios ayudan a identificar factores que contribuyen a tener funciones robustas. El análisis de árbol de fallas identifica las posibles causas de una falla. A la inversa, si se desea diseñar una función ideal se deben representar sus relaciones con otros elementos mediante un árbol de éxito, un árbol de éxito es el complemento del árbol de fallas y se enfoca en que debería pasar en el evento del nivel superior para que sea un éxito^[35].

Por esa razón un árbol de fallas puede convertirse en un árbol de éxito al cambiar cada símbolo de "O" por un símbolo de "Y" y viceversa (se tendrán que volver a escribir las declaraciones dentro de los bloques a sus respectivos complementos,

declaraciones de éxito en vez de declaraciones de falla, deben realizarse). Para una conversión exitosa la misma metodología y los símbolos lógicos apropiados así como el árbol de fallas deben ser usados para llegar al árbol de éxito.

El árbol de éxito parte del hecho (para que un sistema sea exitoso) que los bloques en serie sean todos exitosos. Entonces el símbolo “Y” corresponde a bloques en serie. Mientras tanto el símbolo “O” corresponde a bloques en paralelo.

El beneficio de un árbol de éxito es que ayuda en la evaluación cuantitativa de la predicción de la confiabilidad usando el mismo procedimiento que en el árbol de fallas. La probabilidad de ocurrencia del nivel superior de un árbol de éxito es la probabilidad de éxito, la cual por definición es la confiabilidad R. Debido a este hecho, el árbol de éxito puede ser usado como un modelo de predicción de la confiabilidad.

Si un árbol de éxito ha sido desarrollado para un producto y la probabilidad de ocurrencia ha sido determinada para cada causa, la confiabilidad del producto puede ser determinada al calcular la probabilidad de éxito del nivel superior^[35].

Las tablas 1.2 y 1.3 muestran los elementos de un árbol de fallas.

El apéndice “D” muestra un ejemplo de un árbol de fallas.

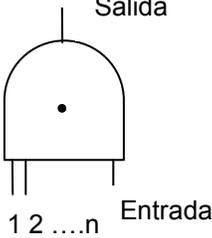
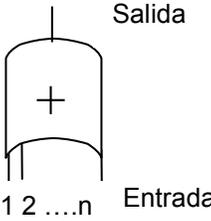
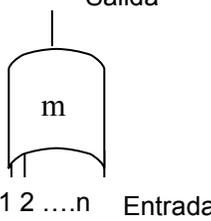
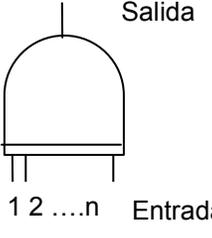
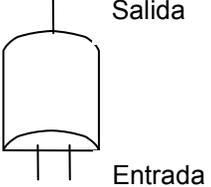
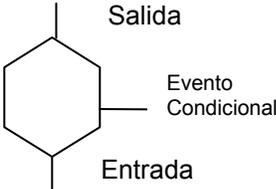
Nombre del Símbolo	Símbolo	Relación Entrada-Salida
Y		La salida ocurre si todas las entradas de n ocurren
O		La salida ocurre si al menos una de las entradas de n ocurre
m-salida-de-n		Ocurren m o más salidas de m si n entradas ocurren
Prioridad Y		La salida ocurre si todas las entradas ocurren en un cierto orden
Exclusivo O		La salida ocurre si sólo una de las entradas ocurre
Impedir		La entrada causa la salida sólo si es un evento condicional

Tabla.1.2 "Elementos de un Árbol de Fallas". Tomada de [35]

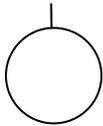
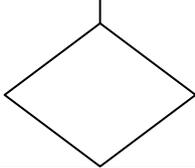
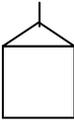
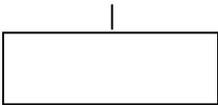
Símbolo del Evento	Significado del Símbolo
	Evento Básico
	Evento No Desarrollado
	Evento Condicional
	Evento de Accionamiento
	Evento Resultante
dentro   dentro	Eventos de Transferencia Fuera o Transferencia Dentro

Tabla 1.3 "Elementos de una Árbol de Fallas". Tomada de [35]

1.7.5 Árbol de Variables Críticas de Calidad (CTQ's)

El término CTQ son las siglas en inglés de "Critical to Quality". Un CTQ o una variable crítica de calidad representa una característica de un producto o servicio que es definida por un cliente externo o interno; ésta puede ser un objetivo de beneficio económico, un factor de alto riesgo, requerimientos regulatorios o de seguridad, un objetivo de calidad, o bien una variable crítica a un proceso o al diseño de un

producto^[36]. El CTQ o variable crítica de calidad deber ser siempre medible y guiar los esfuerzos de mejora de procesos o de diseño de un producto, ya sea como: una variable, o un objetivo de calidad, o un objetivo de beneficio económico^[36].

Así que el árbol de CTQ's o de variables críticas de calidad, es un diagrama que estratifica ideas progresivamente a detalle. El objetivo es la partición de una gran idea o problema en pequeños componentes, haciendo la idea más fácil de entender o el problema más fácil de resolver^[36].

Las figuras 3.5 y 3.6 muestran ejemplos de árboles de variables críticas de calidad.

1.7.6 Diagrama de Flujo de Proceso

Este es la secuencia de flujo en las operaciones entre los procesos. Son usados símbolos estándares para cada uno de los procesos. El diagrama de flujo es usado primeramente antes de aplicar un AMEF^[36].

Las figuras 3.3 y 3.4 muestran ejemplos de diagramas de flujo.

1.7.7 Croquis, Planos y Esquemas

Estos diagramas representan la forma en que el producto o proceso está propuesto. El propósito de usar estos diagramas es ganar un mejor entendimiento del sistema que está siendo estudiado por el equipo de análisis. Usando esta información, el equipo puede ganar más información objetiva con respecto a^[36]:

- a) El tamaño general: el tamaño relativo del componente y el proceso de operación.
- b) La totalidad de espacio ocupado: cómo el sistema encaja dentro del sistema total. Específicamente, información acerca de accesibilidad y utilidad son de interés.
- c) El número de artículos: cuál es la cantidad de piezas, o el número de dispositivos y/o herramientas en operación.

El apéndice "E" muestra un ejemplo de un esquema de proceso.

1.7.8 Matriz Causa-Efecto

Para mejorar un proceso, necesitamos saber cuáles son las variables de entrada y en qué medida éstas afectan a las variables de salida. La matriz causa-efecto nos ayuda a priorizar las posibles causas que afectan a la variable de salida^[36].

La matriz causa-efecto tiene por objeto calificar y priorizar las entradas del proceso generadas tanto en el diagrama de flujo como en diagrama causa-efecto. Dicha calificación se basa en la experiencia. La matriz causa y efecto también establece las variables a revisar con las herramientas estadísticas (prueba de hipótesis y diseño de experimentos).

Las figuras 3.7, 3.8, 3.11 y 3.12 muestran ejemplos de matrices causa-efecto.

1.7.9 Diagrama Causa-Efecto

El diagrama causa-efecto o diagrama Ishikawa es una herramienta visual usada para organizar lógicamente posibles causas al ser dispuestas a detalle en las espinas del diagrama para un problema específico o efecto^[37] (cabeza del diagrama)¹.

La relación causa-efecto gobierna todo lo que acontece en un problema a tal grado que es un camino efectivo en la resolución de un problema, al conocer las causas. Algunas se podrán controlar, cambiar o modificar para cumplir objetivos y metas.

Las figuras 3.9 y 3.10 muestran ejemplos del diagrama causa-efecto.

1.7.10 Plan de Control

Un plan de control es un resumen escrito de las acciones planeadas para la calidad de un proceso específico, producto o producto-servicio. El plan de control lista todos los parámetros de proceso y características de diseño consideradas como importantes para la satisfacción del cliente, lo cual requiere de planear acciones específicas de calidad.

Un típico plan de control incluye^[38]:

- a) Una lista de características críticas o significantes.
- b) Tamaños de muestra y frecuencia de evaluación.
- c) Método de Evaluación.
- d) Acciones de Reacción o Acciones correctivas.

El apéndice “F” muestra un ejemplo de un plan de control.

1.7.11 Despliegue de la Función de Calidad

El despliegue de la función de calidad (Quality Function Deployment, QFD por sus siglas en inglés) es una metodología sistemática que conlleva de manera conjunta las varias facetas dentro de una corporación (de forma planeada) y las encauza hacia un enfoque sobre la voz del cliente. La voz del cliente desde la perspectiva de la QFD es para interpretar correctamente las necesidades, requerimientos y expectativas del mismo^[39].

Cuando se empieza la planeación de un proceso con un objetivo específico, la QFD puede ayudar a identificar las debilidades y las fortalezas. Ésta estimula una aproximación holística comprensiva para el desarrollo de un producto.

La implementación de la QFD puede proveer los siguientes beneficios^[39]:

a) Beneficios Estratégicos:

- Reduce costos
- Pocos cambios de ingeniería
- Menor tiempo de ciclo
- Aumenta la participación del mercado
- Reduce la variación de proceso

b) Beneficios Operacionales:

- Vincula conjuntamente otras tecnologías de calidad
- Aumenta la comunicación
- Identifica requerimientos en conflicto
- Preserva información para el futuro

La QFD es una herramienta que identifica los requerimientos del cliente, las características de las partes o del producto, las operaciones de manufactura y los requerimientos de producción. Cada uno de estos está interrelacionado y rastreado a través de la QFD, hasta que todo lo concerniente ha sido resuelto.

La QFD y el AMEF tienen mucho en común. Ambas apuntan a la mejora continua; ambas se enfocan a la eliminación de fallas y las dos buscan la satisfacción de los clientes.

A causa de esta coincidencia, se puede pensar que pueden ser usadas alternándose. Y no sólo eso: la QFD debe ser desarrollada primero y con base en sus resultados el AMEF se desarrollará a continuación. Sin embargo, esta interacción de herramientas está más destinada a la realización de un diseño^[39].

El apéndice “G” muestra un ejemplo de una casa de la calidad (QFD).

1.7.12 Estudio de Capacidad de Proceso

Un proceso operando en control puede o no operar dentro de las especificaciones establecidas por el cliente. Si el proceso exhibe control estadístico, las estimaciones del proceso como el promedio y la desviación estándar pueden ser usadas para determinar la capacidad del proceso para cumplir con las especificaciones del cliente.

El estudio de capacidad de proceso compara la capacidad del proceso (voz del proceso) con los límites de especificación (voz del cliente) de acuerdo a la siguiente expresión^[40]:

$$\frac{\text{Voz del Cliente}}{\text{Voz del Proceso}} = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = Cp$$

donde σ =desviación estándar del proceso, LSE=Límite Superior de Especificación, LIE=Límite Inferior de Especificación.

De tal forma el índice Cp indicará la capacidad del proceso para cumplir con los límites de especificación del cliente (interno o externo). Por otra parte, se utiliza otro índice de capacidad denotado como Cpk. Este índice representa el centrado del proceso con respecto a los límites de especificación, es decir el Cp indica si el proceso está dentro de los límites de especificación, mientras el Cpk indica si el proceso está centrado con respecto a los límites de especificación. Para el cálculo del Cpk se utiliza la siguiente expresión:

$$C_{pu} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma}$$

$$C_{pl} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma}$$

$$C_{pk} = \min\{C_{pu}, C_{pl}\}$$

donde μ =media del proceso

De esta forma el estudio de capacidad de proceso afecta muchas decisiones tales como inversión de capital para reducir variación en el proceso, acuerdos contractuales, y validación de beneficios obtenidos con mejoras al proceso.

Las figuras 3.17, 3.18, 3.20 y 3.21 muestran los resultados de estudios de capacidad de proceso.

1.7.13 Prueba de Hipótesis

Una prueba de hipótesis es una herramienta de inferencia estadística basada en una hipótesis estadística. Una hipótesis estadística es un enunciado o afirmación ya sea acerca de los parámetros de una distribución de probabilidad o de los parámetros de un modelo^[41]. La hipótesis refleja alguna conjetura acerca de la situación de un problema. Por ejemplo se tienen dos muestras con media μ_1 y μ_2 respectivamente y se quiere desarrollar una hipótesis estadística para comprobar si las medias son iguales, de esta manera se tiene:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

Al enunciado $H_0: \mu_1 = \mu_2$ se le llama la hipótesis nula y a $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$ se le llama hipótesis alternativa. A la hipótesis alternativa que se especifica aquí se le llama hipótesis alternativa de dos colas porque sería verdadera si $\mu_1 < \mu_2$ o si $\mu_1 > \mu_2$.

Para probar una hipótesis se proyecta un procedimiento para tomar una muestra aleatoria, calcular un estadístico de prueba apropiado para después rechazar o no rechazar la hipótesis nula H_0 . Parte de este procedimiento consiste en especificar el conjunto de valores del estadístico de prueba que llevan al rechazo de H_0 . A este conjunto de valores se le llama región crítica o región de rechazo de la prueba.

Pueden cometerse dos tipos de errores cuando se prueban hipótesis. Si la hipótesis nula se rechaza cuando es verdadera, ha ocurrido un error tipo I. Si la hipótesis nula no se rechaza cuando es falsa, se ha cometido un error tipo II. Las probabilidades de estos dos errores se expresan con símbolos especiales:

$$\alpha = P(\text{error tipo I}) = P(\text{rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es verdadera})$$
$$\beta = P(\text{error tipo II}) = P(\text{no rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es falsa})$$

El procedimiento general en la prueba de hipótesis es especificar un valor de la probabilidad α del error tipo I, llamado con frecuencia nivel de significación de la prueba, y después diseñar el procedimiento de prueba de tal modo que la probabilidad β del error tipo II tenga un valor convenientemente pequeño.

El apéndice “H” muestra el estadístico de prueba o la herramienta estadística a utilizar para el tipo de dato (discreto o continuo) de la variable de entrada (x) y de la variable de salida ($y=f(x)$)^[42].

El apéndice “I” muestra un resumen del análisis de prueba de hipótesis en el caso en que “ x ” (variable de entrada) sea discreto y “ y ” (variable de salida) sea continuo^[42].

1.7.14 Diseño de Experimentos

El diseño de experimentos es una forma muy especial de conducir un experimento o un estudio. Ciertas variables independientes son modificadas a un plan predefinido, y sus efectos son determinados sobre una variable dependiente^[41].

El diseño de experimentos es usado en pruebas de confiabilidad y puede identificar factores primarios que causan un evento indeseable. El óptimo uso del diseño de experimentos en aplicaciones de AMEF es cuando existe un interés acerca de varias variables independientes y/o una interacción de efectos de factores causales.

La pregunta de si usar o no la clásica aproximación ó la opuesta aproximación de Taguchi en el proceso de experimentación es siempre una interesante discusión.

Para algunos autores la aproximación de Taguchi no esta bien fundamentada, sin embargo, para otros autores la aproximación clásica tiene más limitantes de uso bajo ciertas circunstancias que la aproximación de Taguchi^[41].

Desde la perspectiva de los expertos en el tema de la aplicación del diseño experimental como herramienta complementaria del AMEF. Mientras el analista esté conforme con alguna, los resultados no serán un factor de mayor importancia^[41].

En este capítulo se ha expuesto el Marco Teórico, mediante el cual se plasmaron conceptos, teorías y herramientas que servirán de base para resolver las siguientes tres incógnitas:

- a) ¿Cuál es la escala de ponderación que debe utilizarse en una Organización de Servicio, para calificar en una falla la severidad, la ocurrencia y la detección?.
- b) ¿Cómo se pondera la ocurrencia de una falla cuando es afectada por la variable tiempo o por alguna otra variable externa a la ocurrencia, en una Organización de Servicio?.
- c) ¿En qué momento y como se debe redefinir el número de prioridad de riesgo del AMEF, en una Organización de Servicio?

El capítulo II retoma lo expuesto en este capítulo y primeramente justifica porqué el AMEF es una herramienta de prevención a tomar en cuenta en los servicios. Así mismo el capítulo II desarrollará la metodología para resolver las tres incógnitas anteriores (incisos a, b, c).

BIBLIOGRAFIA CAPÍTULO I

1. ANSI/ASQC A3-1978 (1978). **Quality Systems Terminology**, E.U.A, American National Standards Institute.
2. ISO 8402 (2000). **Quality management and Quality Assurance Vocabulary**, Suiza, International Organization for Standardization.
3. BS4778-3.2:1991 (1991). **Vocabulary, Quality assurance, Quality control, Reliability, Maintenance, Quality Assurance Systems, Availability**, Reino Unido, The British Standards Institute.
4. IEC50(191) (1990). **International Electrotechnical Vocabulary**, Suiza, International Electrotechnical Commission.
5. MIL-STD 882D (2000). **Standard Practice for System Safety**, E.U.A, Defense Department.
6. SAE ARP5580 (2001). **Recommended Failure Modes and Effects Analysis (Fmea) Practices for Non-Automobile Applications**, E.U.A, Society of Automotive Engineers.
7. SAE Technical Paper Series 2001-01-0375 (2001). **FMERA: Failure Modes, Effects and Financial Risk Analysis**, E.U.A, Society of Automotive Engineers.
8. "AMEF"
<http://www.aiag.org/files/FMEAIMprovementFinal.pdf>,
7/03/07
9. "AMEF"
<http://www.isixsigma.com/forum/showmessage.asp?messageID=46429>,
7/03/07
10. "AMEF"
<http://elsmar.com/FMEA/>,
7/03/07
11. "AMEF"
http://www.1stnclclass.com/risk_analysis.htm,
7/03/07
12. Rausand, M. y Al Hoyland A. (2004). **System Reliability Theory**, E.U.A, Wiley- Interscience.
13. Blanche, K.M. y Shrivastava, A.B. (1994). **Define Failure of Manufacturing Machinery and Equipment**, Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1994, E.U.A, p69-75.
14. Henley E.J. y Kumamoto H. (1991). **Reliability Engineering and Risk Assessment**, E.U.A, Prentice Hall.
15. Pham, H. (2002). **Handbook of Reliability Engineering**, E.U.A, Springer-Verlag.
16. NUREG/CR-6268 (1998). **Common Cause Failure Data Collection and Analysis System**, E.U.A, Nuclear Regulatory Commission Vol1.
17. Modarres, M. (2000). **Reliability Engineering and Risk Analysis**, E.U.A, Marcel Dekker.
18. Kuo, W. (2003). **Optimal Reliability Modeling**, E.U.A, John Wiley & Sons.
19. Pham, H. (2001). **Recent Advances in Reliability and Quality Engineering**, E.U.A, World Scientific Publishing.
20. IEC61508 (1997). **Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems**, Suiza, International Electrotechnical Commission.
21. Rao, S. (1992). **Reliability Based Design**, E.U.A, McGraw-hill.
22. Birolini, A. (1999). **Reliability Engineering: Theory and Practice**, E.U.A, Springer.
23. Stigler, Stephen. (1983). **The Bayes Theorem Discovery**, The American Statistician Vol.37 No.4, E.U.A, p290-296.
24. Montgomery, D. (2002). **Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería**, México, Limusa-Wiley.
25. Ammerman, M. (1998). **The Root Cause Analysis Handbook**, E.U.A, Productivity Press.
26. Robinson, C. (2005). **Preparing for the Unexpected**, Journal for Quality and Participation Vol-28 No.1, E.U.A, p26-29
27. Rooney, J. y Al Hopen, D. (2005). **On the Trail to a Solution**, Journal for Quality and Participation Vol-28 No.2, E.U.A, p15-21
28. Goodwin, P. y Wright G. (2004). **Decision Analysis for Management Judgment**, E.U.A, Wiley & Sons.
29. Virine, L. y Trumper, M. (2008). **Project Decisions: The Art and Science**, Austria, Management Concepts.
30. "Toma de Decisiones"
<http://cogsci.uwaterloo.ca/Articles/Pages/how-to-decide.html>,

13/07/2007.

31. Manno, I. (1999). **Introduction to the Monte Carlo Method**, Hungría, Akadémiai Kiadó.
32. Bevilacqua, M. (2000). **Monte Carlo Simulation Approach for Modified FMECA in a Power Plant**, Quality and Reliability Engineering International Vol-16 Julio-Agosto, E.U.A, p313-324
33. Brans, J.P. y Mareschal B. (1999). **Promethee Methods**, Bélgica, Service de Mathematiques de la Gestion Universite Libre de Bruxelles.
34. Fernandez, R. (1990). **Tecnologías para el Cero Defectos**, España, Tecnologías de Gerencia y Producción.
35. Ammerman M. (1998). **The Root Cause Analysis Handbook**, E.U.A, Productivity.
36. Michael L. George (2003). **Lean Six Sigma for Service: How to Use Lean Speed and Six Sigma Quality to Improve Services and Transactions**, E.U.A, McGraw-Hill.
37. "Diagrama Causa y Efecto"
http://www.isixsigma.com/dictionary/Cause_and_Effect_Diagram-201.htm,
5/10/2007.
38. Stamatis D.H. (2003). **FMEA from Theory to Execution**, E.U.A, ASQ Quality Press.
39. "QFD"
http://www.qfdlat.com/Herramientas_QFD/herramientas_qfd.html,
07/01/08.
40. Banks Jerry (1989). **Principles of Quality Control**, E.U.A, John Wiley & Sons.
41. Montgomery, D. (2004). **Diseño y Análisis de Experimentos**, México, Limusa-Wiley.
42. Montgomery, D. (1990). **Probability and Statistics in Engineering Management Science**, E.U.A, John Wiley & Sons.

Capítulo II

Problemática y Metodología

2.1 Problemática

En los servicios aún no se cuenta con herramientas óptimas de prevención de fallas, por lo que se propone la aplicación del AMEF como una opción. Tampoco existe una metodología detallada para realizar la ponderación de los tres parámetros del AMEF (severidad, ocurrencia y detección) para el caso particular de los servicios, por lo que se deberán desarrollar criterios para ponderar estos parámetros, estudiando previamente el comportamiento y las necesidades de los procesos en los servicios.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

Establecer criterios para la aplicación del AMEF en los sistemas de calidad del sector de servicios.

2.2.2 Objetivos Específicos

- a) Establecer la ponderación de la severidad para el sector de los servicios.
- b) Establecer la ponderación de la ocurrencia para el sector de los servicios.
- c) Establecer la ponderación de la detección para el sector de los servicios.
- d) Mostrar que el AMEF es más eficiente como herramienta de prevención de errores y fallas, si interactúa con otras herramientas de calidad.

2.3 Hipótesis

Sobre la base de un sustento teórico y probabilístico que permitan la ponderación de los tres parámetros del AMEF, -severidad, ocurrencia y detección-, es posible establecer criterios particulares para aplicar dichos parámetros en el sector de los servicios.

2.4 Justificación

En los servicios, las características que definen a la calidad difieren del caso de las organizaciones de manufactura. Algunos aspectos que se deben cuidar en la calidad del servicio comprenden algunos cuestionamientos como los siguientes^[1]:

- ¿Cuánto tiempo debe esperar un cliente?
- ¿Con qué puntualidad se entregará el servicio?
- ¿Están incluidos todos los términos o artículos del pedido?
- ¿Existe cortesía por parte del personal?
- ¿Se proporciona el servicio de igual modo a todos los clientes?
- ¿Es fácil de obtener el servicio?
- ¿Se proporciona el servicio bien a la primera vez?
- ¿Puede reaccionar con rapidez el personal frente a problemas inesperados?

En los servicios las características de calidad no podrían ser las obvias, sin embargo las percepciones del cliente en cuanto al servicio resultan críticas para poder establecer los parámetros de un servicio con calidad como se verá en el apartado 2.4.1.

Los servicios han adoptado sistemas de aseguramiento de la calidad bien elaborados. Pero, en un principio la mayor parte de estos eran analogías en general de los sistemas industriales^[2]. La eficacia de los sistemas de calidad de manufactura se mide por lo general en términos de producción por período de tiempo, o por la cantidad de merma y reproceso que se genera. Aparentemente, en los sistemas de calidad de los servicios también se tendrían estas mismas mediciones, sin embargo, en muchos otros servicios la calidad no se podría evaluar en términos de estos tres parámetros tan concretos^[3]. Resulta de mayor importancia tomar en consideración la conducta que asume el cliente antes, durante y después del proceso o transacción del servicio y también de evaluar la competencia del personal involucrado en brindar el servicio al cliente; por ejemplo, los gerentes de los bancos se han dado cuenta de que las cajeras amigables son un factor que retiene a los cuentahabientes.

Por otro lado muchos servicios manejan un mayor número de clientes particulares o potenciales para acceder al servicio, por lo que la imagen resulta en un factor principal que modela las expectativas del cliente en relación con un servicio, de igual forma establece normas por las que los clientes evalúan a ese servicio^[4].

Por todo esto, resulta de importancia tratar una introducción al estudio del comportamiento de los aspectos críticos a la calidad del servicio y a la satisfacción del cliente en los servicios, así como el análisis de las variables que constituyen factores críticos de éxito para las organizaciones de servicio, y de esta forma poder establecer posteriormente que contribución y bondades otorga el AMEF en la realización de éstos.

2.4.1 Introducción al Sector de Servicios

Las entidades dentro del sector de los servicios son denominadas organizaciones de servicio. Muchas organizaciones de servicio son negocios que obtienen ganancias tales como restaurantes, hoteles, tiendas de autoservicio, etc. Sin embargo, algunas otras organizaciones no obtienen ganancias, tal es el caso de las universidades públicas y de algunas oficinas gubernamentales. A pesar de esto, en cualquier organización de servicio, uno o más tipos de servicio son provistos a los clientes. El sector de servicio exhibe distintas características que no se encuentran en el sector de las industrias de manufactura. Basado en el trabajo de Sasser, Olsen y Wyckoff (1978) estas distintas características incluyen^[5]:

- a) Muchos Servicios son Intangibles.
- b) Muchos Servicios son perecederos; estos no pueden ser inventariados.
- c) Los Servicios por lo general producen una salida heterogénea.
- d) Los Servicios por lo general involucran simultáneamente la producción y el consumo.

De cualquier forma, detrás de estas aparentes diferencias, existen también muchas similitudes entre el sector de manufactura y el sector de servicio. El apéndice “J” muestra un modelo de operaciones genéricas de negocio para compañías orientadas a la manufactura.

Una compañía orientada a la manufactura proveerá uno o varios tipos de productos a sus clientes. En cualquier compañía de manufactura siempre habrá una operación base, la cual por lo general es el desarrollo del producto y el proceso de manufactura. Además de la operación base hay también muchos otros procesos de negocio, tales como la administración de negocio, operación financiera, marketing, personal y administración de proveedores.

El apéndice “K” ilustra un modelo de operación de negocio para muchas organizaciones de servicio. En este modelo, la organización de servicio tiene un corporativo y varias sucursales. Cada sucursal es un proceso de servicio de entrega. El proceso de servicio proporciona a su vez otros servicios a los clientes. Los servicios proveen a los clientes (no importando que tan intangible sea el servicio), un producto-servicio^[6]. Por ejemplo, en un restaurante la comida provista a los clientes y la música tocada pueden ser tratados como un producto-servicio; en el negocio de aseguradoras la póliza de seguro y las cantidades aseguradas pueden también ser tratadas como un producto-servicio. En las organizaciones de servicio el proceso de entrega y el producto-servicio están cercanamente relacionados, muchos de ellos se tratan de eso. Por ejemplo en un restaurante, el proceso de entrega incluye la recepción, la toma de la orden, la operación de la cocina y la operación de la caja. En una aseguradora el proceso de entrega incluye la entrevista con el agente de seguros, el trámite de la póliza de seguro, el trámite para reclamar el seguro y los sistemas de información. Que decir también de las organizaciones de servicio de transporte de mercancías y bienes. Por supuesto, hay muchos otros tipos de organizaciones de servicio como tiendas,

otras como Amazon.com, que interactúan con los clientes mayormente vía Internet. Para estas organizaciones el proceso de servicio está centralizado y los clientes están en cualquier parte del mundo.

Basándose en la clasificación por Schmenner (1994), hay 10 tipos de procesos de servicio como sigue^[7]:

- Oficina
- Servicios Fabriles
- Servicios de Compra
- Servicios de Almacenaje
- Servicios Profesionales
- Servicios Telefónicos
- Servicios de Transporte
- Logística y Distribución
- Cadena de Suministros

No importando que tipo de organización de servicio parezca, hay tres aspectos que son críticos a la calidad del servicio y a la satisfacción del cliente (Ramasmwamy 1996). Estos son^[8]:

Producto-Servicio: El producto-servicio se refiere a los atributos de salida del servicio para los clientes, o a los artículos del servicio provistos para los clientes. Por ejemplo en el servicio de restaurante, el producto-servicio incluye la comida, el uso de los cubiertos, mesas y sillas, así como la música tocada si es necesaria. En los servicios de cuidado de la salud el producto-servicio incluye el diagnostico, el tratamiento y los artículos de cuidado.

Proceso de Servicio de Entrega: El proceso de servicio de entrega se refiere al proceso de entrega del producto-servicio a los clientes o al mantenimiento del producto-servicio. Por ejemplo en la renta de un auto, el proceso de servicio incluye todos los pasos necesarios para rentar el auto al cliente. Estos pasos incluyen recolectar la licencia de manejo, la tarjeta de crédito, checar la disponibilidad del auto, llenar e imprimir el contrato, entregar la llave del auto y ubicar el auto.

Interacción Proveedor-Cliente: En el proceso de servicio, hay también un aspecto de interacción humana, ésta es la que hay entre los clientes y los proveedores del servicio. La calidad de esta interacción ejercerá una gran influencia en la satisfacción del cliente. Por ejemplo, en el negocio de renta de auto, el representante debe dar la bienvenida a los clientes cortésmente, preguntar a los clientes sus preferencias de auto y pacientemente explicar todas sus opciones.

El apéndice “L” da un resumen de las características del producto-servicio, del proceso de servicio de entrega, y de la interacción cliente-proveedor para 10 tipos de procesos de servicio.

2.4.1.1 Factores de Éxito para las Organizaciones de Servicio

Para la ganancia de las organizaciones de servicio, la rentabilidad es uno de los más importantes factores para el éxito. Una alta rentabilidad está determinada por fuertes ventas conjuntamente con costos bajos en la operación entera de la empresa. Es de sentido común que^[9]:

Rentabilidad de Negocio = Ganancia – Costo

siendo

Ganancia = Volumen de Ventas x Precio

Aquí el precio representa un precio sustentable, que es el nivel de precio que el cliente está dispuesto a pagar con satisfacción.

Muchos Investigadores (Sheridan 1994, Gale 1994) encontraron que ambos, volumen de ventas y precio sostenible, son mayormente determinados por el valor del cliente^[10]. En realidad es la opinión del cliente la que determinará el destino de los productos. Las opiniones de los clientes decidirán el nivel de precio, el tamaño del mercado y las tendencias futuras de las familias de estos productos. Cuando un producto tiene un alto valor según el cliente, es por lo general que se ve acompañado de un incremento en la participación de mercado; al incrementar el entusiasmo de un cliente hacia un producto y al haber elogios para el producto como consecuencia se tendrá un precio razonable, un margen de ganancia saludable para la compañía; así mismo se incrementará el reconocimiento de la marca.

Sheridan y Gale proveen una buena definición para el valor según el cliente. Ellos definen el valor del cliente como un beneficio percibido (beneficios) menos un costo percibido (responsabilidades) o específicamente como^[11]:

Valor del cliente = Beneficios – Responsabilidades

Los beneficios incluyen las siguientes categorías:

1. Beneficios Funcionales
 - a) Funciones de producto, niveles de desempeño funcional
 - b) Beneficios económicos, ganancias (por servicios de inversión)
 - c) Calidad y confiabilidad
2. Beneficios Psicológicos
 - a) Prestigio y factores emocionales , tales como reputación de marca

- b) Dependencia percibida (por ejemplo, la gente prefiere una marca conocida sobre una marca desconocida)
 - c) Razones sociales y éticas (por ejemplo, marcas amigables para el medio ambiente o respetuosas de la ecología)
 - d) Impresión psicológica (muchos productos o servicios primerizos en el mercado no sólo pueden proveer funciones únicas sino también dar a los clientes una tremenda emoción psicológica: por ejemplo, la primera copiadora impresionó al cliente)
 - e) Efectos psicológicos de competición
3. Beneficios de servicio y conveniencia
- a) Disponibilidad (la facilidad con la cual el producto-servicio puede ser accedido)
 - b) Facilidad de obtener servicio correctivo en caso de problemas o fallas con el producto-servicio

Las responsabilidades incluyen las siguientes categorías:

1. Responsabilidades económicas
 - a) Precio
 - b) Costo de Adquisición (tal como costo de transportación, costo de embarque, tiempo y esfuerzo gastado para obtener el servicio)
 - c) Costo de uso (costo adicional para usar el producto-servicio en adición al precio de compra, tal como la instalación)
 - d) Costo de Mantenimiento
 - e) Costo de Propiedad
 - f) Costo de Traspaso
2. Responsabilidades Psicológicas
 - a) Incertidumbre acerca de la seriedad del producto-servicio
 - b) Responsabilidad de autoestima cuando se usa un producto-servicio de marca desconocida
 - c) Responsabilidad psicológica de un producto-servicio con bajo desempeño
3. Responsabilidad de servicio y utilidad
 - a) Responsabilidad debida a la perdida de servicio
 - b) Responsabilidad debida a un pobre servicio
 - c) Responsabilidad debida a una pobre disponibilidad (tal como tiempo de entrega, distancia respecto a la tienda)

Incluso para organizaciones de servicio lucrativas no es deseable la pérdida de dinero. En suma, es una meta natural para todas las organizaciones de servicio maximizar el valor del cliente.

Claramente un alto valor del cliente significará altas ganancias y rentabilidad, lo que es una clave para el éxito de los negocios. Por esa razón el éxito de un negocio tiene que ser logrado por los dos siguientes factores de negocio^[12]:

Maximizar el Valor del Cliente
 Minimizar Costos

Entonces surge la siguiente pregunta de importancia en una organización de servicio, ¿Cómo se pueden lograr estos dos factores de negocio?. Esta pregunta puede ser contestada al estudiar la relación entre estos dos factores de éxito (maximizar el valor del cliente y minimizar costos) y con los tres aspectos importantes del servicio (producto-servicio, proceso de servicio de entrega, interacción proveedor-cliente).

El apéndice “M” resume cómo el producto-servicio, el proceso de servicio de entrega y la interacción proveedor-cliente, afectarán el valor asignado por el cliente y el costo total. El apéndice “M” muestra que el excelente producto-servicio, el excelente proceso de servicio de entrega y la excelente interacción proveedor-cliente son claves para crear un alto valor del cliente con bajo costo.

De acuerdo con Rohit Ramaswamy (1996) un excelente producto-servicio, un excelente proceso de servicio de entrega y una excelente interacción proveedor-cliente pueden ser cumplidas por un diseño superior de servicio y una entrega superior de servicio. EL apéndice “N” muestra el contenido del diseño de servicio y las actividades de servicio de entrega y su relación.

El diseño de servicio consta de^[13]:

Diseño del producto-servicio: se refiere al diseño de atributos de salida del servicio hacia los clientes o al diseño de partes del servicio provistos hacia los clientes. Por ejemplo, en un servicio de restaurante, el diseño de producto-servicio incluye un diseño de un menú, de un protocolo de decisiones acerca de los tipos de cubiertos a usar y de protocolos de servicio.

Diseño de instalación de servicio: se refiere al diseño de un plano físico de la instalación donde el servicio es entregado. Por ejemplo, en un restaurante el diseño de la instalación incluye el diseño de la cocina, de la recepción, del comedor interior, la decoración, la disposición de los muebles y la iluminación. La calidad del diseño de instalación afectará directamente el proceso de servicio de entrega, por ejemplo en el restaurante el diseño y la ubicación de la cocina afectarán la calidad y la velocidad del servicio. También el diseño de la fachada (exterior) afectará el proceso de consumo del servicio al igual que la percepción de la calidad del servicio.

Diseño de proceso-servicio: se refiere al diseño del proceso del servicio que es necesario para entregar un producto-servicio a los clientes o al diseño para mantener servicios-productos. Por ejemplo, en el servicio de abrir una cuenta bancaria, el proceso-servicio incluye todos los pasos necesarios para realizar esta operación. Estos pasos incluyen, explicar condiciones y tipos de plazos que maneja el banco, coleccionar credencial de

elector y comprobante de domicilio, llenar y firmar una solicitud, checar historial crediticio, checar aportación inicial y entregar contrato.

El diseño de servicio está relacionado con las actividades de servicio de entrega, éstas últimas incluyen^[14]:

Proceso de Servicio de Entrega: es la ejecución del diseño de proceso-servicio para entregar el producto-servicio deseado a los clientes. El proceso de servicio de entrega ideal puede entregar la rutina del servicio de manera previsible y sin esfuerzo alguno, también tiene la flexibilidad de tratar requerimientos de servicios anormales, servicios personalizados y situaciones difíciles.

Ambiente de Encuentro del Servicio: es el ambiente en el cual el servicio es entregado y donde la interacción proveedor-cliente toma lugar. Por ejemplo, en un hospital el ambiente de servicio incluye todos los lugares donde los pacientes posiblemente estarán, tales como consultorios, salas de emergencia y camas. En muchas operaciones de servicio el encuentro del servicio ocurre con el frente (fachada) de un edificio. Un ambiente de encuentro del servicio limpio, bien iluminado y confortable hará a los clientes sentirse bien.

Interacción Proveedor-Cliente: En un proceso de servicio incluirá tanto la ejecución de los pasos del proceso y la interacción humana, la cortesía, la amabilidad y la paciencia son factores que también harán sentir bien al cliente.

2.4.2 Porqué el AMEF

La visión y percepción acerca del aseguramiento de la calidad construida por Genichi Taguchi, al introducir el concepto de la función de pérdida, afirma que el alcanzar un nivel de calidad superior cuesta menos, ya que cualquier desviación del valor objetivo o cualquier desviación de un requerimiento, incurre en una pérdida financiera de la sociedad que consume dicho producto fuera de especificaciones^[15]. Con la función pérdida, se vislumbra la responsabilidad que debe tener una organización para proveer calidad a los clientes, no sólo como una expresión de competitividad y lucro. En nuestros días y más acentuadamente en nuestra sociedad, es difícil encontrar la percepción Taguchi; la percepción convencional es más acentuada^[16]. Esta percepción convencional no ve el modo en que hace Taguchi la adquisición de un nivel de calidad superior, lo que resulta en una limitante de trascendencia cultural. Las limitantes culturales hacia la calidad pueden derivar en un fuerte obstáculo para que cualquier metodología o herramienta de mejora continua de la calidad sea implantada exitosamente^[17].

A diferencia de la aproximación de Taguchi, la aproximación convencional de la calidad propone que a mayor calidad mayor inversión de recursos, por lo que se tendrán mayores costos de operación. Si analizamos estas dos perspectivas, el

mejoramiento de la calidad involucra lineamientos culturales en donde entran en juego tanto las responsabilidades y beneficios de ambas partes, la del cliente y la del proveedor. Por un lado las exigencias del cliente deben ser con el paso del tiempo mayores y más estrictas, el cliente debe de tomar conciencia que él mismo es el consumidor final y que es también la parte que evalúa la reputación y el destino de una marca. Por el otro lado, los esfuerzos para brindar mayor calidad al cliente por parte de las organizaciones proveedoras deben ser considerados de manera sistémica^[18] involucrando todas sus partes, así como crear un estilo de vida para trabajar con calidad y para la calidad.

Al existir un ámbito cultural propicio de la calidad en una sociedad contemporánea y al haber una toma de conciencia tanto en los clientes como en las organizaciones, habría una mayor preocupación y fomento de actividades para sustentar decisiones de mejoramiento de la calidad (ya sea al momento de producirse o al momento de adquirirse) en todas las esferas de la sociedad. La prevención de contaminantes, ruido y pérdida de tiempo entre otros factores dañinos se incrementaría. De igual forma habría mayores investigaciones y avances en la prevención de fallas y errores potenciales en los procesos y productos.

El AMEF como una herramienta de prevención puede ser utilizado bajo las dos perspectivas de la calidad, la convencional y la de Taguchi. En la primera perspectiva, ayuda a mitigar o eliminar costos debido a fallas o errores en los procesos. De igual forma, en la perspectiva Taguchi contribuye a detectar debilidades en los procesos y en el desarrollo de un producto que podrían incurrir en pérdidas hacia la sociedad.

Como el AMEF es una herramienta de prevención, es importante también abordar la importancia que tiene la prevención en los sistemas de calidad. Si no existe una cultura previa de prevención, difícilmente esta herramienta será utilizada, por lo que parte de esta justificación es resaltar la prevención como vehículo de trascendencia en los sistemas de aseguramiento de la calidad.

2.4.2.1 La Importancia de la prevención en los sistemas de calidad

Un aspecto fundamental para que un sistema de calidad sea exitoso en cualquier rubro, es la prevención de defectos ó no conformidades que puedan presentarse durante cualquier etapa de operación que se esté realizando^[19]. El propósito de la prevención de la calidad es básicamente propiciar, que:

- a) Los productos y servicios sean adecuados y seguros para el usuario
- b) Se identifiquen las deficiencias y se tomen acciones antes de que éstas ocurran
- c) Se identifiquen las oportunidades de mejoramiento y se advierta al personal pertinente

- d) Exista siempre un cumplimiento continuo de las especificaciones o requerimientos del producto o servicio
- e) Se cumplan de manera exitosa los objetivos y metas de la calidad que se persiguen

Actuar preventivamente y no por reacción ante el surgimiento de las dificultades de la calidad, es la cuestión fundamental del aseguramiento de la calidad^[20]. Cuando nos adelantamos a los problemas de la calidad se adoptan medidas que evitarán defectos en los procesos y productos, también se identificarán aquellos factores favorables para obtener una excelente calidad, ésto permite hacer de manera factible operaciones libres de fallas.

La prevención ha sido un aspecto tan importante para el logro de la mejora continua de la calidad, que en los estándares y normas internacionales de calidad es un requisito obligatorio a cumplir.

En la actualidad el sector de los servicios en México ha tenido un auge en la adopción de sistemas de calidad (norma internacional de calidad ISO 9001:2000), derivado de su preocupación por ofrecer servicios que satisfagan las expectativas del cliente y que a su vez, sean servicios más competitivos y rentables. Con esto puede decirse que la prevención es tomada en cuenta y que se realizan esfuerzos de calidad para obtenerla en el sector de los servicios en México.

2.4.2.2 Desarrollo de la Prevención en los Servicios

James R. Evans y William M. Lindsay escriben acerca del aseguramiento de la calidad en los servicios lo siguiente^[21]:

“En las industrias manufactureras se han creado y refinado métodos modernos de aseguramiento de la calidad. La introducción y adopción de programas de aseguramiento de la calidad en los servicios ha quedado por detrás de los de la manufactura. (Administración y Control de la Calidad, 1995).”

Es cierto que la evolución de los sistemas de aseguramiento de la calidad en las empresas de manufactura tiene un mayor peso histórico, entonces puede afirmarse que la prevención de defectos en las empresas de manufactura ha alcanzado un mayor grado de madurez que en la de los servicios^[22].

Las herramientas de prevención en la manufactura permiten^[23]:

- a) Prevenir la ocurrencia de una falla
- b) Reducir ó eliminar las fuentes de variación de un proceso

Estas ventajas han permitido contar con procesos que con el paso del tiempo tienden a ser casi perfectos. Es decir, son procesos insensibles a factores de ruido, ya que son consecuencia de una cadena histórica de mejoras que cada vez

van aportando bondades al proceso, hasta el punto de contar con valores de Cpk mayores o iguales a 2^[24].

Por otro lado, en las últimas 8 décadas fueron desarrolladas herramientas que permitieron el logro de ambiciosos objetivos de la calidad en las empresas de manufactura, a pesar de que algunas de estas herramientas no fueron desarrolladas precisamente en ambientes fabriles o con fines de manufactura, si hubo una adopción no tardía de las mismas en esas organizaciones. Ejemplos de estas herramientas han sido: el CEP, las técnicas de muestreo de aceptación, el diseño de experimentos y últimamente, lean-six sigma, por citar algunas.

Con base en lo anterior se tiene que hacer un análisis de qué herramientas utilizan los servicios para realizar la prevención de fallas, bajo el supuesto de que esta última actividad –la prevención de fallas- exista como tal, ya que de otro modo, al no existir un conocimiento previo de herramientas orientadas a la prevención, se tendrá una prevención pobre ó ésta se hará fundamentada en la prueba y el error o en el peor de los casos no existirá^[25].

2.4.2.3 Debilidades de las herramientas de Prevención en los Servicios

Una de las mayores áreas de oportunidad que tienen los servicios en México para proveer una buena prevención para la calidad de sus servicios, es que utilicen herramientas de descripción estadística conjuntamente con resultados de auditorías de calidad^[26]. Estas dos herramientas ofrecen:

- a) Una base histórica de acontecimientos indeseables, que permite la toma de acciones para su corrección; así mismo, para la retroalimentación de futuras mejoras
- b) La medición de la frecuencia de ocurrencia de un defecto o falla
- c) La identificación de las causas más comunes de un defecto o falla
- d) La identificación de las desviaciones de los objetivos de calidad

Las herramientas de descripción estadística y los resultados de las auditorías de calidad, sin embargo, como a continuación se analizará, no son una base enteramente sólida para ser fuentes de información que sustenten acciones oportunas de prevención.

Las herramientas de descripción estadística carecen de una orientación óptima hacia la prevención, ya que éstas sólo pueden dar información de la ocurrencia y recurrencia de problemas pero no pueden predecir ni ponderar problemas futuros que afecten a la calidad. Así mismo, tienen una orientación con mayor enfoque en los procesos y productos que en el detalle de las operaciones de los procesos, lo que implica una fuerte deficiencia para detectar fallas o defectos futuros. Las

herramientas de descripción estadística presentan debilidades para sustentar una buena prevención debido a que^[27]:

- a) No reflejan efectivamente tendencias que pueden ser una fuente confiable para hacer predicciones acerca del estado futuro de una situación que se esté analizando
- b) No identifican causas especiales de variación en los procesos que sustenten predicciones oportunas
- c) El aplicar herramientas de descripción estadística no segrega las variables críticas de un problema ó fenómeno
- d) No identifican de manera directa causas inherentes de las operaciones que conducen a la falla de un sistema y tampoco sus consecuencias
- e) No identifica las fallas antes de que ocurran
- f) No detectan fácilmente problemas importantes de calidad a corto y mediano plazo
- g) No describen de manera directa la problemática por la que una operación pasa
- h) No ponderan, ni centran su atención de manera directa en atacar aquellas situaciones críticas, riesgosas ó de mayor severidad sobre las que tengan que tomarse acciones de prevención con mayor urgencia
- i) No describen acciones de prevención de manera directa
- j) No describen métodos de reacción para controlar los procesos de futuras causas especiales de variación ó desviación

Con base en lo anterior se puede decir que las herramientas de descripción estadística, no son una herramienta que por sí sola pueda generar información con una orientación eficiente para la prevención.

Por otra parte, se tienen los resultados de las auditorias de calidad que sólo brindan información de problemas de calidad en el presente y en el pasado, por lo que la toma de acciones basadas en las auditorias de calidad vendrían a caer en el rubro de acciones de corrección o acciones de control y no precisamente de una prevención basada en la predicción de problemas futuros. Otra debilidad, es que una auditoria llevada a cabo sin analizar varias fuentes de información de los procesos, así como una descripción detallada de los mismos, vendría a ser una auditoria infructuosa^[28].

2.4.3 Porqué el AMEF en los servicios

El Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF) es una herramienta que surgió originalmente con aplicaciones en la industria militar y espacial. Esta herramienta desde sus comienzos ha tenido una orientación específica para la prevención debido a que^[29]:

- a) Predice problemas
- b) Pondera la toma de acción de problemas más severos
- c) Identifica métodos de control antes de que las fallas ocurran
- d) Identifica causas y consecuencias de los problemas antes de que ocurran
- e) Describe las debilidades de cada etapa de una operación
- f) Permite identificar herramientas de calidad necesarias para la predicción de tendencias, variaciones y desviaciones de los procesos
- g) Describe las acciones más eficientes de prevención
- h) Coadyuva a la disminución de riesgos

Como se puede asumir, el AMEF tiene una orientación con mayores ventajas para la prevención, que las herramientas de descripción estadística y las auditorias de calidad. El AMEF también es una herramienta complementaria al proceso de diseño^[29] para definir positivamente cómo un diseño puede satisfacer al cliente y formula preguntas como: ¿qué puede estar mal con el diseño?, ¿de donde proviene la variación de un elemento del diseño?, ¿qué elemento del diseño puede desviarse del requerimiento?. Como se vio anteriormente, el diseño de servicio es un factor de éxito para las organizaciones de servicio y el AMEF también puede ser utilizado en ésta etapa.

Por otra parte, el AMEF enfocado al proceso ayuda a identificar las tareas o pasos olvidados que generan una falla, así como los elementos del proceso que influyen en que una operación sea susceptible a la falla.

El AMEF ya sea en su orientación de diseño o de proceso califica las acciones de mejora tomadas, lo que permite identificar nuevos modos de falla y acciones de prevención más eficientes. Dando como consecuencia un monitoreo continuo de las acciones de prevención presentes y futuras.

Al ser el AMEF una herramienta de prevención en sí misma, se encuentran mayores ventajas y bondades para que un producto-servicio libre de fallas incremente el valor del cliente, así como para que se reduzcan los costos de la mala calidad (retrabajo, desperdicios, costos de pruebas, costos de inspección,

devoluciones, etc.) y otros costos indirectos^[30] derivados de los costos de mala calidad (retrasos de planeación, penalizaciones de los clientes, rotación de personal, exceso de inventario, etc.). Estos dos factores -incremento de valor de cliente y reducción de costos- son factores de negocio vitales para las organizaciones de servicio como se vio anteriormente.

Un AMEF puede estar orientado también a la disminución de tiempos de entrega, mejorando uno de los factores críticos en la satisfacción del cliente.

Así mismo, si un producto-servicio está libre de fallas, como consecuencia también se tendrá una buena interacción cliente-proveedor, resultando también un aumento del valor del cliente y generándose simultáneamente un incremento en el valor de los beneficios y un decremento en el valor de las responsabilidades, según lo descrito cuando se abordaron estos conceptos.

El objetivo del presente trabajo de investigación será entonces dar los lineamientos para la aplicación del AMEF en el sector de los servicios.

2.5 Metodología

2.5.1 Análisis del Marco Teórico de la Severidad

Al analizar la clasificación de fallas dada en el primer capítulo de este trabajo, se trató de establecer una escala de valores numéricos por medio de la cual sea posible ponderar este primer factor, la severidad. En la industria aeroespacial militar es utilizada una escala de 1 a 4, mientras que en la industria automotriz es utilizada una escala de 1 a 10. A continuación se presenta las tablas con dichas clasificaciones:

Escala	Categoría	Descripción de la Severidad
1	Menor	Falla que no sería suficiente para causar lesión o daño del sistema la cual resultará en mantenimiento no programado o reparación.
2	Marginal	Falla que causa lesión menor o daño menor del sistema la cual resultará en retraso o pérdida de disponibilidad o degradación de la misión.
3	Crítico	Falla que causa lesión severa o daño mayor del sistema la cual resultará en una misión perdida.
4	Catastrófico	Falla que puede causar la muerte o pérdida del sistema de armamento.

Tabla 2.1 “Ponderación Aeroespacial de la Severidad” tomada de [5] Capítulo I

Escala	Categoría	Descripción de la Severidad
1	Ninguno	El modo de falla no tiene ningún efecto.
2	De Muy Poca Importancia	Interrupción de menor importancia a la cadena de producción. Una porción del producto puede ser retrabajado (no se clasifica). Los clientes exigentes notan el defecto.
3	De Menor Importancia	Interrupción de menor importancia a la cadena de producción . Una porción del producto puede ser retrabajado (no se clasifica). La mitad de los clientes notan el defecto.
4	Muy Bajo	Interrupción de menor importancia a la cadena de producción. El producto puede ser clasificado y una porción puede ser retrabajado. La mayoría de los clientes notan el defecto.
5	Bajo	Interrupción de menor importancia a la cadena de producción. 100% del producto puede ser retrabajado. El producto es operable pero un artículo de comodidad es operable a un nivel reducido.
6	Moderado	Interrupción de menor importancia a la cadena de producción. Una porción del producto puede ser desechado (no se clasifica). El producto es operable pero un artículo de comodidad es inoperable.
7	Alto	Interrupción de menor importancia a la cadena de producción. El producto puede ser clasificado y una porción desechada. El producto es operable pero en un nivel reducido de funcionamiento.
8	Muy Alto	Interrupción importante a la cadena de producción. 100% del producto puede ser desechado. El producto es inoperable con pérdida de función primaria.
9	Peligroso Con Alarma	Puede poner en peligro al operador del ensamble. El incidente afecta la operación o la conformidad segura del producto con la regulación del gobierno. El incidente ocurre con alarma.
10	Peligroso Sin Alarma	Puede poner en peligro al operador del ensamble. El incidente afecta la operación o la conformidad segura del producto con la regulación del gobierno. El incidente ocurre sin alarma.

Tabla 2.2 “Ponderación Automotriz de la Severidad” tomada de [6] Capítulo I

Si se utiliza la escala del sector automotriz de la severidad, así como la escala utilizada por la industria aeroespacial militar en los tipos de falla descritos en el primer capítulo, se tiene la siguiente tabla:

Tipo de Falla	Escala Automotriz		Escala Aeroespacial Militar	
	Menor	Mayor	Menor	Mayor
Falla Intermitente	1	10	1	4
Falla Extendida	1	10	1	4
Falla Completa	2	10	1	4
Falla Parcial	2	10	1	4
Falla Repentina	-	10	-	4
Falla Gradual	1	9	1	3
Falla Primaria	1	9	1	3
Falla Secundaria	1	9	1	3
Defectos de Comando	1	10	1	4
Falla de Causa Común	5	10	2	4
Falla de Cascada	8	10	3	4
Dependencia Positiva	8	10	3	4
Dependencia Negativa	1	5	1	-
Fallas simultaneas con dependencia	1	9	1	3

Fallas simultaneas sin dependencia	1	10	1	4
Fallas Peligrosas	-	10	-	4
Fallas Seguras	1	8	1	3
Fallas Peligrosas Indetectables	-	10	-	4
Fallas Peligrosas Detectables	2	9	1	4
Fallas Seguras Indetectables	2	8	1	3
Fallas Seguras Detectables	2	8	1	3
Fallas Aleatorias de Hardware	2	10	1	4
Fallas Sistémicas	1	-	1	-
Fallas de Envejecimiento	2	8	1	3
Fallas de Esfuerzo	2	10	1	4
Fallas de Diseño	2	10	1	4
Fallas de Interacción	2	10	1	4

Tabla 2.3 “Ponderación de la Severidad por Tipo de Falla” Elaboración Propia.

Puede observarse que la severidad al utilizar ambas escalas (automotriz y aeroespacial) tiene sensibilidad, es decir ambas escalas son viables para representar desde el menor efecto hasta el efecto más grave, la magnitud de la severidad varia de acuerdo a la escala. Sin embargo se observa que en la escala de 1 a 4 pueden ser medidos efectos de severidad menores y mayores quizás con menos segregación o variedad que en la escala de 1 a 10. No obstante, la medición de la severidad es adecuada ya que se pueden representar efectos de severidad menores hasta catastróficos. Con la escala automotriz de 1 a 10, pueden ser representados con más amplitud los efectos de severidad de ningún efecto hasta efecto peligroso con alarma. Se observa entonces que ambas escalas son adecuadas para representar la severidad y de la misma manera medir los efectos de severidad.

Sin embargo, el análisis anterior es sólo un análisis cualitativo, el cual puede tener la debilidad de aminorar un efecto de severidad, es decir al clasificar los efectos de forma subjetiva, se podrían tener errores de interpretación de un efecto, provocando que la ponderación de la escala con la cual fueron medidos sea menor o mayor en la realidad. Habría que hacer una prueba estadística para conocer si existe realmente sensibilidad entre las dos escalas. Se propone realizar una prueba de hipótesis basada en los datos de la tabla 2.3 para clasificar los efectos de severidad de las fallas analizadas en el capítulo 1, de esta forma será utilizado un análisis de varianza (ANOVA) para corroborar estos datos. Los resultados del ANOVA se citan a continuación.

Prueba de Hipótesis entre escala aeroespacial y escala automotriz.

Ho: No existe sensibilidad entre escala aeroespacial y escala automotriz

Ha: Existe sensibilidad entre escala aeroespacial y escala automotriz

One-way ANOVA: auto versus aero

Source	DF	SS	MS	F	P
aero	3	751.911	250.637	1314.64	0.000
Error	45	8.579	0.191		
Total	48	760.490			

S = 0.4366 R-Sq = 98.87% R-Sq(adj) = 98.80%

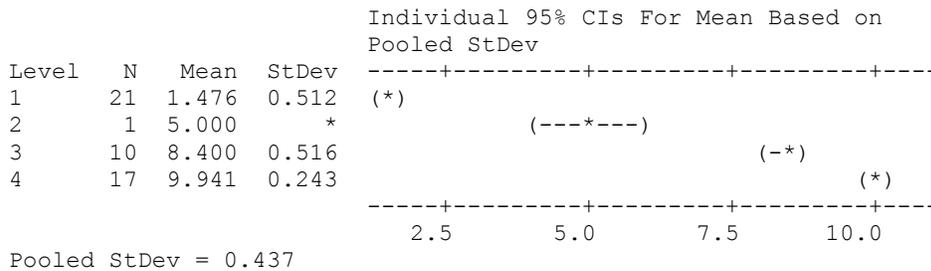


Fig. 2.1 Resultados de Minitab del ANOVA de sensibilidad entre las escalas Aeroespacial y Automotriz

Dado que el valor de $P=0.00 < 0.05$ se rechaza Ho y se acepta Ha, con lo que se concluye que existe sensibilidad entre la escala aeroespacial y la escala automotriz. La sensibilidad de la escala aeroespacial con respecto a la escala automotriz tiene un valor de 98.87% siendo un valor alto; sólo se tendría 1.13% de error, lo que significa un error de sensibilidad muy pequeño. Este análisis de sensibilidad viene a reforzar la conclusión de que existe sensibilidad entre la escala aeroespacial y la escala automotriz.

Por lo anterior puede concluirse que el utilizar una escala de 1 a 10 o de 1 a 4 aporta sensibilidad para medir los efectos de la severidad, pudiendo proponerse una analogía basada en los sistemas aeroespaciales y automotrices para medir los efectos de severidad en fallas que se provocan o se pudieran provocar en los sistemas de servicio. De esta forma se tienen las siguientes tablas:

Escala	Categoría	Descripción de la Severidad
1	Menor	Falla que no sería suficiente para causar pérdida, daño o deterioro de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar.
2	Marginal	Falla que causa pérdida, daño o deterioro menor de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar.
3	Crítico	Falla que causa pérdida, daño o deterioro considerable para afectar negativamente la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar.

4	Catastrófica ó Mayor	Falla que causa la mayor pérdida, daño, deterioro o situación peligrosa (para el cliente final, cliente externo, cliente interno u operario) para afectar negativamente la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar
---	----------------------	---

Tabla 2.4 “Ponderación de la Severidad de los Servicios con escala de 1 a 4 (Elaboración Propia)

Escala	Categoría	Descripción de la Severidad
1	Ninguna	El modo de falla no tiene ningún efecto.
2	Nula	Interrupción de menor importancia al cumplimiento de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar. Sin embargo se pueden implementar acciones de reacción tempranas y eficientes. Los clientes (finales, externos o internos) no lo notan.
3	Muy Baja	Interrupción de menor importancia al cumplimiento de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar. Sin embargo se pueden implementar acciones de reacción tardías y eficientes. Los clientes (finales, externos o internos) no lo notan.
4	Baja	Interrupción de menor importancia al cumplimiento de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar. Sin embargo se pueden implementar acciones de reacción tempranas y eficientes. Máximo el 5% de los clientes (finales, externos o internos) lo notan.
5	Marginal	Interrupción de menor importancia al cumplimiento de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar. Sin embargo se pueden implementar acciones de reacción tempranas y eficientes. Máximo el 10% de los clientes (finales, externos o internos) lo notan.
6	Moderado	Interrupción de menor importancia al cumplimiento de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar. Sin embargo se pueden implementar acciones de reacción tardías y eficientes. Máximo el 5% de los clientes (finales, externos o internos) lo notan.
7	Medio	Interrupción de menor importancia al cumplimiento de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar. Sin embargo se pueden implementar acciones de reacción tardías y eficientes. Máximo el 10% de los clientes (finales, externos o internos) lo notan.
8	Alto	Interrupción de menor importancia al cumplimiento de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar. Se implementan acciones de reacción tardías y no eficientes. Máximo el 5% de los clientes (finales, externos o internos) lo notan.
9	Muy Alto	Interrupción de importancia considerable al cumplimiento de la función, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar. Se implementan acciones de reacción tardías y no eficientes. Más del 10% de los clientes (finales, externos o internos) lo notan.
10	Mayor o Peligroso	Interrupción de importancia mayor al cumplimiento de la función, seguridad, diseño, valor agregado, objetivo de calidad u objetivo de mejora del sistema o proceso del: producto-servicio, valor del cliente, o costo a minimizar. La mitad de los clientes (finales, externos o internos) notan el defecto. No se realiza o conoce ninguna acción de reacción.

Tabla 2.5 “Ponderación de la Severidad de los Servicios con escala de 1 a 10 (Elaboración Propia)

2.5.2 Análisis del Marco Teórico de la Ocurrencia

Para iniciar este análisis debe tenerse presente el índice de falla tal como se presentó en el primer capítulo. Existe una función índice de falla para cada modelo de falla que sigue una distribución de probabilidad. También es importante aclarar que para utilizar la función índice de falla se debe considerar la ocurrencia de una falla como una función dependiente del tiempo. Así que en este apartado se discutirá el comportamiento que tiene la función $z(t)$ para cada distribución de probabilidad. También se verá la escala utilizada para medir la ocurrencia propuesta en un AMEF tradicional con aplicaciones en el sector aeroespacial y en el sector automotriz. Éstas últimas se presentan en las tablas siguientes:

Clasificación	Escala	Ocurrencia
Muy Inverosímil	1	1 vez cada 1000 años ó más, rara vez
Remota	2	1 vez cada 100 años
Ocasional	3	1 vez cada 10 años
Probable	4	1 vez por año
Frecuente	5	1 vez por mes o más frecuente

Tabla 2.6 “Ponderación Aeroespacial de la Ocurrencia” tomada de [5] Capítulo I.

Clasificación	Escala	Ocurrencia
Muy Alto	10	1 de cada 2 o mayor
Muy Alto	9	1 de cada 3
Alto	8	1 de cada 8
Alto	7	1 de cada 20
Moderado	6	1 de cada 80
Moderado	5	1 de cada 400
Moderado	4	1 de cada 2000
Bajo	3	1 de cada 15000
Bajo	2	1 de cada 150000
Inverosímil	1	1 de cada 1500000

Tabla 2.7 “Ponderación Automotriz de la Ocurrencia” tomada de [6] Capítulo I.

Como se puede observar la escala del sector aeroespacial es más reducida y las fallas son menos frecuentes que la del sector automotriz, en parte podría explicarse esto por el hecho de que los sistemas de confiabilidad en el sector aeroespacial son más estrictos que los del sector automotriz. Sin embargo, si se quiere homologar estas escalas a la medición de la ocurrencia de fallas en el sector de servicios, se observa de primera instancia que las escalas del sector aeroespacial no son las más adecuadas para identificar fallas a las que se tuvieran que aplicar acciones preventivas tempranas. Un defecto en una organización de servicio puede ocurrir más de 2 o 3 veces por hora si se habla de una solicitud para abrir una cuenta bancaria o en el pedido en un restaurante, también la ocurrencia de una falla podría ser de minutos o incluso segundos en un proceso de captura de facturas o también de algún tiempo de entrega en un cierto servicio. Puede afirmarse que una escala un poco más apegada a la situaciones que ocurren en una organización de servicio sería la del sector automotriz, sin embargo esa afirmación sería muy apresurada ya que en un principio habría que analizar primeramente si la ocurrencia de fallas en un proceso determinado es o no una función del tiempo, es decir si la ocurrencia de una falla incrementa, disminuye o permanece constante con el paso del tiempo. Para el caso en que la ocurrencia de fallas fuera una función dependiente del tiempo, se tendría que analizar que distribución de probabilidad tiene la ocurrencia de una falla y después habría que adecuar tal ocurrencia con la de la función índice de falla $z(t)$.

2.5.2.1 Ocurrencia de falla no dependiente del tiempo

Es relevante también aclarar que de la manera en que se considere la medición de la ocurrencia de una falla en un servicio, se definirá la forma de establecer que tan recurrente es una falla y con ello su respectiva ponderación para el AMEF; es decir, si la medición de una falla se mide a partir del número de fallas en un determinado período (hora, mes, trimestre, año, por decir algo) el número de fallas será una variable discreta, para tal caso la probabilidad de ocurrencia de una falla seguirá una distribución de probabilidad discreta que podría ser binomial, hipergeométrica, Poisson ó Bernoulli. Para tales casos, por definición, no se podría considerar una función $z(t)$ para dichas distribuciones ya que el tiempo a su

vez es una variable continua. Por tal motivo, cuando se esté midiendo el número de fallas, se podrá utilizar una medición alternativa como sería el caso del DPO o el número de defectos por oportunidad. El DPO es utilizado en la medición de la calidad de la metodología seis sigma, y a partir de una ponderación del mismo, se podrá establecer una ponderación de la ocurrencia de una falla. El DPO también se puede utilizar para ponderar la ocurrencia de una falla en el caso de que ésta última no sea dependiente del tiempo o en el caso en que por conveniencia no se considere la ocurrencia de una falla dependiente del tiempo, como los elevados costos de medición, inspección, muestreo, pruebas o demasiado tiempo en la realización de un servicio.

Se pueden establecer 2 tablas (2.8 y 2.9) para ponderar la ocurrencia a partir del DPO. Estas tablas son más adecuadas a procesos primerizos en la medición de fallas en los cuales no se hayan aplicado medidas preventivas con anterioridad.

$DPO = \frac{\text{Número de Fallas}}{\text{Total de Oportunidades}}$	Descripción de Ocurrencia	Escala
Valor de DPO		
0.1-0.25	Ocasional	1
0.25-0.50	Muy Probable	2
0.50-0.75	Frecuente	3
0.75-1	Muy Frecuente	4

Tabla 2.8 “Ponderación de la Ocurrencia a partir del valor de DPO con escala de 1 a 4”
(Elaboración Propia)

La tabla 2.9 tiene más discriminación de valores, por lo que podría ser un poco más estricta que la tabla 2.8 aplicada a procesos primerizos en acciones de mejora, pero que de alguna forma ya tienen un pequeño historial de mejora. Esta tabla queda de la siguiente forma:

$DPO = \frac{\text{Número de Fallas}}{\text{Total de Oportunidades}}$	Descripción de Ocurrencia	Escala
Valor de DPO		
0.1	Bajo	1
0.2	Moderado	2
0.3	Moderado	3
0.4	Alto	4
0.5	Alto	5
0.6	Alto	6
0.7	Muy Alto	7
0.8	Muy Alto	8
0.9	Muy Alto	9
1	Muy Alto	10

Tabla 2.9 “Ponderación de Ocurrencia a partir de valor de DPO con escala de 1 a 10”
(Elaboración Propia)

En el siguiente caso, suponiendo que una falla en un concesionario automotriz sea entregar después de la fecha prometida de entrega un auto que ingresa a servicio, habiendo entregado en el mes un total de 400 autos, a continuación se presenta la tabla con los datos correspondientes:

Fecha	Número de Fallas	Hrs
01/01/08	No Trabajado	24
02/01/08	0	48
03/01/08	1	72
04/01/08	4	96
05/01/08	6	120
06/01/08	No Trabajado	144
07/01/08	4	168
08/01/08	1	192
09/01/08	5	216
10/01/08	5	240
11/01/08	21	264
12/01/08	7	288
13/01/08	No Trabajado	312
14/01/08	5	336
15/01/08	13	360
16/01/08	1	384
17/01/08	19	408
18/01/08	5	432
19/01/08	4	456
20/01/08	No Trabajado	480
21/01/08	0	504
22/01/08	7	528
23/01/08	4	552
24/01/08	14	576
25/01/08	6	600
26/01/08	1	624
27/01/08	No Trabajado	648
28/01/08	8	672
29/01/08	17	696
30/01/08	5	720
31/01/08	7	744
TOTAL de Fallas	163	

Tabla 2.10 Número de Fallas vs Número de Horas, en el mes de enero en un concesionario automotriz (Cortesía de Morris S.A de C.V.)

Dado que $y=f(x)$, siendo y =Número de fallas (dato discreto), x =Tiempo en hrs (dato continuo). Se hará una prueba de hipótesis para probar si hay dependencia ó relación entre el tiempo y el número de fallas. Dado que la respuesta (y) es un dato discreto con más de cinco niveles, se le puede considerar como un dato continuo^[24], mientras que la variable de entrada (x) es un dato continuo por lo que se aplicará una regresión lineal, los datos de la corrida en Minitab se muestran a continuación:

Ho=Número de Fallas No depende del tiempo
 Ha= Número de Fallas SI depende del tiempo

Regression Analysis: f versus hr

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4.213	2.306	1.83	0.080
hr	0.005191	0.005142	1.01	0.323

S = 5.52279 R-Sq = 4.1% R-Sq(adj) = 0.1%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	31.09	31.09	1.02	0.323
Residual Error	24	732.03	30.50		
Total	25	763.12			

Unusual Observations

Obs	hr	f	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	264	21.00	5.58	1.28	15.42	2.87R
14	408	19.00	6.33	1.08	12.67	2.34R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Fig. 2.2 Resultados de Minitab de la Regresión Lineal entre Número de Fallas y Número de Horas en Servicio Automotriz

Como el valor de $p=0.323$ es mayor a 0.05 se acepta H_0 y se rechaza H_a , con lo que se concluye que el número de fallas no depende del tiempo. Por lo que se obtendrá la ocurrencia de fallas a partir del DPO el cual es el siguiente:

$$DPO = \frac{163}{400} = 0.407$$

Si fuera un proceso primerizo en el que aún no se han establecido acciones de prevención previas, la calificación sería de muy probable con un valor de ocurrencia de 2. Si el proceso fuera medido después de haber aplicado una acción de mejora la ocurrencia sería alta con un valor de 4.

Cabe mencionar que para el caso de la tabla 2.8 y 2.9 cuando se mide o considera la ocurrencia de fallas como un dato discreto, se establecieron dichas ponderaciones bajo el supuesto de tener una medición no muy estricta. Si el objetivo de entrega fuera más estricto, es decir si un proceso tuviera muchas acciones de mejora y se buscara aún más cumplir con un objetivo de calidad de clase mundial bajo una metodología seis sigma, o de un programa que persiguiera el cero defectos, se tendría que reducir el intervalo de la ocurrencia haciéndolo más estricto, de esta forma se tendría la tabla 2.11 que es la siguiente:

$DPO = \frac{\text{Número de Fallas}}{\text{Total de Oportunidades}}$	Descripción de Ocurrencia	Escala
Valor de DPO		
0.00039	Bajo	1
0.00078	Moderado	2
0.001562	Moderado	3
0.003125	Alto	4
0.00625	Alto	5
0.0125	Alto	6
0.025	Muy Alto	7

0.05	Muy Alto	8
0.1-0.3	Muy Alto	9
0.4-1	Muy Alto	10

Tabla 2.11 “Ponderación Estricta de Ocurrencia a partir del valor de DPO con escala de 1 a 10”
(Elaboración Propia)

2.5.2.2 Ocurrencia de falla dependiente del tiempo

Por otra parte, si se mide la tasa de fallas por período de tiempo (#fallas por hora), dicha tasa de fallas se mide bajo una escala continua, es decir el dato es continuo ya que se podrían tener valores de 0.05 fallas por 1000 horas de trabajo. Cabe mencionar que a pesar de cómo se considere la medición de la ocurrencia de una falla, resulta aún más trascendente realizar una prueba estadística (prueba de hipótesis) para determinar previamente si el hecho de que se presente una falla sea función del tiempo. De hecho, como se vio en el ejemplo anterior, es el primer paso a realizar. La trascendencia de que una falla sea dependiente del tiempo puede ocasionar que en un corto período de tiempo tenga un valor, sin embargo al ampliar el período de tiempo del estudio o de la medición el índice de falla tenderá a incrementar o decrementar su valor. Al presentarse este comportamiento en la ocurrencia de la falla, se vuelve crítica la correcta ponderación de ésta última para el AMEF.

Como se mencionó en el primer capítulo, existen distribuciones de probabilidad que han sido estudiadas para ajustar su comportamiento al estudio de la confiabilidad y tiempo de vida antes que se presente una falla. Estas distribuciones típicamente son: la distribución exponencial, la distribución gamma, la distribución Weibull, la distribución normal y la distribución lognormal. De manera específica, la función índice de falla para cada una de estas distribuciones de probabilidad mide la tasa de ocurrencia de fallas con respecto al tiempo, y para cada distribución dicha función presenta un comportamiento particular. A continuación se presenta la tasa o índice de falla para cada una de las distribuciones de probabilidad descritas en el primer capítulo. Cabe decir que dichas tablas fueron extraídas a partir de un análisis y de realizar cálculos de acuerdo a la función índice de falla que tiene cada distribución de probabilidad, y también, que la unidad de tiempo de la tasa de falla de cada tabla está dada en horas, ya que es la unidad de tiempo utilizada generalmente con fines del estudio de la confiabilidad^[31].

Tasa de Fallas de acuerdo a una distribución Exponencial	
Fallas por hora	Tiempo (hrs)
2.3	0
1.8	0.5
1.5	1
1.3	1.5
1.1	2
1	2.5
1	3
1	4
1	5
1	10

1	25
1	50
1	75
1	100
1	200
1	300
1	400
1	500
1	1000
1	2500
1	5000
1	7500
1	10000
1	50000
1	100000
1	250000
1	500000
1	1000000

Tabla 2.12 "Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Exponencial"
(Elaboración Propia)

Tasa de Fallas de acuerdo a una distribución Gamma					
$\lambda=1, K=2$		$\lambda=1, K=3$		$\lambda=1, K=4$	
Fallas por hora	Tiempo (hrs)	Fallas por hora	Tiempo (hrs)	Fallas por hora	Tiempo (hrs)
NE	0	NE	0	NE	0
0.333	0.5	0.076	0.5	0.012	0.5
0.5	1	0.2	1	0.062	1
0.6	1.5	0.310	1.5	0.134	1.5
0.666	2	0.4	2	0.210	2
0.714	2.5	0.471	2.5	0.282	2.5
0.75	3	0.529	3	0.346	3
0.8	4	0.615	4	0.450	4
0.833	5	0.675	5	0.529	5
0.909	10	0.819	10	0.732	10
0.961	25	0.923	25	0.884	25
0.980	50	0.960	50	0.941	50
0.986	75	0.973	75	0.960	75
0.990	100	0.980	100	0.970	100
0.995	200	0.99	200	0.985	200
0.996	300	0.993	300	0.99	300
0.997	400	0.995	400	0.992	400
0.998	500	0.996	500	0.994	500
NE	1000	NE	1000	NE	1000
NE	2500	NE	2500	NE	2500
NE	5000	NE	5000	NE	5000
NE	7500	NE	7500	NE	7500
NE	10000	NE	10000	NE	10000
NE	50000	NE	50000	NE	50000
NE	100000	NE	100000	NE	100000
NE	250000	NE	250000	NE	250000
NE	500000	NE	500000	NE	500000
NE	1000000	NE	1000000	NE	1000000

Tabla 2.13 "Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Gamma"
(Elaboración Propia)

Tasa de Fallas de acuerdo a una distribución Weibull							
$\lambda=1, \alpha=0.5$		$\lambda=1, \alpha=1$		$\lambda=1, \alpha=2$		$\lambda=1, \alpha=3$	
Fallas por hora	Tiempo (hrs)	Fallas por hora	Tiempo (hrs)	Fallas por hora	Tiempo (hrs)	Fallas por hora	Tiempo (hrs)
1.118	0.2	1	0.2	0.4	0.2	0.12	0.2
0.790	0.4	1	0.4	0.8	0.4	0.48	0.4
0.645	0.6	1	0.6	1.2	0.6	1.08	0.6
0.559	0.8	1	0.8	1.6	0.8	1.92	0.8
0.5	1	1	1	2	1	3	1
0.158	10	1	10	20	10	300	10
0.111	20	1	20	40	20	1200	20
0.059	70	1	70	140	70	14700	70
0.05	100	1	100	200	100	30000	100
0.035	200	1	200	400	200	120000	200
0.022	500	1	500	1000	500	750000	500
0.015	1000	1	1000	2000	1000	3000000	1000
0.007	5000	1	5000	10000	5000	75000000	5000
0.005	10000	1	10000	20000	10000	300000000	10000
0.003	20000	1	20000	40000	20000	1200000000	20000
0.002	50000	1	50000	100000	50000	7500000000	50000
0.0018	75000	1	75000	150000	75000	1.687E10	75000
0.0015	100000	1	100000	200000	100000	3E10	100000
0.001	250000	1	250000	500000	250000	1.875E11	250000
0.0007	500000	1	500000	1000000	500000	7.5E11	500000
0.00057	750000	1	750000	1500000	750000	1.687E12	750000
0.00051	950000	1	950000	1900000	950000	2.707E12	950000

Tabla 2.14 "Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Weibull" (Elaboración Propia)

Fallas por hora	Tiempo (hrs)
0.001	-2
0.2	-1
0.99	0
1.8	1
2.5	2
3.3	3
4.2	4
5.3	5
6.2	6
9.693	10
23.103	25
45.453	50
67.803	75
90.153	100
179.553	200
268.953	300
358.353	400
447.753	500
894.753	1000
2235.753	2500
4470.753	5000
6705.753	7500
8940.753	10000
44700.753	50000
89400.753	100000
223500.753	250000
447000.753	500000
894000.753	1000000

Tabla 2.15 "Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Normal" (Elaboración Propia)

Tasa de Fallas de acuerdo a una distribución Lognormal	
Fallas por hora	Tiempo (hrs)
0	0
0.33	1
0.395	2
0.35	3
0.32	4
0.3	5
0.28	6
0.25	7
0.2381	8
0.1782	10
0.1151	25
0.0812	50
0.0608	75
0.0474	100
0.0381	200
0.0264	300
0.0057	400
0.0016	500
0.0008	1000
0.0004	2500
0.0001	5000
6.5219E-5	7500
3.8438E-5	10000
2.5472E-5	50000
7.047E-6	100000
1.2717E-6	250000
3.4526E-7	500000
1.6057E-7	1000000

Tabla 2.16 “Tasa de Fallas por hora de acuerdo a una distribución Lognormal”
(Elaboración Propia)

Para ver la aplicación real de alguna de las tablas anteriores, se presenta el siguiente ejemplo de una falla dependiente del tiempo.

Una de las causas más comunes de falla en el suministro de energía eléctrica es debido a problemas en lo que se denomina “la acometida del servicio” (conductores que alimentan cada domicilio en forma individual). Cuando se presenta una falla de este tipo, acude una persona a reparar la acometida, cuyo trabajo debe ser de calidad para evitar que se repita. Una vez realizada la reparación un equipo de supervisores revisa la calidad de la reparación de acuerdo a los siguientes criterios:

	BIEN	MAL
Altura en poste y en preparación del usuario	_____	_____
Puntos de conexión (mano de obra)	_____	_____
Tipo de conector utilizado	_____	_____
Conductor empleado	_____	_____

Cuando alguna de estas características se clasifica como mal, se considera como defectuoso el trabajo desarrollado, o sea “Falla”. Se miden 30 hrs por semana del turno vespertino en la zona metropolitana, es decir se toma una muestra de 30 horas de inspección de reparación de acometidas por semana.

Los resultados de las 30 mediciones (falla por hora) se muestran en la tabla.

No. de Fallas detectadas en la en Zona Metropolitana en una hora de inspección o medición	Tiempo Total de Reparación Invertido en la Zona Metropolitana en una hora de medición (hrs)	Fallas por Hora	No. de medición por día en el que se monitorea 1 hora aleatoria de inspección (hrs)
6	89.77	0.06684	1
14	95.43	0.14671	2
15	99.45	0.15083	3
24	96.51	0.24867	4
26	99.66	0.26089	5
28	99.91	0.28026	6
28	99.19	0.28229	7
30	99.94	0.30019	8
30	97.11	0.30894	9
40	99.43	0.40228	10
41	97.76	0.41941	11
45	99.26	0.45336	12
46	99.36	0.46297	13
53	99.50	0.53267	14
60	98.78	0.60744	15
76	99.55	0.76344	16
81	99.66	0.81277	17
82	99.35	0.82539	18
98	99.20	0.98789	19
106	99.33	1.06712	20
108	99.22	1.08852	21
122	99.38	1.22756	22
139	99.86	1.39196	23
141	99.56	1.41621	24
146	99.75	1.46362	25
167	99.67	1.67546	26
170	99.93	1.70126	27
176	99.46	1.76957	28
234	99.74	2.34619	29
278	99.85	2.78421	30

Tabla 2.17 "Tasa de Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana" (Cortesía de Luz y Fuerza del Centro)

De la misma forma en que se hizo con las fallas no dependientes del tiempo, se probará estadísticamente si las fallas son dependientes del tiempo. En este caso se tiene $y=f(x)$ donde y = No. De fallas por hora y $f(x)$ =No. de medición por día en el que se monitorea 1 hora aleatoria de inspección. Dado que las fallas por hora son un dato continuo y el No. de medición es un dato discreto con más de 5 niveles, se puede considerar también éste último un dato continuo^[32]. Por lo tanto la herramienta estadística a utilizar será una regresión lineal.

Ho=No existe dependencia con el tiempo
 Ha=Existe dependencia con el tiempo

Regression Analysis: Fallas versus hora

The regression equation is

$$\text{Fallas} = -0.269 + 0.0738 \text{ hora}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0.26924	0.09047	-2.98	0.006
hora	0.073811	0.005096	14.48	0.000

S = 0.241582 R-Sq = 88.2% R-Sq(adj) = 87.8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	12.245	12.245	209.80	0.000
Residual Error	28	1.634	0.058		
Total	29	13.879			

Unusual Observations

Obs	hora	Fallas	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
29	29.0	2.3462	1.8713	0.0817	0.4749	2.09R
30	30.0	2.7842	1.9451	0.0861	0.8391	3.72R

Fig. 2.3 Resultados de Minitab de Regresión Lineal entre Fallas por hora y Número de Medición en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana

Dado que el valor de $p=0.00$ y es menor a 0.05 se rechaza H_0 y se acepta H_a , con lo que se concluye que la tasa de falla por hora es dependiente del tiempo.

Una vez determinada la dependencia del tiempo se hará un análisis estadístico para identificar que tipo de distribución sigue la tasa de falla por hora. Los resultados se muestran a continuación:

Distribution ID Plot for Fallas

Descriptive Statistics

N	N*	Mean	StDev	Median	Minimum	Maximum	Skewness	Kurtosis
30	0	0.874830	0.691791	0.68544	0.06684	2.7842	1.06447	0.682244

Goodness of Fit Test

Distribution	AD	P	LRT	P
Normal	1.023	0.009		
Lognormal	0.335	0.488		
3-Parameter Lognormal	0.347	*	0.626	
Exponential	0.669	0.293		
2-Parameter Exponential	0.422	>0.250	0.030	
Weibull	0.315	>0.250		
3-Parameter Weibull	0.270	>0.500	0.181	
Smallest Extreme Value	1.738	<0.010		
Largest Extreme Value	0.690	0.067		
Gamma	0.313	>0.250		
3-Parameter Gamma	0.367	*	0.251	
Logistic	0.906	0.010		
Loglogistic	0.393	>0.250		
3-Parameter Loglogistic	0.392	*	0.845	

ML Estimates of Distribution Parameters

Distribution	Location	Shape	Scale	Threshold
Normal*	0.87483		0.69179	
Lognormal*	-0.48025		0.91218	
3-Parameter Lognormal	-0.38098		0.80889	-0.04428
Exponential			0.87483	
2-Parameter Exponential			0.80866	0.06617

Weibull		1.31069	0.95151	
3-Parameter Weibull		1.10706	0.84099	0.06316
Smallest Extreme Value	1.24369		0.79591	
Largest Extreme Value	0.57157		0.48457	
Gamma		1.58909	0.55052	
3-Parameter Gamma		1.00698	0.80306	0.06617
Logistic	0.79562		0.38376	
Loglogistic	-0.44454		0.52859	
3-Parameter Loglogistic	-0.47964		0.55096	0.01731

* Scale: Adjusted ML estimate

Fig. 2.4 Resultados de Minitab de identificación de distribuciones para Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana

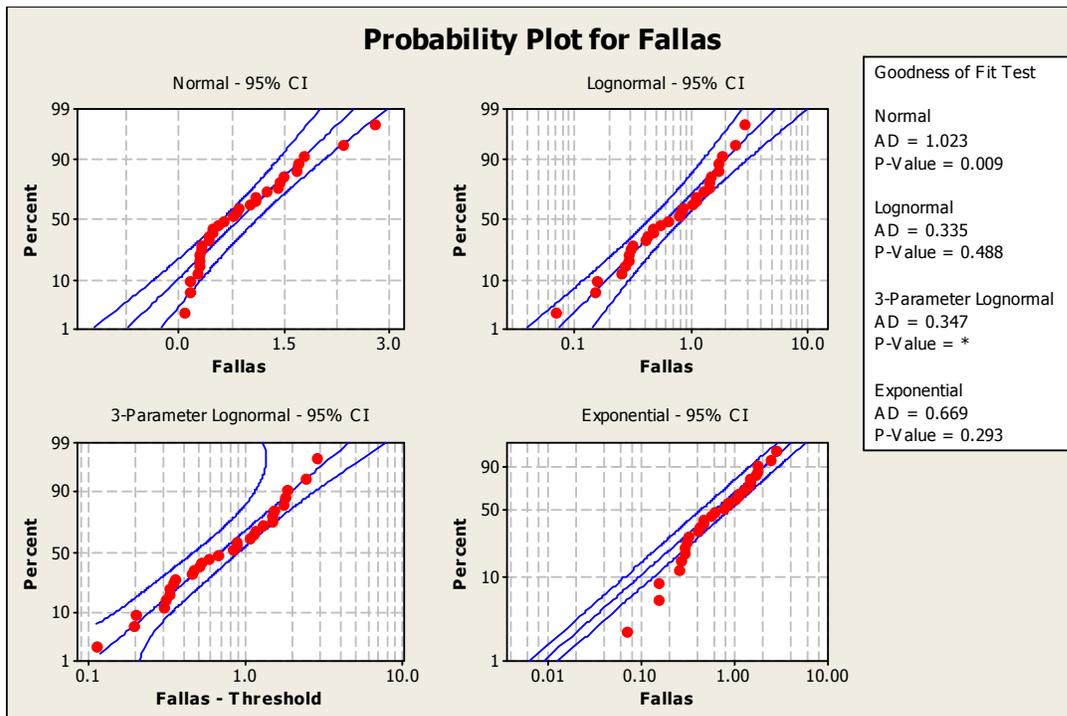


Fig. 2.5 Gráfico 1 de Probabilidad de Minitab para Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana

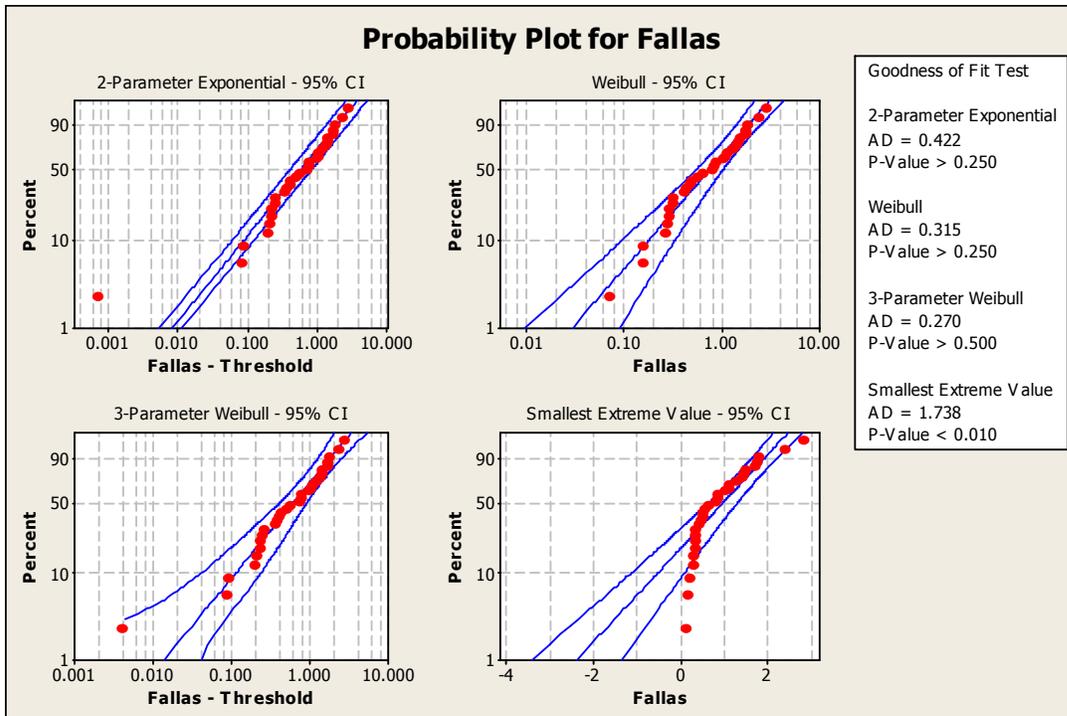


Fig. 2.6 Gráfico 2 de Probabilidad de Minitab para Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana

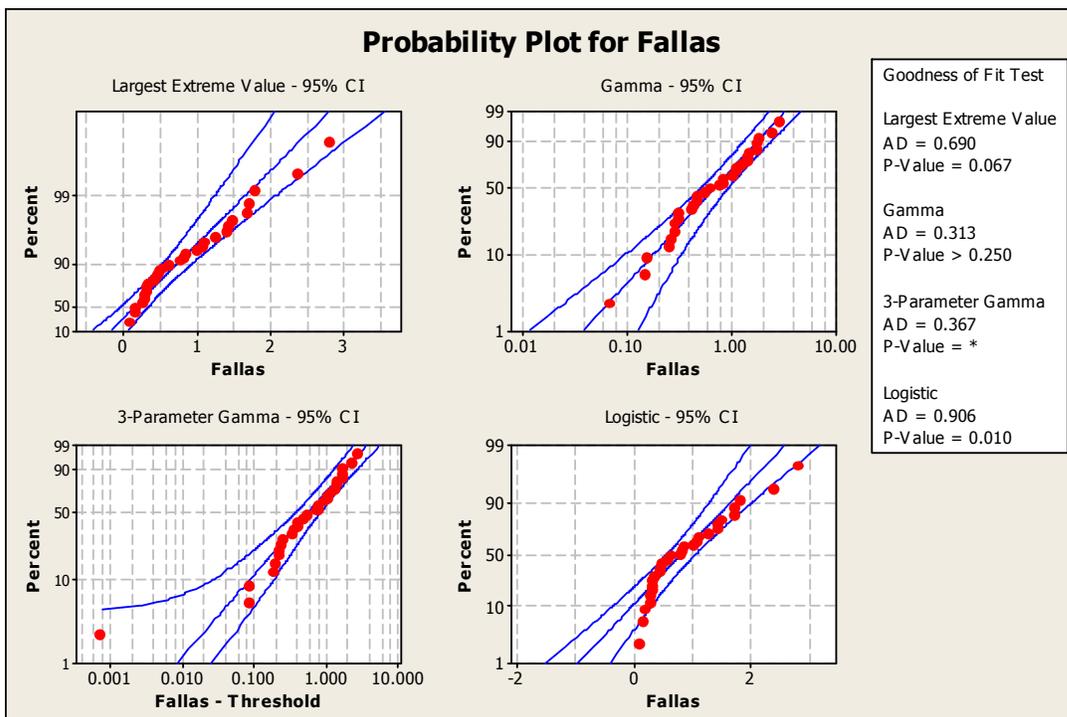


Fig. 2.7 Gráfico 3 de Probabilidad de Minitab para Fallas por hora en Acometida de Servicio en Zona Metropolitana

De acuerdo a los resultados del análisis estadístico para identificar la distribución que tiene la variable falla por hora, se concluye que, dado que el valor de p tiene

que ser mayor a 0.05, la distribución Weibull de tres parámetros con un valor de $p > 0.5$ es la que mejor se ajusta, es decir la variable falla por hora tiene dicha distribución con un valor de forma = 1.107 y un valor de escala de 0.84099.

De esta manera la falla por hora tendrá un comportamiento como se muestra en la siguiente tabla.

Lambda=0.84099	
Alfa=1.107	
0.774	0.2
0.829	0.4
0.863	0.6
0.889	0.8
0.909	1
1.144	10
1.226	20
1.390	70
1.440	100
1.544	200
1.692	500
1.814	1000
2.130	5000
2.283	10000
2.447	20000
2.682	50000
2.793	75000
2.875	100000
3.151	250000
3.377	500000
3.516	750000
3.601	950000

Tabla 2.18 “Tasa de Falla por hora calculada de acuerdo a una distribución Weibull con valor de forma=1.107 y un valor de escala de=0.84099 para Acometida de Servicio en Zona Metropolitana”
(Elaboración Propia)

por hora se incrementa conforme se aumenta el número de horas, sin embargo el valor máximo es de 3.601

El siguiente paso es identificar que posible valor de ocurrencia puede tener una tasa de falla dependiente del tiempo dependiendo del tipo de distribución que tenga, una propuesta es la que se muestra en las siguientes tablas:

Tipo de Distribución	Rango de Horas				
	De 0 a 1mes	De 1mes a 1año	De 1año a 10 años	De 10años a 100años	De 100años a 1000años
	0-744hrs	745-8760hrs	8761-87600hrs	87601-876000hrs	876001-8760000hrs
Distribución Exponencial	4	3	2	1	1
Distribución Gamma Lambda=1 y K=2	4	3	2	1	1
Distribución Gamma Lambda=1 y K=3	4	3	2	1	1
Distribución Gamma Lambda=1 y K=4	4	3	2	1	1
Distribución Weibull Lambda=1 y alfa=0.5	3	2	2	1	1
Distribución Weibull Lambda=1 y alfa=1	4	3	2	1	1
Distribución Weibull Lambda=1 y alfa=2	4	4	4	4	4
Distribución Weibull Lambda=1 y alfa=3	4	4	4	4	4
Distribución Normal	4	4	4	4	4
Distribución Lognormal	3	2	1	1	1

Tabla 2.19 “Ponderación de Ocurrencia de acuerdo al tipo de distribución de tasa de falla por hora con escala de 1 a 4” (Elaboración Propia)

Tipo de Distribución	Rango de Horas				
	De 0 a 1mes	De 1mes a 1año	De 1año a 10 años	De 10años a 100años	De 100años a 1000años
	0-744hrs	745-8760hrs	8761-87600hrs	87601-876000hrs	876001-8760000hrs
Distribución Exponencial	10	9	5	3	1
Distribución Gamma Lambda=1 y K=2	10	9	5	3	1
Distribución Gamma Lambda=1 y K=3	10	9	5	3	1
Distribución Gamma Lambda=1 y K=4	10	9	5	3	1
Distribución Weibull Lambda=1 y alfa=0.5	9	5	3	2	1
Distribución Weibull Lambda=1 y alfa=1	10	9	5	3	1
Distribución Weibull Lambda=1 y alfa=2	10	10	10	10	10
Distribución Weibull Lambda=1 y alfa=3	10	10	10	10	10
Distribución Normal	10	10	10	10	10
Distribución Lognormal	9	5	3	2	1

Tabla 2.20 “Ponderación de Ocurrencia de acuerdo al tipo de distribución de tasa de falla por hora con escala de 1 a 10” (Elaboración Propia)

La tabla 2.19 utiliza una escala de 1 a 4, que es la utilizada para ponderar la ocurrencia de acuerdo a la tabla 2.8; mientras que la tabla 2.20, utiliza una escala de 1 a 10, que es la escala utilizada para ponderar la ocurrencia de acuerdo a la tabla 2.9. Por lo tanto, de estas últimas tablas se concluye que el valor de ocurrencia en una escala de 1 a 4 para una distribución de Weibull con

parámetro de escala= 0.84099 y un parámetro de forma=1.107 es de un valor de 4, mientras que en una escala de 1 a 10 la ocurrencia tendrá un valor de 10.

De lo que se ha revisado en el análisis del marco teórico de la ocurrencia, podemos proponer el siguiente algoritmo para llegar a determinar el valor de la ocurrencia en una organización de servicio:

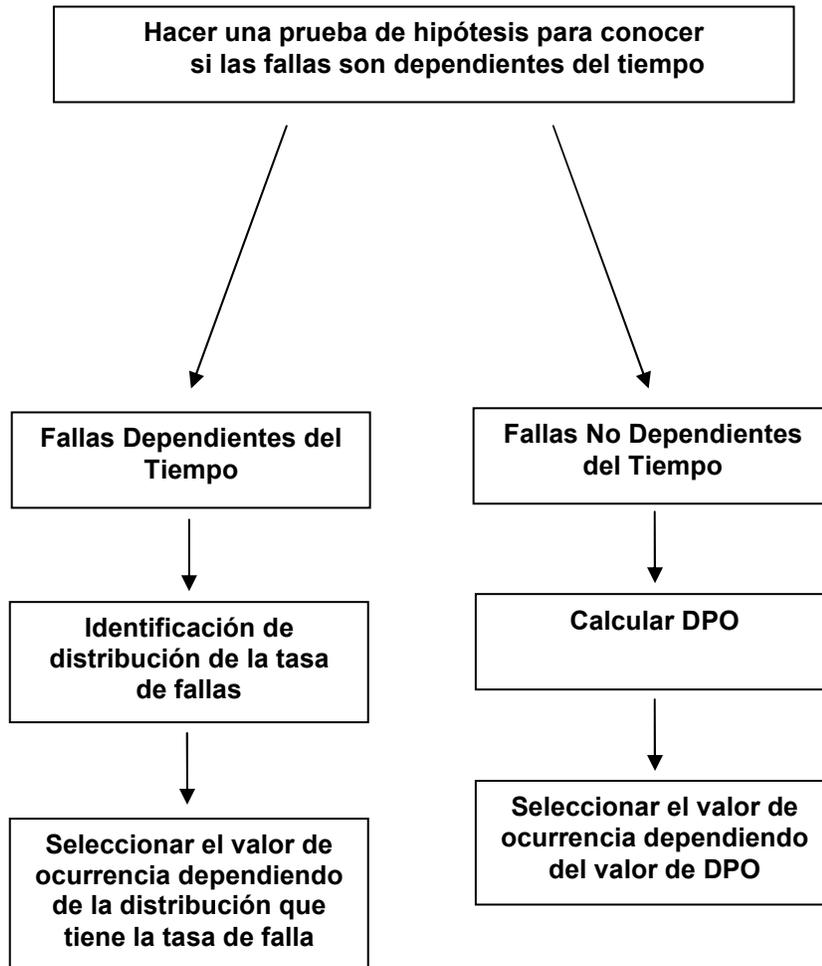


Fig. 2.8 "Algoritmo para Calcular Ocurrencia de Fallas Dependientes o No Dependientes del Tiempo" (Elaboración Propia)

Por último, quedaría la tarea de analizar la probabilidad de ocurrencia de una falla cuando se le considera como una probabilidad condicional de otro evento aleatorio, es decir cuando la ocurrencia de una falla, puede estar condicionada a su vez por otra falla (dependencia positiva) o de cualquier otro evento aleatorio, con lo cual la correcta ponderación de la ocurrencia de una falla condicionada resulta un tema interesante de abordar.

2.5.2.3 Ocurrencia de Fallas Condicional: El Teorema de Bayes

La ocurrencia de una falla, como se mencionó anteriormente, puede estar condicionada por otro evento aleatorio o por otro tipo de variables, es decir, la ocurrencia de una falla puede ser dependiente de otras variables distintas a la variable tiempo. En tal caso para identificar la dependencia de la ocurrencia de una falla con otro tipo de variables, se tiene que tener presente que para comprobar dicha dependencia o relación se tiene que hacer a través de una prueba estadística (prueba de hipótesis).

El análisis de causa raíz en la fase de investigación menciona otras variables diferentes a la variable tiempo que pudieran tener una fuerte relación con la ocurrencia de una falla, estas variables son^[33]:

- Fallas relacionadas con el mal funcionamiento del equipo o material utilizado en una operación.
- Fallas relacionadas con la forma de ejecutar un procedimiento; éstas involucran tanto las desviaciones con un procedimiento establecido como el diseño de un procedimiento que no siempre pudiera ser el más adecuado, así como las circunstancias que provocan que un procedimiento sea inadecuado y/o que obstruya a la calidad.
- Fallas relacionadas con el personal, esto podría ser el entrenamiento, la experiencia o la distracción causada por factores ambientales.
- Fallas relacionadas con el diseño del equipo.
- Fallas relacionadas con las políticas de administración.
- Fallas relacionadas con fenómenos externos.

Cuando alguna de estas variables o incluso otro tipo de variables identificadas en la etapa de investigación (del análisis de causa raíz) tienen una fuerte relación con la ocurrencia de una falla, se puede decir también en términos estadísticos que la probabilidad del primer evento (ocurrencia de falla) está condicionada a la probabilidad de otro evento aleatorio (equipo, material, personal, método, medio ambiente, diseño, políticas o fenómenos externos). Cuando existe dicha dependencia o relación estadística, se puede abordar el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de una falla desde el punto de vista de la estadística bayesiana.

Cabe mencionar que el enfoque de la estadística bayesiana es útil para hacer pronósticos, análisis de riesgos, definir objetivos contractuales ó incluso límites de especificación, además de que proporciona un marco de referencia para ejecutar acciones de mejora continua. Sin embargo, en este apartado se enfocará la estadística bayesiana al cálculo de la ocurrencia de una falla cuando ésta última está condicionada por algún otro evento aleatorio, por lo que resulta de interés analizar un ejemplo ligado con la ocurrencia de una falla en una organización de servicio, este ejemplo es el siguiente:

Una aerolínea tiene 4 empleadas de mostrador que atienden respectivamente 60%, 20%, 15%, 5% de los clientes. Las dos primeras empleadas han recibido 50 hrs de capacitación mientras que las otras dos han recibido 20 hrs de capacitación. La probabilidad de que un cliente se queje con alguna de las empleadas de mostrador es de 0.05, 0.05, 0.10, 0.10 respectivamente y se quiere encontrar la probabilidad de que una queja provenga de la empleada 1.

A= Evento queja del cliente
 B1= Evento empleada 1
 B2= Evento empleada 2
 B3= Evento empleada 3
 B4= Evento empleada 4

$$P(B1 / A) = \frac{P(A / B1)P(B1)}{P(A / B1)P(B1) + P(A / B2)P(B2) + P(A / B3)P(B3) + P(A / B4)P(B4)}$$

$$P(B1 / A) = \frac{(0.05)(0.6)}{(0.05)(0.6) + (0.05)(0.2) + (0.1)(0.15) + (0.1)(0.05)} = \frac{0.03}{0.06} = 0.5$$

De esta forma la ocurrencia de una falla que proviene de la empleada 1 es de 0.5. Revisando la tabla de DPO para un valor de 0.5 en un proceso primerizo de acciones de mejora tendría un valor de 5, mientras que un proceso al que ya se le hayan aplicado varias acciones de mejora previas la ponderación de la ocurrencia sería de 10.

2.5.3 Análisis del Marco Teórico de la Detección

Para el análisis de la detección se usará una prueba estadística experimental (diseño de experimentos) para conocer que variables (conceptos) mencionadas en el primer capítulo tienen una fuerte relación en la detección de una falla o de un problema de calidad en las organizaciones de servicio. Para correr este experimento, se utilizará la escala empleada en el sector automotriz (de 1 a 10) para ponderar la relación que tienen cada uno de estos conceptos en la detección. Al final, se tendrán las conclusiones arrojadas por esta prueba experimental. Éstas dirán que factor (variable) es el que aporta mayor contribución en la detección y con ello se establecerán los factores que serán relevantes para medir o ponderar la detección.

Los conceptos (variables o factores) revisados en el primer capítulo aparecen ponderados con la escala de 1 a 10 en la siguiente tabla:

Variable ó Factor: Concepto descrito en el marco teórico de la detección	Relación con la Detección (Escala Automotriz)	
	Nivel Bajo (Menor)	Nivel Alto (Mayor)
Análisis Funcional (AF)	3	9
Identificación de Modos de Falla (IMF)	5	10
Causas de la Falla (CF)	5	10
Efectos de la Falla (EF)	3	8
Análisis de Causa Raíz (ACR)	5	10

Tabla 2.21 “Ponderación de Conceptos de Detección en nivel bajo y alto según escala de 1 a 10” (Elaboración Propia)

No.	AF	IMF	CF	EF	ACR	Detección
1	3	10	10	8	10	9
2	9	5	10	3	10	8
3	9	10	5	3	10	7
4	9	5	10	8	10	9
5	3	5	5	3	10	6
6	9	5	5	8	10	8
7	3	10	5	8	10	8
8	3	5	10	3	10	7
9	9	10	5	3	5	5
10	3	5	5	8	5	6
11	9	5	10	8	5	7
12	9	5	5	8	5	6
13	3	10	5	3	10	7
14	9	10	5	8	10	8
15	9	5	5	3	5	5
16	9	10	10	8	5	8
17	3	10	5	3	5	5
18	9	10	5	8	5	7
19	3	10	10	3	5	6
20	3	5	10	3	5	5
21	3	10	5	8	5	6
22	3	5	5	8	10	7
23	9	5	5	3	10	7
24	3	10	10	3	10	8
25	9	10	10	3	5	6
26	3	5	5	3	5	4
27	9	5	10	3	5	6
28	3	10	10	8	5	7
29	9	10	10	3	10	8
30	9	10	10	8	10	9
31	3	5	10	8	10	8
32	3	5	10	8	5	7

Tabla 2.22 “Corridas Aleatorias de un Diseño Experimental de 5 factores y 2 niveles” (Elaboración Propia)

A continuación se presentan los resultados en Minitab del diseño de experimentos.

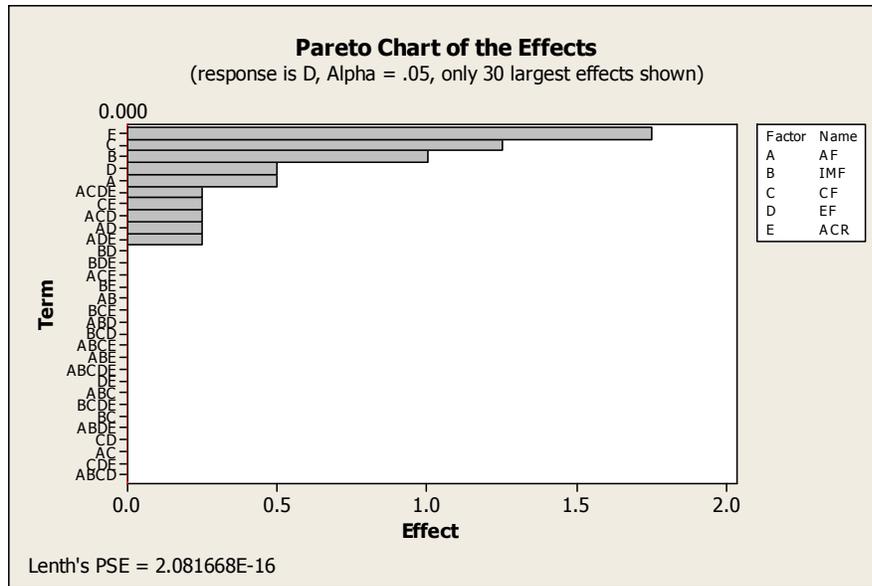


Fig. 2.9 Gráfico de Pareto de Minitab del Diseño Experimental de 5 factores con 2 niveles de Conceptos de Detección.

Factorial Fit: D versus AF, IMF, CF, EF, ACR

Analysis of Variance for D (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	49.0000	49.0000	9.8000	*	*
2-Way Interactions	10	1.0000	1.0000	0.1000	*	*
3-Way Interactions	10	1.0000	1.0000	0.1000	*	*
4-Way Interactions	5	0.5000	0.5000	0.1000	*	*
5-Way Interactions	1	0.0000	0.0000	0.0000	*	*
Residual Error	0	*	*	*		
Total	31	51.5000				

Fig. 2.10 Tabla de ANOVA de Minitab del Diseño Experimental de 5 factores con 2 niveles de Conceptos de Detección.

A causa de que el valor de p en la tabla de ANOVA se indetermina, se concluye que ninguno de los cinco conceptos o factores (análisis funcional, identificación de modos de falla, causas de la falla, efectos de la falla y análisis de causa raíz) aporta alguna participación en la variable “detección”, por lo que el diseño de experimentos resulta una prueba estadística no concluyente para conocer la dependencia de estos conceptos o factores en la variable detección. Sin embargo podemos aplicar el método multicriteria Promethe-Gaia II para conocer la relación entre estos conceptos y la variable “detección”.

Para realizar el análisis a partir de la aplicación del método multicriteria Promethe-Gaia II se tendrán que proponer 4 diferentes tipos de detección, las cuales están asociadas a identificar 4 diferentes tipos de problemas de calidad que se pudieran tener en las organizaciones de servicio. Por ello, se definirá a los diferentes tipos de detección de la siguiente manera:

- a) detección 1: identificación de la desviación de un requerimiento o de una expectativa.
- b) detección 2: identificación de que el estado actual sea diferente al estado ideal o que debería ser.
- c) detección 3: identificación de un evento, situación, o tendencia de desempeño indeseable.
- d) detección 4: identificación de que un efecto primario crítico provoque que una situación indeseable ocurra.

Cabe señalar también que se ha propuesto una medida de ponderación para establecer el grado de relación entre la detección y los siguientes conceptos: análisis funcional, identificación de modos de falla, causas de la falla, efectos de la falla y análisis de causa raíz.

La escala es la siguiente:

Descripción	Valor
Moderadamente Relacionado	1
Relacionado	2
Muy Relacionado	3
Altamente Relacionado	4
Dependiente	5

Tabla 2.23 “Escala de Relación (Ponderación) para Método Multicriteria Promethe-Gaia de Conceptos de Detección” (Elaboración Propia)

Con esta información tenemos los datos de la tabla multicriteria, así mismo los resultados del método multicriteria Promethe-Gaia II.

Unit	Deteccion 1	Deteccion 2	Deteccion 3	Deteccion 4
	Escala Relacion	Escala Relacion	Escala Relacion	Escala Relacion
Analisis Funcional	Muy Relacionado	Muy Relacionado	Moderadamente Relacionado	Dependiente
Identificacion de Modos de Falla	Muy Relacionado	Altamente Relacionado	Altamente Relacionado	Dependiente
Causas de Falla	Altamente Relacionado	Altamente Relacionado	Dependiente	Dependiente
Efectos de Falla	Altamente Relacionado	Altamente Relacionado	Dependiente	Dependiente
Analisis de Causa Raiz	Dependiente	Dependiente	Muy Relacionado	Dependiente

Fig. 2.11 Tabla Multicriteria de Conceptos de Detección

En la gráfica 2.12 se muestran los resultados del método multicriteria Promethe II. Puede observarse que los efectos de falla y las causas de una falla, aportan más valor a la detección, es decir son las dos variables (criterios) que tienen mayor importancia para la detección.

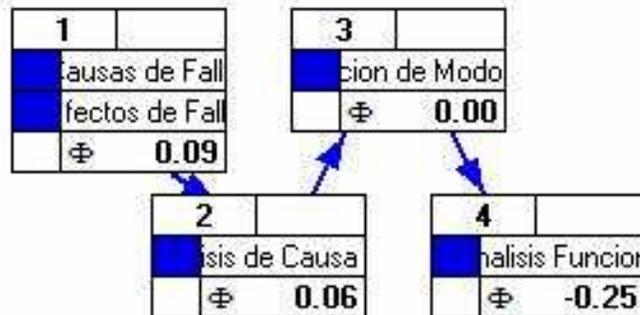


Fig. 2.12 Gráfico Promethe II de Decision Lab de Método Multicriteria de Conceptos de Detección

La Gráfica 2.13 corrobora los resultados del método multicriteria Promethe II. En esta gráfica, se puede observar que las 2 columnas más elevadas son las que corresponden a la causa y el efecto de una falla, bajo el supuesto de que se le dé un peso mayor (70%) a la detección 1.



Fig. 2.13 Gráfico de Barras de Peso de Decision Lab de Método Multicriteria con 70% a la Detección 1

La figura 2.14 muestra el plano Gaia. En éste, se puede observar que el efecto y causa de la falla están en el mismo sentido que la detección 1, detección 2, detección 3 y detección 4. En este plano se consideran estas detecciones con el mismo peso (25%). Se puede observar también que el efecto y causa de falla se encuentran más cercanos a la detección 4 y a la detección 3; así mismo, puede verse que se encuentran más alejados de la detección 1 y de la detección 2, por lo que se concluiría que el efecto y causa de la falla resultan criterios más valiosos para la detección 4 y la detección 3.

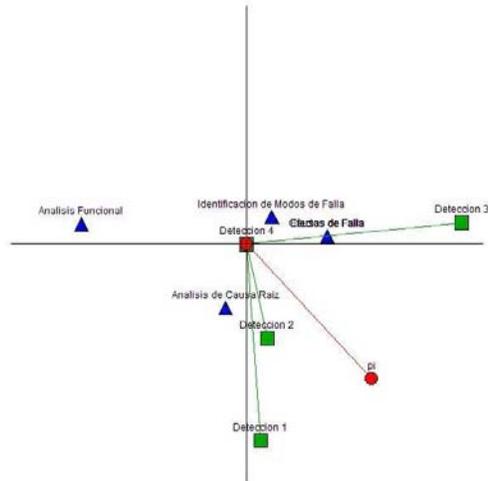


Fig. 2.14 Gráfico GAIA de Decision Lab de Método Multicriteria de Conceptos de Detección

En la gráfica 2.15 se puede observar que la columna más elevada es la de análisis de causa raíz, dicha variable (criterio) impacta más en la detección 2, cuando ésta última tiene un peso mayor (70%).



Fig. 2.15 Gráfico de Barras de Peso de Decision Lab de Método Multicriteria con 70% a la Detección 2

En la gráfica 2.16 se puede observar que las columnas más elevadas corresponden a la causa y el efecto de una falla, dichas variables (criterios) impactan más en la detección 3, cuando ésta última tiene un peso mayor (70%).



Fig. 2.16 Gráfico de Barras de Peso de Decision Lab de Método Multicriteria con 70% a la Detección 3

En la gráfica 2.17 se puede observar que las columnas más elevadas corresponden a la causa y el efecto de una falla, dichas variables (criterios) impactan más en la detección 4, cuando ésta última tiene un peso mayor (70%).



Fig. 2.17 Gráfico de Barras de Peso de Decision Lab de Método Multicriteria con 70% a la Detección 4

Con la información arrojada por el método multicriteria Promethe-Gaia II, podemos proponer dos tablas de ponderación de la detección.

La primer tabla (tabla 2.24) ha sido modificada a la que es utilizada en el sector automotriz actualmente, dicha tabla modificada toma en cuenta los métodos de identificación de fallas que con base en el análisis de causa raíz son^[33]: el diagrama factor evento-causa, el análisis de barreras de control, el análisis de árbol de fallas. Así mismo toma en cuenta, el efecto de falla y los tipos de causas que con base en el análisis de causa raíz son^[33]: causa de contribución, causa presunta y causa raíz. Las inclusiones anteriores no las considera la ponderación automotriz actual de la detección. Esta tabla modificada se muestra a continuación:

Criterios de la evaluación y ponderación sugeridos para la detección de una falla en un proceso de servicio con una escala de 1 a 10.		
Categoría	Descripción de la detección	Escala
Casi Imposible	Ninguno de los métodos identifica o ninguno de los controles disponibles detecta: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	10
Muy Alejado	Los métodos actuales de identificación o controles actuales tienen una probabilidad muy alejada de identificar o detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	9
Alejado	Los métodos actuales de identificación o controles actuales tienen una probabilidad alejada de identificar o detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	8
Muy Bajo	Los métodos actuales de identificación ó controles actuales tienen una probabilidad muy baja de identificar o detectar:	7

	efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	
Bajo	Los métodos actuales de identificación o controles actuales tienen una probabilidad baja de identificar o detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	6
Moderado	Los métodos actuales de identificación o controles actuales tienen una probabilidad moderada de identificar ó detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	5
Moderadamente Alto	Los métodos actuales de identificación o controles actuales tienen una probabilidad moderadamente alta de identificar ó detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	4
Alto	Los métodos actuales de identificación o controles actuales tienen una alta probabilidad de identificar o detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	3
Muy Alto	Los métodos actuales de identificación o controles actuales tienen una probabilidad muy alta de identificar o detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	2
Casi Siempre	Los métodos actuales de identificación o controles actuales, identifican o detectan casi siempre: al efecto de falla, las causas de contribución, las causas presuntas, causa raíz o modo de falla. Los métodos de identificación o controles confiables de detección se conocen o se han probado con procesos similares.	1

Tabla 2.24 "Ponderación de la Detección con escala de 1 a 10 de acuerdo al Método Multicriteria Promethe-GAIA de Conceptos de Detección" (Elaboración Propia)

En la siguiente tabla 2.25 se propone para ponderar la detección de los modos de falla en los servicios. Esta tabla también toma en cuenta los métodos de identificación de fallas que con base en el análisis de causa raíz son: el diagrama factor evento-causa, el análisis de barreras de control, el análisis de árbol de fallas; también toma en cuenta, el efecto de falla y los tipos de causas que con base en el análisis de causa raíz son: causa de contribución, causa presunta y causa raíz. Esta tabla utiliza una escala de 1 a 4 y se muestra a continuación:

Criterios de la evaluación y ponderación sugeridos para la detección de una falla en un proceso de servicio con una escala de 1 a 4.		
Categoría	Descripción de la detección	Escala
Imposible	Ninguno de los métodos identificación o ninguno de los controles disponibles detecta: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	4
Baja	Los métodos actuales de identificación o controles actuales tienen una probabilidad muy alejada de identificar o detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	3
Moderada	Los métodos actuales de identificación o controles actuales tienen una probabilidad moderada de identificar o detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	2
Segura	Los métodos actuales de identificación ó controles actuales tienen una probabilidad segura de identificar o detectar: efecto de falla, causas de contribución, causas presuntas, causa raíz o modo de falla	1

Tabla 2.25 “Ponderación de la Detección con escala de 1 a 4 de acuerdo al Método Multicriteria Promethe-GAIA de Conceptos de Detección” (Elaboración Propia)

2.5.4 Simulación Estadística (Método de Monte Carlo) y el AMEF

Cuando se tienen más de dos eventos aleatorios (variables) “a” y “b” que tienen diferentes distribuciones de probabilidad ($f(a)$ y $f(b)$), surge una pregunta esencial: que distribución tendrá un tercer evento aleatorio (variable) “c”, el cual a su vez es dependiente de los eventos aleatorios “a” y “b”.

Para ayudar en la resolución de este problema, se propone utilizar el método de simulación estadística Monte Carlo. Este método ayuda a identificar la distribución de probabilidad resultante a partir de otras distribuciones de probabilidad.

Para el caso del número de prioridad de riesgo, el cual depende de tres variables que son la severidad, ocurrencia y detección, podría conocerse la distribución de probabilidad que tiene el número de prioridad de riesgo, a partir de conocer las distribuciones de probabilidad que tienen la severidad, ocurrencia y detección. Utilizando el método Monte Carlo, se muestra el siguiente ejemplo.

A partir de la tabla 2.5 para ponderar la severidad, las tablas 2.9 y 2.20 para ponderar la ocurrencia y la tabla 2.24 para ponderar la detección, un ingeniero de calidad lleva un registro de los AMEFs aplicados en los últimos seis meses para establecer acciones de prevención en una organización de servicio. El quiere

conocer que distribución de probabilidad tendrá el número de prioridad de riesgo de los AMEFs con la finalidad de predecir cuales serán los valores del número de prioridad de riesgo en otros proyectos de mejora en los siguientes seis meses, y con ello establecer controles y objetivos del sistema de calidad más estrictos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el programa Crystall Ball de simulación estadística Montecarlo:

Severidad	Ocurrencia	Deteccion	RPN	Data Series:	1	2	3	4
10	5	5	250	Anderson-Darling:	0.713172813	1.006915584	0.510418489	0.123939063
7	5	5	175	Distribution:	4.474197502	9.637818992	5.444728504	592.9422756
6	7	7	294	Best fit:	Logistic	Logistic	Beta	Triangular
8	8	8	512					
9	10	9	810	Normal	0.730116329	1.183546792	0.579328403	0.359311261
9	10	10	900	Triangular	2.842207581	4.838354269	0.714413886	0.123939063
10	10	7	700	Lognormal	0.786874395	1.548521628	0.733309488	0.235095656
7	9	8	504	Uniform	0.993445788	4.636056806	0.649262808	0.893788357
5	8	9	360	Exponential	4.996352683	5.63118049	5.65273055	2.742010194
6	9	7	378	Weibull	1.052430938	1.079040498	0.687613581	0.193129298
8	10	8	640	Beta	2.771379015	4.254394017	0.510418489	0.208855191
10	8	9	720	Gamma	2.656316089	1.45082084	3.158830523	0.231112349
9	7	9	567	Logistic	0.713172813	1.006915584	0.577452091	0.377576482
9	5	5	225	Pareto	1.66479129	3.389169039	2.299787878	2.244654312
5	9	6	270	Extreme Value	0.808831029	1.067617912	0.570160029	0.277189985
7	10	7	490					
6	9	8	432					
5	8	9	360					
10	10	7	700					
5	10	6	300					

Fig. 2.18 Resultados de Crystall Ball a la Simulación Monte Carlo para identificar tipo de distribución del Número de Prioridad de Riesgo de los AMEFs aplicados a una organización de servicio

Se puede observar en los resultados (Fig. 2.18) que la distribución de la severidad y ocurrencia obedecen a una distribución logística, mientras que la detección obedece a una distribución beta y por último se observa que la distribución resultante para el número de prioridad de riesgo (RPN) es una distribución triangular.

¿Cuál sería entonces la probabilidad de que se tuviera un valor de RPN>750 en los siguientes seis meses?

Moda= 700

Límite inferior=175

Límite superior=900

$$p(x \geq 750) = 1 - p(x \leq 750) = 1 - \frac{2(900 - x)}{(900 - 175)(900 - 700)}$$

$$p(x \geq 750) = 1 - \frac{1800 - 1500}{145000} = 1 - 0.0020 = 0.9979$$

Lo que quiere decir que el sistema de calidad necesita de mayores acciones de prevención para que en un futuro se reduzca el RPN y con ello establecer una segunda fase de mejora con controles más estrictos. Sin embargo, esto último será sólo en el mediano plazo y en la medida en que el índice de fallas disminuya.

Este capítulo expuso la metodología para resolver las siguientes tres incógnitas:

- a) ¿Cuál es la escala de ponderación que debe utilizarse en una Organización de Servicio, para calificar en una falla la severidad, la ocurrencia y la detección?
- b) ¿Cómo se pondera la ocurrencia de una falla cuando es afectada por la variable tiempo o por alguna otra variable externa a la ocurrencia, en una Organización de Servicio?
- c) ¿En qué momento y como se debe redefinir el número de prioridad de riesgo del AMEF, en una Organización de Servicio?

Por otra parte el capítulo III servirá para comprobar mediante la aplicación del AMEF (a la resolución de dos problemas reales en una Organización de Servicio) si la metodología del capítulo II es cierta para poder aplicar un AMEF a cualquier Organización de Servicio.

BIBLIOGRAFIA CAPÍTULO II

1. Evans James y Lindsay William (1995). **Administración y Control de la Calidad**, México, Grupo Editorial Iberoamérica, p23-43.
2. Rosander A.C. (1980). **Service Industry QC- Is the Challenge Being Met**, Quality Progress Vol.13 No.9, E.U.A, p34.
3. Scanlon F. y Hagan J. (1983). **Quality Management for Service Businesses Part I**, Quality Progress Vol.16 No.5, E.U.A, p18-23
4. Phillip T. y Gale B. (1985). **The Strategic Management of Service Quality**, Quality Progress Vol.18 No.6, E.U.A, p20-25.
5. Sasser W., Olsen R. y Wyckoff D. (1978). **Management of Service Operations, Text, Case and Readings**, E.U.A, Allyn&Bacon.
6. Yang K. (2005). **Design for Six Sigma for Service**, E.U.A, McGraw-Hill, p1-21.
7. Schmenner R.W. (1994). **Plant and Service Tours in Operations Management**, E.U.A, McMillan.
8. Ramaswamy R. (1996). **Design and Management of Service Process**, E.U.A, Addison-Wesley.
9. Williams R. y Zigli R. (1987). **Ambiguity Impedes Quality in the Service Industries**, Quality Progress Julio, E.U.A, p14-17
10. Gale B. (1994). **Managing Customer Value**, New York:The Free Press, E.U.A.
11. Sheridan W. (1994). **Market Ownership**, American Management Association, E.U.A.
12. Miles L. (1961). **Techniques for Value Analysis and Value Engineering**, E.U.A, MacGraw-Hill.
13. Yang K. (2005). **Design for Six Sigma for Service**, E.U.A, McGraw-Hill, p1-21.
14. Ramaswamy R. (1996). **Design and Management of Service Process**, E.U.A, Addison-Wesley.
15. Phillip R. (1988). **Taguchi Techniques for Quality Engineering**, E.U.A, McGraw-Hill, E.U.A.
16. Crosby P. (1979). **Quality is Free**, E.U.A, McGraw-Hill.
17. Juran J.M. (1995). **Análisis y Planeación de la Calidad**, México, McGraw-Hill, p15-38, p139-178.
18. Lars Skyttner. (2006). **General Systems Theory: Problems, Perspective, Practice**. E.U.A, World Scientific Publishing Company.
19. Sink D.S. (1991). **The Role of Measurement in Achieving World Class Quality and Productivity**. Industrial Engineering Junio, E.U.A, p23-29.
20. Russel A. (1973). **Beyond Problem Solving**, American Institute for Decision Sciences Noviembre, E.U.A.
21. Evans James. y Lindsay William (1995). **Administración y Control de la Calidad**, México, Grupo Editorial Iberoamérica, p27.
22. GAO/NSIAD-91-190. (1991). **US Companies Improve Performance Through Quality Efforts**, United States General Accounting Office Mayo, E.U.A.
23. Juran J.M. (1995). **Análisis y Planeación de la Calidad**, México, McGraw-Hill.
24. Sleeper A. (2006). **Design for Six Sigma Statistics**, E.U.A, McGraw-Hill, p319-379.
25. Bothe D.R. (2002). **Reducing Process Variation and Problem Solving**, E.U.A, Landmark Publishing, p24-51.
26. Norman R. (2002). **Service Management: Strategy and Leadership**, E.U.A, Wiley&Sons, p56-74.
27. Kotter J.P. (2000). **The Heart of Change: Real Life Stories of How People Change Their Organizations**, E.U.A, Harvard Business School Press.
28. Hinckley M. (1999). **Make No Mistake**, E.U.A, Productivity Press.
29. Stamatis D.H. (2003). **Failure Mode and Effect Analysis**, E.U.A, American Society for Quality, p10-16,129-153.
30. Nadler G. y Shozo H. (1990). **Breakthrough Thinking**, E.U.A, Prima Publishing and Communications.
31. Leemis Lawrence. (1995). **Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods**, E.U.A, Prentice-Hall.

32. Montgomery D. (2002). **Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería**, México, Limusa-Wiley, p97.
33. Ammerman M. (1998). **The Root Cause Analysis**, E.U.A, Productivity Press, p63-65.

Capítulo III

Resultados

3.1 Aplicación de AMEF

En este apartado se presentará la aplicación final de lo descrito en el capítulo 1 y el capítulo 2, para con ello justificar la aplicación final del AMEF en dos casos reales de una organización de servicio.

Dichos casos se presentan en un concesionario automotriz y abordan 2 problemas diferentes en dos áreas diferentes del concesionario que son el área de ventas y el área de refacciones; a continuación se presentan estos casos.

CASO 1: El área de ventas de autos nuevos requiere encontrar una forma de incrementar sus ventas de autos nuevos.

Defecto = venta mensual de autos nuevos menor a 70 unidades.

CASO 2: El área de refacciones requiere encontrar una forma de disminuir su inventario de refacciones obsoletas.

Defecto = Costo financiero mayor a \$800,000 pesos en refacciones con antigüedad en inventario mayor a 180 días.

Con estos dos casos definidos, veremos primeramente la ponderación de las tres variables del AMEF: severidad, ocurrencia y detección.

3.1.1 Ponderación de la severidad en 2 casos reales en una organización de servicio

3.1.1.1 Ponderación de la severidad en caso 1

Para la ponderación de la severidad del caso 1 se utilizará la tabla 2.5

3.1.1.2 Ponderación de la severidad en caso 2

Para la ponderación de la severidad del caso 2 se utilizará la tabla 2.4

3.1.2 Ponderación de la ocurrencia en 2 casos reales en una organización de servicio

3.1.2.1 Ponderación de la Ocurrencia caso 1

Se realizará una prueba de hipótesis para conocer si la ocurrencia de fallas en el caso 1, es una función del tiempo, de esta forma se tienen los datos de la siguiente tabla:

No. De Falla	No. Autos Nuevos Vendidos al Mes	No. de Mes
1	67	1
0	80	2
1	67	3
1	55	4
1	62	5
1	50	6
1	55	7
0	82	8
0	82	9
0	85	10
1	69	11
0	98	12
Promedio de Ventas Anual	71	

Tabla 3.1 Tabla de Ocurrencia de Falla de Incremento de Ventas (Caso 1)
(Cortesía DIZAR S.A de C.V.)

A continuación se realiza la prueba de hipótesis para conocer si el No. de Fallas depende del tiempo, es decir, del No. de Mes. A continuación se muestran los resultados de la prueba de hipótesis en minitab.

Ho=No. de Falla no tiene relación con No. de Mes

Ha=No. de Falla tiene relación con No. de Mes

Como X=No. de Mes es un dato discreto con más de 5 niveles se considera como dato continuo; Y=No. de Falla es un dato discreto, por lo tanto se hará la prueba de hipótesis con una regresión logística binaria.

Binary Logistic Regression: No. De Falla versus No. de Mes

Link Function: Logit

Response Information

Variable	Value	Count	
No. De Falla	1	7	(Event)
	0	5	
	Total	12	

Logistic Regression Table

Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	Odds Ratio	95% CI	
						Lower	Upper
Constant	2.20453	1.56657	1.41	0.159			
No. de Mes	-0.276226	0.203873	-1.35	0.175	0.76	0.51	1.13

Log-Likelihood = -7.048

Test that all slopes are zero: G = 2.205, DF = 1, P-Value = 0.138

Goodness-of-Fit Tests

Method	Chi-Square	DF	P
Pearson	12.6828	10	0.242
Deviance	14.0960	10	0.169
Hosmer-Lemeshow	7.6300	8	0.470

Table of Observed and Expected Frequencies:

(See Hosmer-Lemeshow Test for the Pearson Chi-Square Statistic)

Value	Group										Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1												
Obs	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1		7
Exp	0.2	0.3	0.4	0.4	1.1	0.6	0.7	0.8	0.8	1.7		
0												
Obs	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1		5
Exp	0.8	0.7	0.6	0.6	0.9	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3		
Total	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2		12

Measures of Association:

(Between the Response Variable and Predicted Probabilities)

Pairs	Number	Percent	Summary Measures
Concordant	26	74.3	Somers' D 0.49
Discordant	9	25.7	Goodman-Kruskal Gamma 0.49
Ties	0	0.0	Kendall's Tau-a 0.26
Total	35	100.0	

Fig. 3.1 Resultados de Minitab de Regresión Logística para prueba de hipótesis entre No. de Falla y No. de Mes (Caso 1: Incremento de Ventas)

Dado que el valor de $p=0.138$ es mayor que 0.05 se acepta H_0 , es decir la ocurrencia de falla no depende del tiempo. Por lo que se utilizará la tabla 2.9, ya que no han existido acciones de mejora previas.

3.1.2.2 Ponderación de la Ocurrencia caso 2

Al igual que el caso 1, se realiza una prueba de hipótesis para conocer si la ocurrencia de fallas en el caso 2, es una función del tiempo, de esta forma se tienen los datos de la siguiente tabla:

No. de Fallas	Costo (en pesos) de Refacciones con antigüedad mayor a 180 días	No. de Mes
1	\$2,415,298.70	1
1	\$2,376,576.96	2
0	\$748,545.78	3
0	\$714,798.45	4
1	\$2,287,404.99	5
1	\$2,211,326.86	6
1	\$2,314,456.50	7

Tabla 3.2 Tabla de Ocurrencia de Falla de Reducción de Inventario Obsoleto (Caso 2)
(Cortesía DIZAR S.A de C.V.)

Se realiza también una prueba de hipótesis para conocer si el No.de Fallas depende del tiempo, es decir, del No. de Mes; a continuación se muestran los resultados de la prueba de hipótesis en Minitab.

Ho=No.de Falla no depende de No.de Mes
Ha=No.de Falla depende de No. de Mes

Como X=No.de Mes es un dato discreto y no puede considerarse el mismo como continuo ya que no tiene por lo menos 5 niveles, Y=No.de Fallas es un dato discreto, por lo tanto se hará una prueba de hipótesis de Xi cuadrada, de esta forma se sintetizan los datos de la tabla anterior en la siguiente tabla:

Descripción Falla	No. de Mes<4	No.de Mes ≥ 4
Falla(1)	2	3
No Falla(0)	1	1

Tabla 3.3 Tabla de Resumen de Ocurrencia de Falla de Reducción de Inventario Obsoleto (Caso 2)
(Elaboración Propia)

A continuación se muestran los resultados de Minitab de la Prueba Xi cuadrada

Chi-Square Test: No. de Mes<4, No.de Mes ≥ 4

Expected counts are printed below observed counts
Chi-Square contributions are printed below expected counts

	No. de Mes<4	No.de Mes ≥ 4	Total
1	2	3	5
	2.14	2.86	
	0.010	0.007	
2	1	1	2
	0.86	1.14	
	0.024	0.018	
Total	3	4	7

Chi-Sq = 0.058, DF = 1, P-value = 0.192

Fig. 3.2 Resultados de Minitab de Prueba de Xi cuadrada para prueba de hipótesis entre No. de Falla y No. de Mes (Caso 2: Reducción de Inventario Obsoleto)

Dado que el valor de $p > 0.05$ se acepta H_0 , es decir el No. de Falla no depende de No. de Mes, por lo que se utilizará la tabla 2.8, ya que no han existido acciones de mejora previas.

3.1.3 Ponderación de la detección en 2 casos reales en una organización de servicio

3.1.3.1 Ponderación de la detección en caso 1

Para la ponderación de la detección del caso 1 se utilizará la tabla 2.24

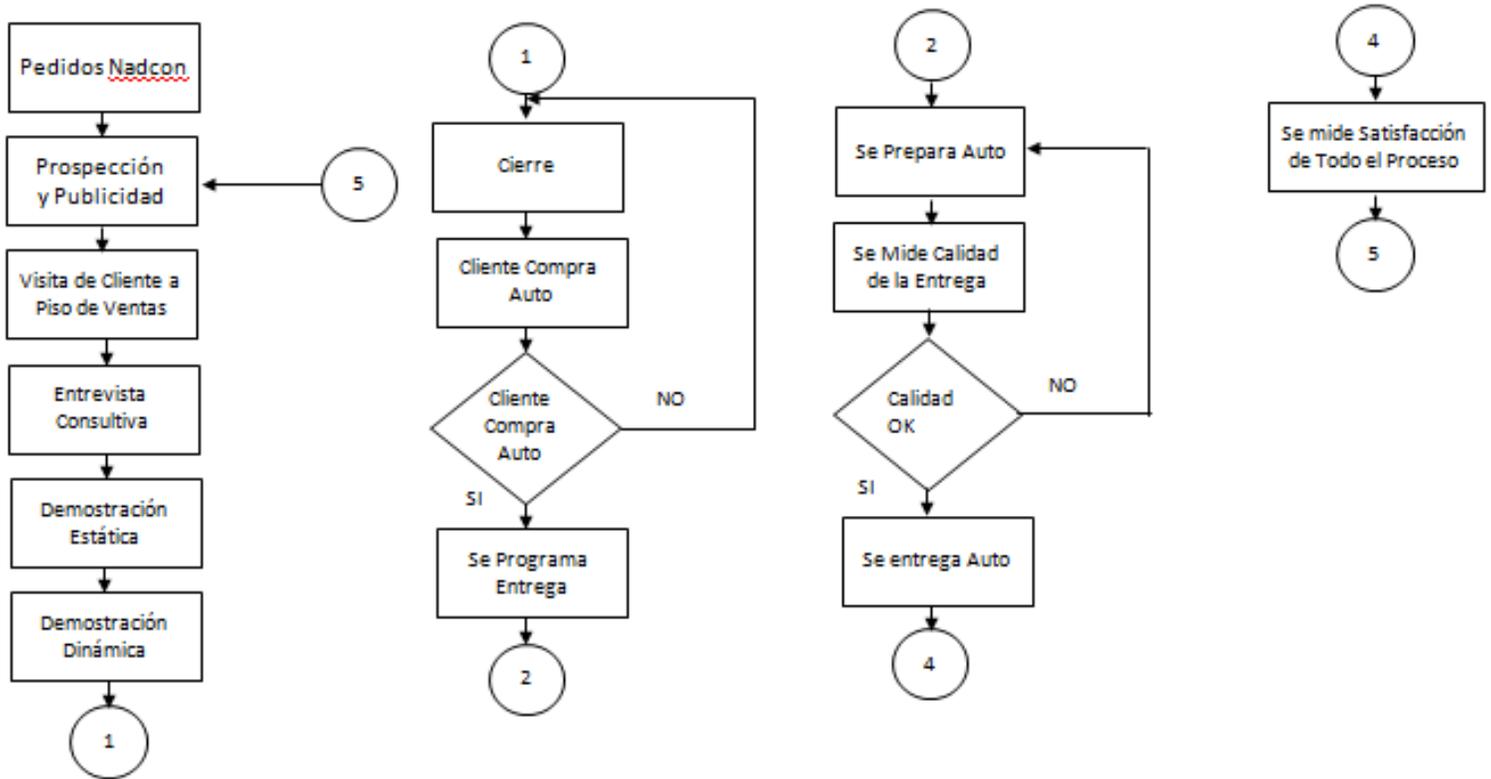
3.1.3.2 Ponderación de la detección en caso 2

Para la ponderación de la detección del caso 2 se utilizará la tabla 2.25

3.1.4 Diagrama de Flujo de dos casos reales en una organización de servicio

3.1.4.1 Diagrama de Flujo Caso 1

A continuación se muestra el diagrama de flujo del proceso del caso 1



3.1.4.2 Diagrama de Flujo Caso 2

Fig. 3.3 Diagrama de Flujo de Proceso para Caso 1 (Incremento de Ventas)
(Elaboración Propia)

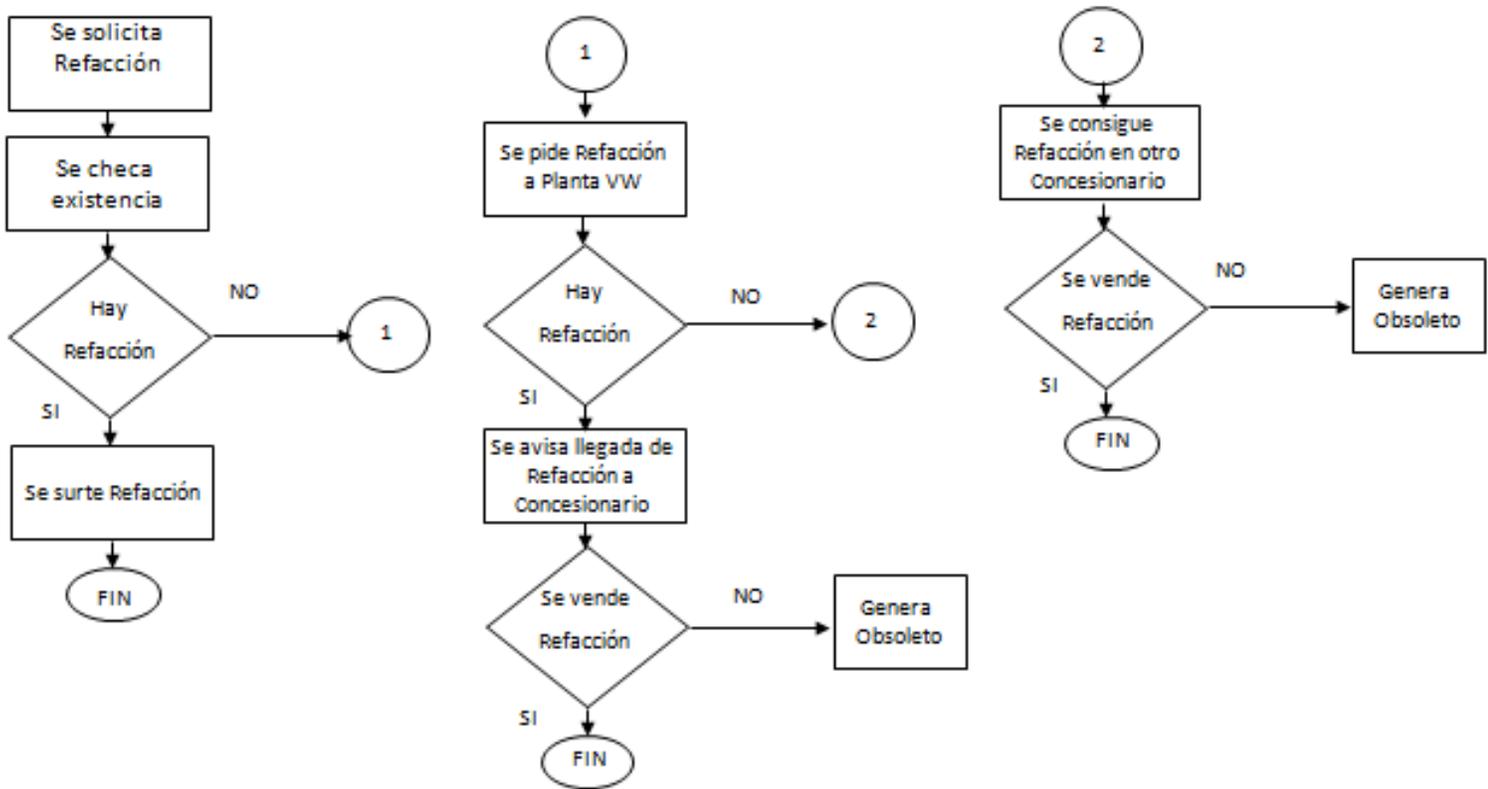


Fig. 3.4 Diagrama de Flujo de Proceso para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)
(Elaboración Propia)

3.1.5 Árbol de Variables Críticas de Calidad (CTQ's) de dos casos reales en una organización de servicio

En este apartado se muestra el árbol de variables críticas, que muestra los objetivos particulares de mejora derivados del objetivo principal o general que se quiere mejorar en cada caso. Estos objetivos particulares (variables críticas de calidad) ayudarán más adelante a seleccionar (con la matriz causa-efecto) los pasos más importantes de los diagramas de flujo de cada proceso, así como las variables más importantes que influyen en los mismos.

3.1.5.1 Árbol de Variables Críticas de Calidad de caso 1

	Afluencia de Prospectos al Concesionario
	Unidades con más de 60 días en Inventario
Incremento de Ventas	Eficiencia de Cierre
	Número de Prospectos Atendidos
	Implementación de Puntos de Venta
	Número de Cotizaciones

Fig. 3.5 Árbol de Variables Críticas de Calidad para Caso 1 (Incremento de Ventas) (Elaboración Propia)

3.1.5.2 Árbol de Variables Críticas de Calidad de caso 2

	Refacciones con más de 180 días de antigüedad
	Venta concretada de pedidos potenciales de refacciones
Disminución de Refacciones Obsoletas	Devoluciones oportunas a planta VW
	Venta del 50% de refacciones obsoletas en 1 mes
	Margen de utilidad mínimo de 10% en venta de refacciones obsoletas

Fig. 3.6 Árbol de Variables Críticas de Calidad para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto) (Elaboración Propia)

3.1.6 Matriz Causa-Efecto de Diagrama de Flujo de dos casos reales en una organización de servicio

La matriz causa-efecto de los diagramas de flujo de los procesos para ambos casos, permitirá seleccionar los pasos del proceso que influyen más en el logro de los objetivos particulares de cada proyecto de mejora, los cuales a su vez se derivan del objetivo principal o general que se pretende mejorar. Cabe mencionar que el resultado de la columna "TOTAL" corresponde a la suma de cada multiplicación entre renglón (calificación de cada paso de proceso dada por el equipo de expertos del proceso) y columna (objetivos particulares de mejora derivados del objetivo principal o general de mejora).

Para las matrices del apartado 3.1.8 el procedimiento para calcular el resultado de la columna "TOTAL" es el mismo al descrito anteriormente, con la diferencia que el renglón denota la calificación de las variables que influyen en los objetivos particulares de mejora.

La escala utilizada para todas las matrices causa-efecto (apartados 3.1.6 y 3.1.8) realizadas para ambos casos es:

- 10 = MUY INFLUYENTE
- 8 = INFLUYENTE
- 6 = MODERADAMENTE INFLUYENTE
- 4 = RELACIONADO
- 2 = NADA RELACIONADO

Se seleccionó esta escala par de 2 a 10 para poder tener por una parte un grado de discriminación entre cada paso del proceso o entre cada variable, es decir para poder establecer diferencias. Y por otra parte, para no descuidar la medición del grado de influencia, es decir poder calificar a lo más con una diferencia de dos puntos el grado en que un paso de proceso o una variable influyen en los objetivos particulares de mejora de cada caso.

La calificación para todas las matrices causa efecto (apartados 3.1.6 y 3.1.8) ya fuera tanto para calificar los pasos del proceso más influyentes, así como para calificar las variables más influyentes de dichos pasos de proceso, se realizó con una dinámica de grupo con todas las personas involucradas en los procesos de ambos casos.

Para calificar los pasos de proceso más influyentes y las variables más influyentes de dichos pasos para el caso 1, estuvo involucrado un grupo de 22 personas para realizar las matrices de los apartados 3.1.6.1 y 3.1.8.1

Para calificar los pasos de proceso más influyentes y las variables más influyentes de dichos pasos para el caso 2, estuvo involucrado un grupo de 15 personas para realizar las matrices de los apartados 3.1.6.2 y 3.1.8.2

3.1.6.1 Matriz Causa-Efecto de Diagrama de Flujo de caso 1

Pasos del Proceso	CTQ's						TOTAL
	10	10	10	10	10	8	
	Afluencia de Prospectos al Concesionario	Unidades con mas de 60 dias en Inventario	Eficiencia de Cierre	Numero de Cotizaciones	Implementación de Puntos de Venta	Numero de Prospectos Atendidos	
Mediciones Nadcon	8	10	10	8	10	10	520
Inspección y publicidad	10	6	6	10	8	8	480
Visita de Clientes Piso de Ventas	10	6	10	10	6	10	488
Entrevista Consultiva	8	0	10	6	6	8	352
Demostración estática	10	10	10	6	6	10	488
Demostración Dinámica	10	10	10	6	6	10	488
Revisión de Cliente	10	6	10	8	6	8	452
Cliente Compra auto	6	6	6	6	6	6	336
Revisión de programa entrega	6	6	6	6	6	6	336
Prepara Auto	10	6	6	10	6	6	356
Revisión de Calidad y la Entrega	10	6	6	10	6	6	356
Entrega Auto	10	6	6	10	6	6	356
Revisión de satisfacción de todo el Proceso	10	8	10	10	8	8	508

Fig. 3.7 Matriz Causa-Efecto de Diagrama de Flujo Caso 1 (Incremento de Ventas)
(Elaboración Propia)

3.1

Pasos del Proceso	CTQ's					TOTAL
	10	10	10	8	8	
	Refacciones con mas de 180 días de antigüedad	Venta Concreta de Pedidos Potenciales de Refacciones	Devoluciones Oportunas a planta VW	Venta del 50% de Refacciones Obsoletas en 1 mes	Margen de Utilidad Mínimo de 10% en Venta de Refacciones Obsoletas	
Se solicita Refacción	10	10	10	10	10	460
Se checa existencia de Refacción	10	10	10	10	10	460
Hay Refacción	10	10	10	10	10	460
Se surte Refacción	7	10	0	0	0	170
Se pide Refacción a planta VW	10	10	10	10	10	460
Hay Refacción	10	10	10	10	10	460
Se avisa llegada de Refacción a Concesionario	10	10	10	10	10	460
Se vende Refacción	10	10	10	10	10	460
Genera Obsoleto	10	10	10	10	10	460
Se consigne Refacción en otro Concesionario	10	10	0	10	10	360
Se vende Refacción	10	10	10	10	10	460
Genera Obsoleto	10	10	10	10	10	460

Fig. 3.8 Matriz Causa-Efecto de Diagrama de Flujo Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)
(Elaboración Propia)

3.1.7 Diagrama Causa-Efecto de dos casos reales en una organización de servicio

A continuación se muestran los diagramas causa-efecto para ambos casos. Cada espina del diagrama está representado por los pasos del proceso con mayor influencia en los objetivos de mejora (particulares y generales), los cuales fueron arrojados en el apartado anterior por la matriz causa-efecto del diagrama de flujo.

El diagrama causa-efecto muestra las variables que influyen o que se tendrán que controlar en los pasos de proceso más influyentes para los objetivos de mejora.

Los Diagramas de este apartado fueron realizados por el grupo de personas involucradas que se menciona en el apartado 3.1.6. en una dinámica de grupo.

3.1.7.1 Diagrama Causa-Efecto de caso 1

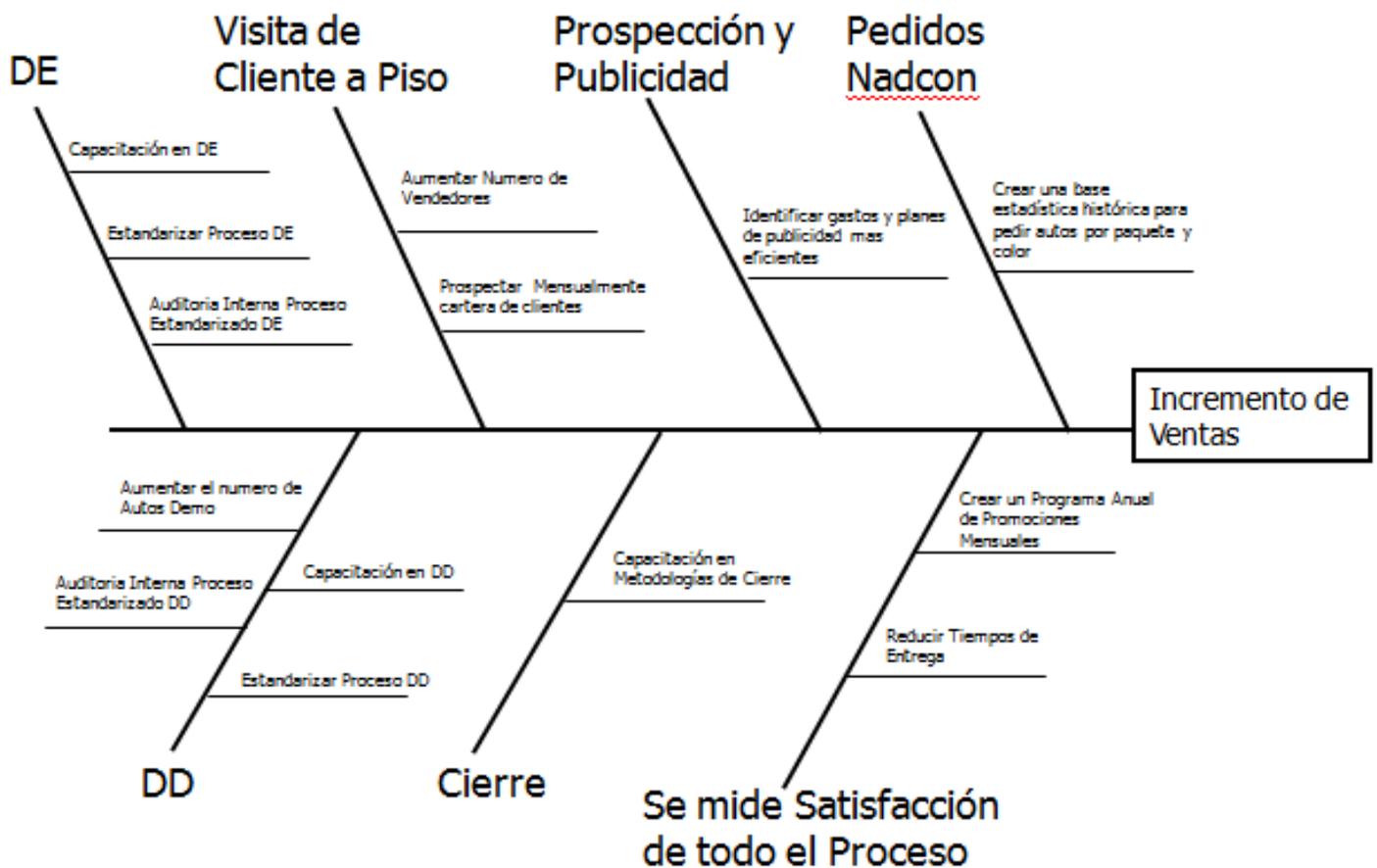


Fig. 3.9 Diagrama Causa-Efecto de Caso 1 (Incremento de Ventas)
(Elaboración Propia)

3.1.7.2 Diagrama Causa-Efecto de caso 2

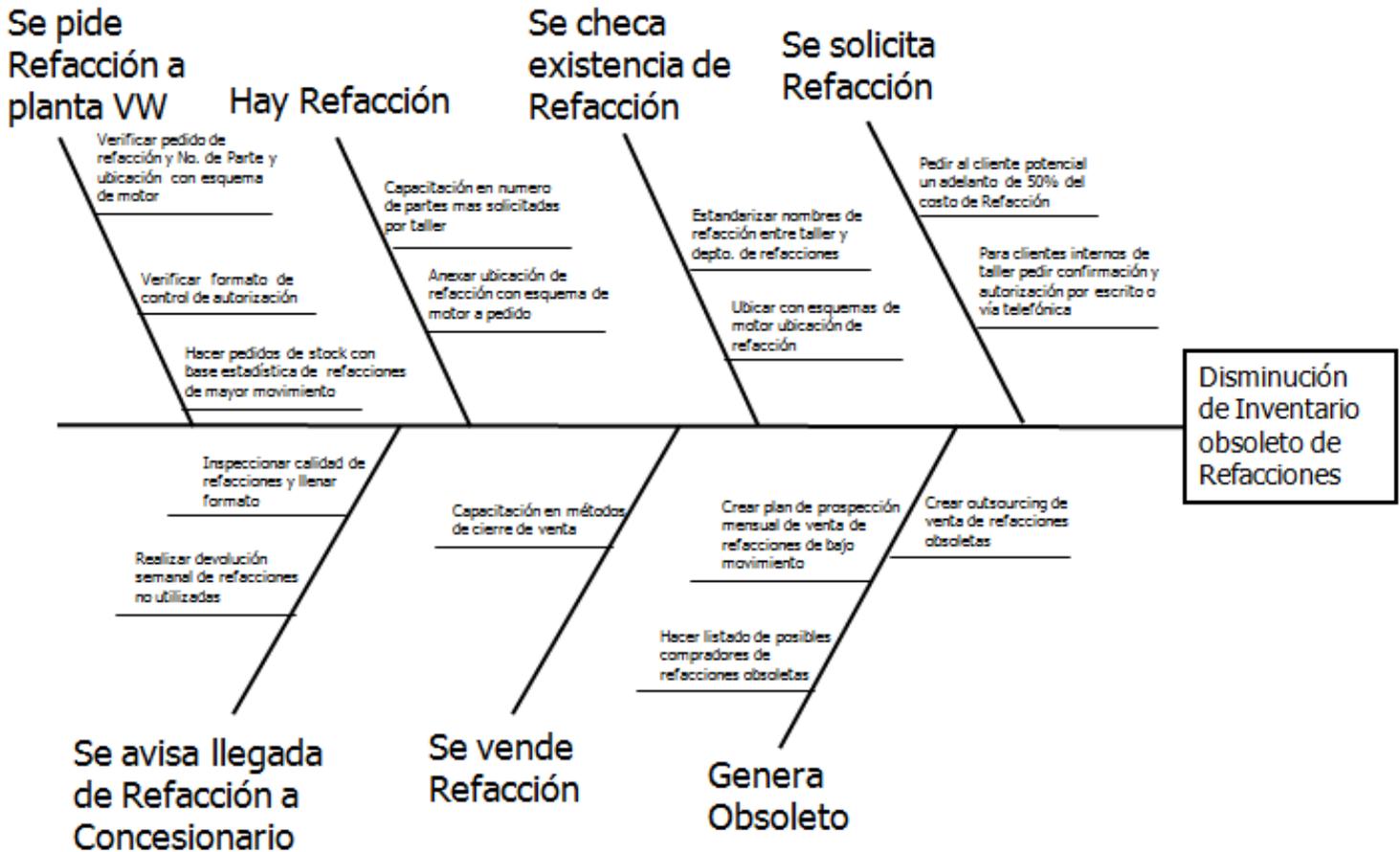


Fig. 3.10 Diagrama Causa-Efecto de Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)
(Elaboración Propia)

3.1.8 Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto de dos casos reales en una organización de servicio

La matriz causa-efecto de los diagramas causa-efecto, permitirá seleccionar las variables que influyen más en los objetivos de mejora (particulares y generales); dichas variables marcarán la pauta de las acciones de mejora propuestas por el AMEF.

De esta forma, con la primer matriz causa-efecto, se han seleccionado los pasos del proceso más influyentes en los objetivos de mejora. Con la segunda matriz (matriz causa-efecto de diagrama causa-efecto), se seleccionarán las variables más influyentes (de dichos pasos más influyentes) en los objetivos de mejora.

3.1.8.1 Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto de caso 1

Variables	CTQ's								TOTAL
	10	10	10	10	10	8	8		
	Afluencia de Prospectos al Concesionario	Unidades con mas de 60 dias en inventario	Eficiencia de Cierre	Numero de Cotizaciones	Implementación de Puntos de Venta	Numero de Proyectos Atendidos			
Identificar gastos y planes de publicidad mas eficientes	10	10	10	10	10	10	10	560	
Crear una base estadística para pedir autos	10	10	10	10	10	10	10	560	
Aumentar No. de Vendedores	8	10	10	10	10	10	10	540	
Prospectar Mensualmente cartera de clientes	10	10	10	10	10	10	10	560	
Capacitación en DE	10	8	10	10	10	10	10	540	
Estandarizar Proceso DE	10	8	10	10	10	10	10	540	
Auditoria Interna Proceso Estandarizado DE	10	8	10	10	10	10	10	540	
Aumentar No. de Autos Demo	10	10	10	10	10	10	10	560	
Capacitación en DD	10	8	10	10	10	10	10	540	
Estandarizar Proceso DD	10	8	10	10	10	10	10	540	
Auditoria Interna Proceso Estandarizado DD	10	8	10	10	10	10	10	540	
Capacitación de Metodologías de Cierre	10	10	10	10	10	10	10	560	
Crear un plan anual de promociones mensuales	10	10	10	10	10	10	10	560	
Reducir tiempos de Entrega	10	8	10	10	10	10	10	540	

Fig. 3.11 Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto para Caso 1 (Incremento de Ventas)] 16 (Elaboración Propia)

3.8.1.2 Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto de caso 2

Variables	CTQ's					TOTAL
	10	10	10	10	10	
	Refacciones con mas de 180 dias de antigüedad	Venta Concreta de Pedidos Personales de Refacciones	Devoluciones Oportunas a planta VW	Venta del 50% de Refacciones Obsoletas en 1 mes	\$	\$
Pedir a cliente potencial un adelanto de 50% del costo de Refacción	10	10	10	10	10	460
Para clientes internos de taller pedir confirmación y autorización por escrito o vía telefónica	10	10	10	10	10	460
Estandarizar nombre de refacción entre taller y depno. de refacciones	10	10	10	10	10	460
Ubicar con esquemas de motor ubicación de refacción	10	10	10	10	10	460
Capacitación en numero de partes mas solicitadas por taller	10	10	10	10	10	460
Añadir ubicación con esquema de motor a pedido	10	10	10	10	10	460
Verificar pedido de refacción y No. de parte y ubicación con esquema de motor	10	10	10	10	10	460
Verificar formato de control de autorización	10	10	10	10	10	460
Hacer pedidos de stock con base estadística de refacciones de mayor movimiento	10	10	10	10	10	460
Inspeccionar calidad de refacciones y llenar formato	10	10	10	10	10	460
Realizar devoluciones semanales de refacciones no utilizadas	10	10	10	10	10	460
Capacitación de métodos de cierre de Venta	10	10	10	10	10	460
Crear plan de prospección mensual de venta de refacciones	10	10	10	10	10	460
Hacer lista de posibles compradores de refacciones obsoletas	10	10	10	10	10	460
Crear outsourcing de ventas de refacciones obsoletas	10	10	10	10	10	460

Fig. 3.12 Matriz Causa-Efecto de Diagrama Causa-Efecto para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)
(Elaboración Propia)

3.1.9 Aplicación Final de AMEF en dos casos reales en una organización de servicio.

Una vez realizado el análisis previo al AMEF (diagrama de flujo, árbol de variables críticas de calidad, matriz causa-efecto de diagrama de flujo, diagrama causa-efecto, matriz causa-efecto de diagrama causa-efecto), se puede presentar la aplicación final del AMEF para cada caso de mejora.

Cabe mencionar que el AMEF está compuesto de izquierda a derecha por los siguientes elementos (columnas) :

- a) Primera columna: Pasos del Proceso
- b) Segunda columna: Modo de falla potencial ó descripción de la falla
- c) Tercera columna: Efecto del modo de falla potencial ó descripción de falla
- d) Cuarta columna: Calificación de la severidad del modo de falla potencial ó descripción de falla conforme a la escala de ponderación que se haya establecido para la severidad
- e) Quinta columna: Causa potencial del modo de falla potencial o descripción de falla
- f) Sexta columna: Calificación de la ocurrencia del modo de falla potencial o descripción de falla conforme a la escala de ponderación que se haya establecido para la ocurrencia
- g) Séptima columna: Controles actuales que existen para mitigar el modo de falla potencial ó descripción de falla
- h) Octava columna: Calificación de la detección del modo de falla potencial o descripción de falla conforme a la escala de ponderación que se haya establecido para la detección
- i) Novena columna: Número de Prioridad de Riesgo ó RPN del modo de falla potencial ó descripción de falla
- j) Decima columna: Acciones recomendadas para eliminar, prevenir o controlar el modo de falla potencial o descripción de falla

Cabe mencionar que la columna de “RPN” se calcula a partir de la multiplicación de las columnas “S”, “O”, “D”, severidad, ocurrencia y detección respectivamente; las personas involucradas para la calificación de estas tres variables son las que se mencionan en el apartado 3.1.6 para ambos casos (caso 1 y caso 2).

3.1.9.1 Aplicación Final de AMEF en caso 1

Paso del Proceso	Modo de Falla Potencial	Efecto de Falla Potencial	S	Causa Potencial	O	Controles Actuales	D	RPN	Acciones Recomendadas
Pedidos Nadcon	No existe una base histórica	Venta Perdida	10	No se había analizado	10	Ninguno	10	1000	Crear una base histórica de pedidos por color y paquete
Proposición y Publicidad	No se ha analizado cual es el mejor plan de publicidad	Gastos Innecesarios y Publicidad No Efectiva	10	No se había analizado	10	Reporte Contable de Comos y Gastos	5	500	Analizar los planes que han atraído más clientes al piso de ventas
Vista de Clientes a Puro de Ventas	La fuerza de ventas no cubre suficientes prospectos	Menos Proposición y Menos cartera	10	No se había analizado	10	Reporte de Proposición Sistema Olimex Ventas	10	1000	Incrementar el numero de vendedores si la prueba de hipótesis resulta positiva
Vista de Clientes a Puro de Ventas	No se prospecta la cartera de clientes	Menos Proposición y Menos Ventas	10	No se ha realizado antes	10	Ninguno	10	1000	Implementar un Plan de Proposición de Carrera de Clientes e Implementar un formato de Supervisión, Medición y Control
Demonstración Estática	Carencia de Capacitación Constante	Mala Imagen y Venta Perdida	10	Periodos Largos de Capacitación	10	Rol de Capacitación	5	405	Crear un programa constante y de corto periodo de capacitación y evaluación en DE y Datos Técnicos de Modelos de Automóviles
Demonstración Estática	Carencia de procedimiento	Mala Imagen y Venta Perdida	10	No se ha estandarizado	10	Ninguno	5	405	Implementar un Procedimiento Estandarizado de DE
Demonstración Estática	Falta de Auditoría Interna de Proceso Estandarizado	Mala Imagen y Venta Perdida	10	No existe	10	Ninguno	5	405	Implementar un programa de Auditoría Interna Constante en DE
Demonstración Dinámica	No hay suficientes autos demo	Mala Imagen y Venta Perdida	10	No se había analizado	10	Ninguno	10	1000	Incrementar el numero de autos demo si la prueba de hipótesis resulta positiva
Demonstración Dinámica	Carencia de Capacitación Constante	Mala Imagen y Venta Perdida	10	Periodos Largos de Capacitación	10	Rol de Capacitación	5	405	Crear un programa constante y de corto periodo de capacitación y evaluación en DDy Datos Técnicos de Modelos de Automóviles
Demonstración Dinámica	Carencia de procedimiento	Mala Imagen y Venta Perdida	10	No se ha estandarizado	10	Ninguno	5	405	Implementar un Procedimiento Estandarizado de DD
Demonstración Dinámica	Falta de Auditoría Interna de Proceso Estandarizado	Mala Imagen y Venta Perdida	10	No existe	10	Ninguno	5	405	Implementar un programa de Auditoría Interna Constante en DD

Fig. 3.13 1ra parte de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)
(Elaboración Propia)

Paso del Proceso	Modo de Falla Potencial	Efecto de Falla Potencial	S	Causa Potencial	O	Controles Actuales	D	RPN	Acciones Recomendadas
Cierre	Carencia de Capacitación Constante	Mala Imagen y Venta Perdida	10	Periodos Largos de Capacitación	10	Rol de Capacitación	5	405	Crear un programa constante y de Corto Periodo de Capacitación y Evaluación en Metodologías de Cierre
Se mide satisfacción de todo el proceso	No se hacen promociones en periodos mas cortos de tiempo	Menos Ventas y Gastos Innecesarios en Publicidad No Efectiva	10	No se habia analizado	10	Bono de Publicidad de Plaza VW	5	500	Implementar promociones con mayor frecuencia en el año, hacer alianzas con otras empresas (bancos) para ofrecer obsequios y planes de financiamiento atractivos
Se mide satisfacción de todo el proceso	No se ha analizado cuales son los cuellos de botella en el proceso de ventas de autos nuevos	Mala Imagen y Venta Perdida	10	No se habia analizado	10	Ninguno	10	1000	Realizar un proyecto de Manufactura Estrella para eliminar Valor No Agregado a las operaciones del proceso de venta

Fig. 3.14 2da parte de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)
(Elaboración Propia)

3.1.9.2 Aplicación Final de AMEF en caso 2

Paso del Proceso	Modo de Falla Potencial	Efecto de Falla Potencial	S	Causa Potencial	O	Controles Actuales	D	RPN	Acciones Recomendadas
Se solicita Refacción	No se pide a cliente adelanto de 50% de pago	Genera inventario obsoleto	4	No se había contemplado	4	Ninguno	2	32	Pedir adelanto de 50% para vender refacción e Implementar auditoría semanal
Se solicita Refacción	No se pide autorización por escrito a taller o algún formato de control	Genera inventario obsoleto	4	No se había contemplado	4	Ninguno	2	32	Implementar un formato de control de autorización en pedido de refacciones
Se checa existencia de Refacción	No se tienen estandarizados los nombres de refacciones entre taller y Depto. de Refacciones	Errores en el pedido de refacciones	4	No se había contemplado	4	Ninguno	2	32	Implementar programa de capacitación y estandarización de términos de refacciones entre taller y Depto. de refacciones
Se checa existencia de Refacción	No se ubica con esquemas ilustrativos la localización de la refacción	Errores en el pedido de refacciones	4	Falta de control	4	Esquema de Explosión de partes de Sist. Gedas	4	64	Implementar uso de esquema de Explosión de Partes de Sist Gedas y Auditar semanalmente
Hay Refacción	No se ha capacitado a el personal en los números de parte mas solicitados por taller	Errores en el pedido de refacciones	4	Falta de control	4	Ninguno	4	64	Auxiliar estandarizadamente refacciones mas vendidas a taller e Implementar capacitación de numero de parte con base en el análisis estadístico al personal de refacciones
Hay Refacción	No se anexa en el pedido de refacciones la ubicación en el motor o en el auto de la refacción	Falta de control en el pedido de refacciones	4	Falta de Control	4	Ninguno	4	64	Implementar que a todos los pedidos de refacciones se les anexe el esquema de explosión de partes de Sist. Gedas y auditar semanalmente
Se pide Refacción a planta VW	No se verifica el pedido de refacción con una ayuda visual (esquema de ubicación)	Falta de control en el pedido de refacciones	4	Falta de Control	4	Ninguno	4	64	Implementar procedimiento de verificación de pedido con esquema de explosión de partes de Sist Gedas y auditar semanalmente

Fig. 3.15 1ra parte de AMEF para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)
(Elaboración Propia)

Paso del Proceso	Modo de Falla Potencial	Efecto de Falla Potencial	S	Causa Potencial	O	Controles Actuales	D	RPN	Acciones Recomendadas
Se pide Refacción a planta VW	No se verifica el formato de control de autorización	Falta de control en el pedido de refacciones	4	Falta de Control	4	Ninguno	4	64	Implementar procedimiento de verificación de pedido con formato de control de autorización y auditar semanalmente
Se pide Refacción a planta VW	No se piden refacciones de mayor movimiento con base estadística	Falta de control en el pedido de refacciones	4	Falta de Control	4	Ninguno	4	64	Implementar una base estadística para el pedido de refacciones
Se avisa de llegada de refacción a Concesionario	No se tiene un procedimiento para la inspección de refacciones recién llegadas y tampoco se inspeccionan al 100%	Falta de control en la llegada de refacciones	4	Falta de Control	4	Ninguno	4	64	Implementar procedimiento de inspección de refacciones e inspección al 100% y auditar semanalmente
Se avisa de llegada de refacción a Concesionario	No se realiza la devolución de refacciones ni oportunamente ni frecuentemente	Falta de Control en devoluciones	4	Falta de control	4	Ninguno	4	64	Implementar procedimiento de devolución de refacciones con formato de control y auditar semanalmente
Se vende Refacción	No se ha capacitado a el personal de refacciones en métodos de cierre de ventas	Falta de Cierre de Ventas y Generar mas inventario	4	Falta de control	4	Ninguno	4	64	Implementar programa de capacitación y evaluación de cierre de ventas en cortos periodos de tiempo para vendedores de refacciones
Genera Obsoleto	Crear plan de proyección de venta mensual de refacciones de bajo movimiento	Falta de Control en el proceso de salida de refacciones	4	Falta de Control	4	Ninguno	4	64	Implementar procedimiento de proyección de compradores potenciales de refacciones obsoletas y Crear plan de ventas mensual de refacciones obsoletas
Genera Obsoleto	No se tiene un listado de posibles compradores de refacciones obsoletas	Falta de Control en el proceso de salida de refacciones	4	Falta de Control	4	Ninguno	4	64	Hacer cuentas de paginas de distribuidores grandes, medianos y pequeños de refacciones así como de compradores de email y destinatarios
Genera Obsoleto	No se tiene contemplado el outsourcing de venta de refacciones obsoletas	Falta de Control en el proceso de salida de refacciones	4	Falta de Control	4	Ninguno	4	64	Realizar visitas a grandes distribuidores de refacciones y concertar esquemas de pago de comisión por la venta de refacciones obsoletas

Fig. 3.16 2da parte de AMEF para Caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)
(Elaboración Propia)

3.2 Resultados de la Aplicación de AMEF

A continuación se realizará una comparación y verificación de resultados antes y después de la aplicación del AMEF tanto para el caso 1 como para el caso 2.

3.2.1 Presentación de resultados antes y después de la aplicación de AMEF en caso 1

La siguiente tabla muestra los resultados del año 2006 que corresponde al año antes de la aplicación del AMEF, dichos resultados son:

Falla	No. Autos Nuevos Vendidos al Mes	No. de Mes
1	67	1
0	80	2
1	67	3
1	55	4
1	62	5
1	50	6
1	55	7
0	82	8
0	82	9
0	85	10
1	69	11
0	98	12
Total=7	Promedio de Venta por Mes =71	

Tabla 3.4 Resultados antes de la aplicación de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)
(Cortesía DIZAR S.A. de C.V.)

A continuación se muestran los resultados del año 2007, que corresponde al año en que se implementaron las acciones de mejora sugeridas en la aplicación del AMEF, dichos resultados son:

Falla	No. Autos Nuevos Vendidos al Mes	No. de Mes
0	117	1
1	68	2
0	84	3
0	73	4
0	74	5
1	61	6
0	76	7
1	69	8
0	80	9
0	82	10
0	91	11
0	100	12
Total=3	Promedio de Venta por Mes = 81	

Tabla 3.5 Resultados después de la aplicación de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)
(Cortesía DIZAR S.A. de C.V.)

Una verificación de los resultados puede hacerse empleando el estudio de capacidad de proceso y los gráficos de control para analizar los resultados antes y después de la aplicación del AMEF en el caso 1.

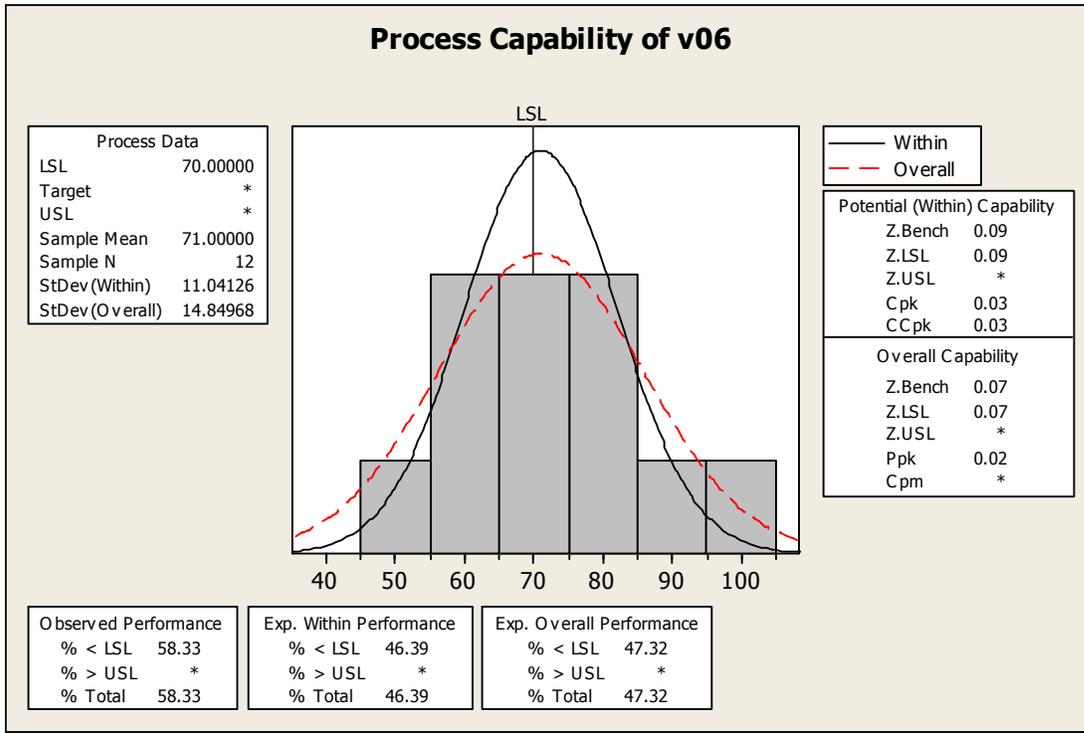


Fig. 3.17 Análisis de Capacidad de Proceso con Minitab antes de la aplicación de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)

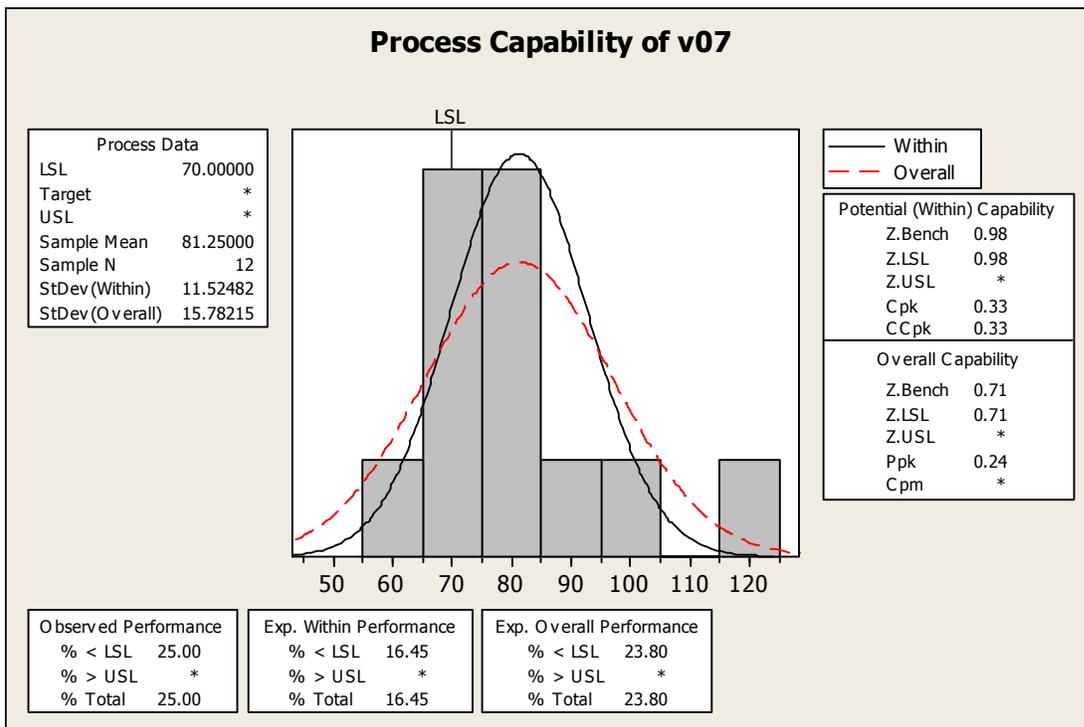


Fig. 3.18 Análisis de Capacidad de Proceso con Minitab después de la aplicación de AMEF para Caso 1 (Incremento de Ventas)

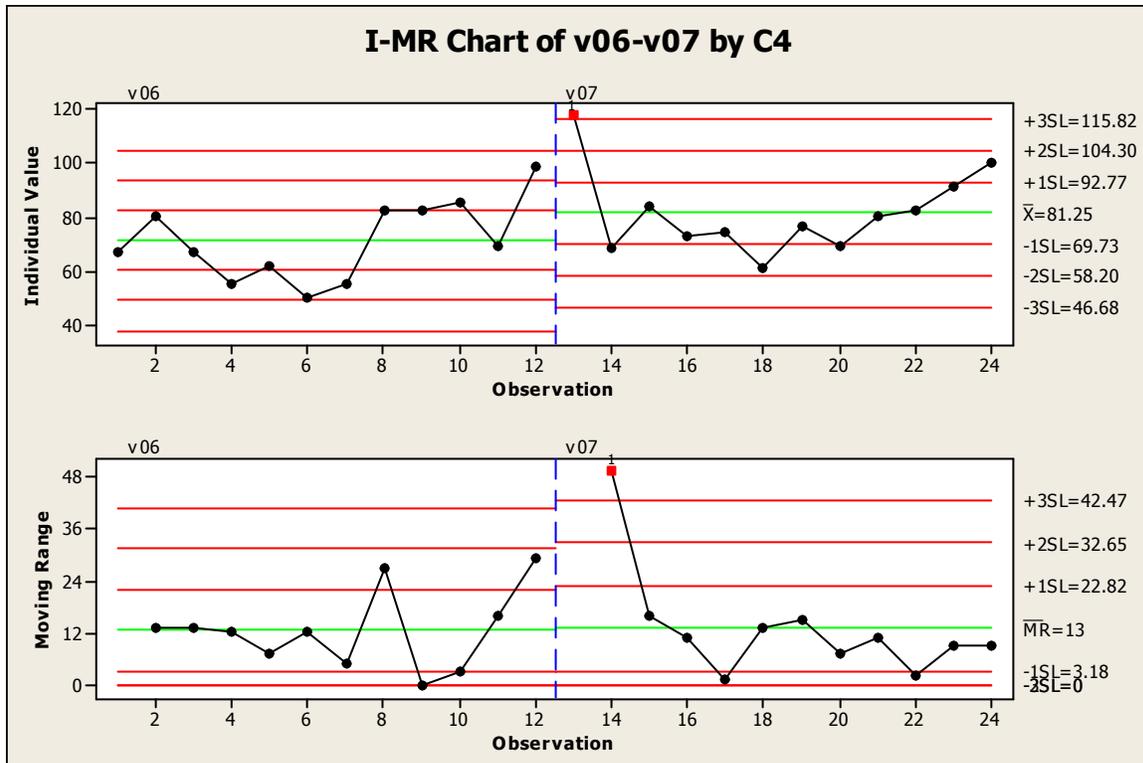


Fig. 3.19 Grafico de Control Comparativo con Minitab entre los Resultados antes y después de la aplicación de AMEF para caso 1 (Incremento de Ventas)

3.2.2 Presentación de resultados antes y después de la aplicación de AMEF en caso 2

A continuación se muestran los resultados de abril a octubre de 2007 que corresponde a los meses antes de la aplicación del AMEF, dichos resultados son:

No. de Fallas	Costo (en pesos) de Refacciones con antigüedad mayor a 180 días	No. de Mes
1	\$2,415,298.70	1
1	\$2,376,576.96	2
0	\$748,545.78	3
0	\$714,798.45	4
1	\$2,287,404.99	5
1	\$2,211,326.86	6
1	\$2,314,456.50	7
Total=5	Promedio=\$1,866,915.46	

Tabla 3.6 Resultados antes de la aplicación de AMEF para caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto) (Cortesía DIZAR S.A. de C.V.)

En la tabla siguiente se muestran los resultados de noviembre de 2007 a mayo de 2008, que corresponden a los meses en que se implementaron las acciones de mejora sugeridas en la aplicación del AMEF, dichos resultados son:

No. de Fallas	Costo (en pesos) de Refacciones con antigüedad mayor a 180 días	No. de Mes
1	\$1,287,404.09	1
1	\$1,211,326.86	2
1	\$934,229.32	3
0	\$57,725.64	4
0	\$57,177.12	5
0	\$57,668.98	6
0	\$0.00	7
Total=3	Promedio=\$515,076.00	

Tabla 3.7 Resultados después de la aplicación de AMEF para caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto) (Cortesía DIZAR S.A. de C.V.)

A continuación se realizará una verificación de los resultados empleando el estudio de capacidad de proceso y los gráficos de control para analizar los resultados antes y después de la aplicación del AMEF en el caso 2.

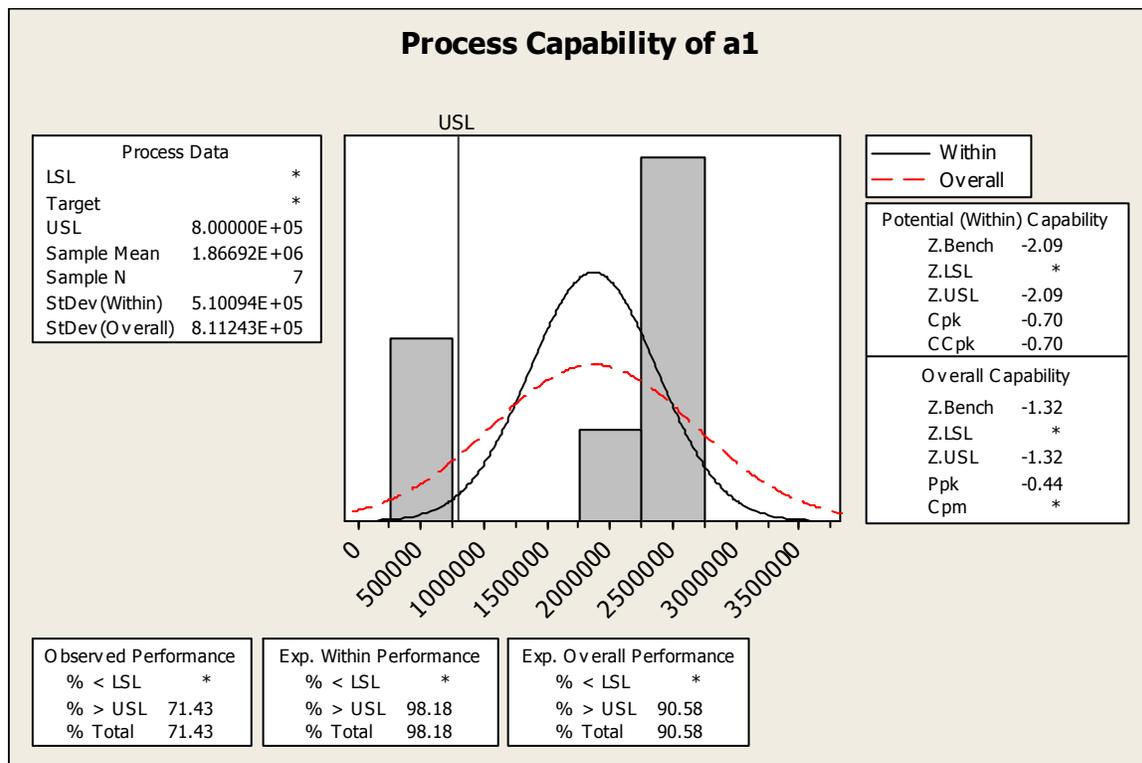


Fig. 3.20 Análisis de Capacidad de Proceso de Minitab antes de la aplicación de AMEF para caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)

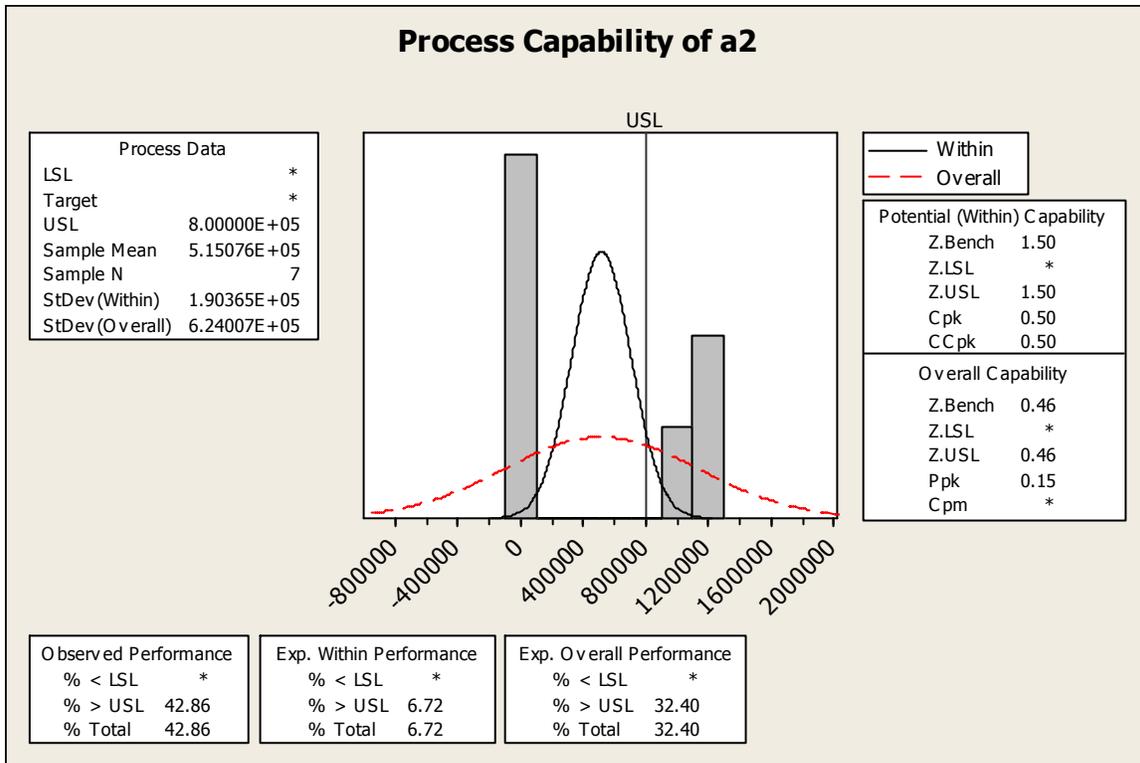


Fig. 3.21 Análisis de Capacidad de Proceso de Minitab después de la aplicación de AMEF para caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto)

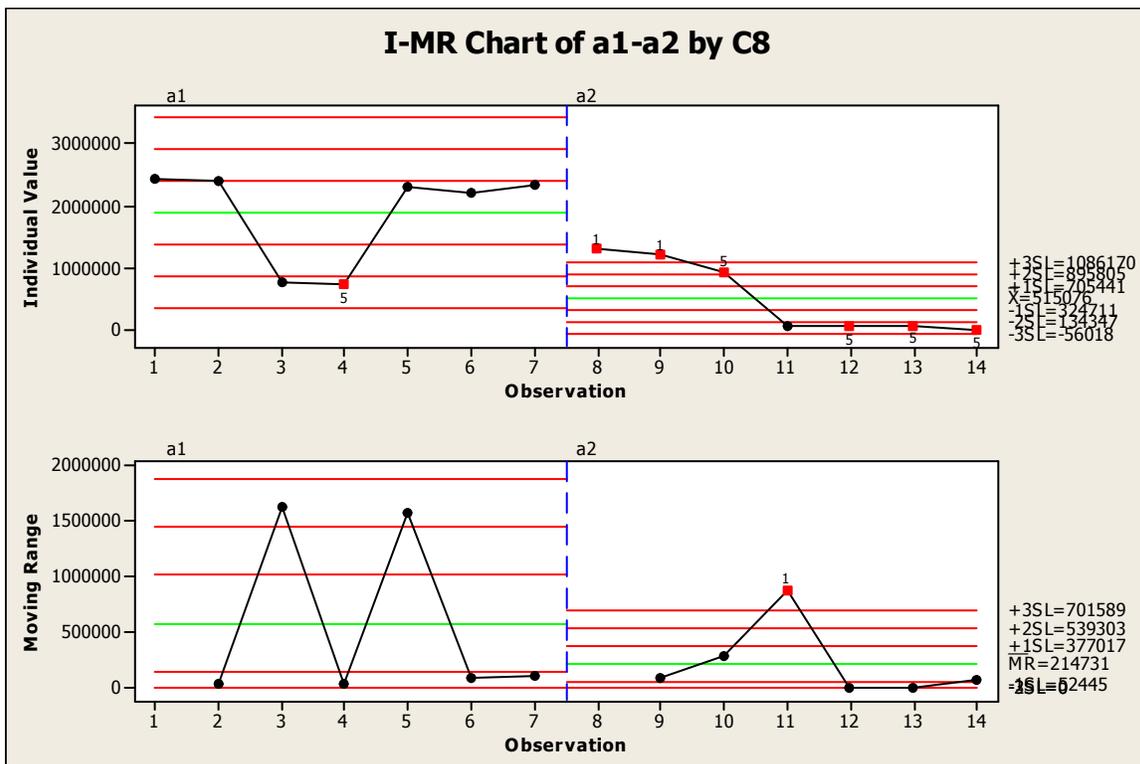


Fig. 3.22 Grafico de Control Comparativo de Minitab entre los Resultados antes y después de la aplicación de AMEF para caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto) 127

3.2.3 Discusión de Resultados

A continuación se presenta la discusión de los resultados presentados anteriormente en los apartados 3.2.1 y 3.2.2

3.2.3.1 Discusión de Resultados para caso 1

Como se observa en las tablas 3.4 y 3.5, el promedio anual de venta mensual se incremento en 10 unidades, por lo que se vendieron 120 autos nuevos más en el 2007 que en el año anterior, 2006. Para verificar estos datos se aplicó un estudio de capacidad de proceso, ya que el promedio es un dato que en aspectos de calidad no debe ser siempre la medición comparativa de una o varias mejoras, puesto que puede existir aún mucha variación (desviación estándar) entre los valores mensuales (venta mensual de autos nuevos).

En la fig. 3.17 se puede observar el valor de la desviación estándar del 2006 que es igual a 11.04. Mientras que en la figura 3.18 se puede observar el valor de la desviación estándar del 2007 que es igual a 11.52. Por lo general la mayoría de los proyectos de mejora de la calidad tratan de reducciones (ya sean no conformidades, defectos, probabilidades de falla, piezas retrabajadas, etc.) buscando siempre que la variación o desviación estándar también se reduzca. Sin embargo, el proyecto del caso 1 no es una reducción sino un incremento de ventas, por lo que la obtención de ventas mayores a 70 unidades en el 2007 puede provocar que se tenga una variación o desviación estándar también mayor en un principio, aunque en el mediano plazo, de continuar aplicándose el AMEF de forma continua, se trataría de enfocar los esfuerzos de mejora también a la reducción de la variación ó desviación estándar y no sólo en el incremento del promedio de ventas por mes. Habría que tenerse en cuenta que el número de acciones de mejora para reducir la variación o desviación estándar deberá ser mucho más grande que aquellas para incrementar el promedio de venta por mes.

En la fig. 3.17 y la fig. 3.18 se pueden observar los valores de "Z.bench". Éste representa el nivel de sigma (σ) del proceso: si el proceso de ventas de autos nuevos fuera un proceso cuasi perfecto o de clase mundial, el valor de "Z.bench" deberá ser mayor o igual a 5. En la fig. 3.17 que representa las ventas del 2006 se observa un valor de Zbench igual a 0.09 mientras que en la fig. 3.18 que representa las ventas del 2007 se observa un valor de Zbench igual a 0.98, con lo que se verifica la mejora de 2007.

También, en la fig. 3.17 y la fig. 3.18 aparece el valor de "Cpk" o de centrado de capacidad de proceso. El valor de Cpk debe ser para un buen proceso mayor o igual a 1.33, sin embargo, para procesos cuasi perfectos ó de clase mundial el valor de Cpk deberá ser mayor o igual a 2. En la fig.3.17 que representa las ventas de 2006 se observa un valor de Cpk igual a 0.03 mientras que en la fig. 3.18 que representa las ventas del 2007 se observa un valor de Cpk igual a 0.33, con lo que se verifica la mejora de 2007.

Por último en la fig. 3.19 se presenta un gráfico de control para medidas individuales ó también conocido como gráfico de control de rangos móviles, en él se observa el aumento en la línea central (promedio de ventas por mes). Así como los puntos 4,5,6 y 7 que son un valle que se tuvo en el 2006, mientras que el valle del 2007 es el punto 18. También se observa que los valores del valle en 2006 son más pequeños y en mayor cantidad (4) que el valle del 2007, con lo que verifica la mejora del 2007.

3.2.3.1.1 Resumen de Resultados Caso 1

Descripción	Valor Antes	Valor Después	Resultado
Promedio de Venta Por Mes	71	81	Mejoro
Cpk	0.03	0.33	Mejoro
Zbench	0.09	0.98	Mejoro
Desviación Estándar	11.04	11.52	Mejoro

Tabla 3.8 Resumen de Resultados antes y después de la aplicación de AMEF para caso 1 (Incremento de Ventas) (Cortesía DIZAR S.A. de C.V.)

3.2.3.2 Discusión de Resultados para caso 2

Como se observa en las tablas 3.6 y 3.7 el costo en inventario de refacciones obsoletos se redujo notablemente. Y se aplicó un estudio de capacidad de proceso para verificar los resultados en la mejora.

En la fig. 3.20 se puede observar el valor de la desviación estándar de abril a octubre de 2007 es igual a $5.10E5$. Mientras que en la figura 3.21 se puede observar el valor de la desviación estándar de noviembre de 2007 a mayo de 2008 es igual a $1.90E5$. En este caso por tratarse de una reducción se observa que en definitiva el valor de la variación o desviación estándar es menor lo que significa una mejora.

En la fig. 3.20 y la fig. 3.21 se pueden observar los valores de “Zbench” y “Cpk”. En la fig. 3.20, que representa el costo en inventario obsoleto de abril a octubre de 2007, se observa un valor de Zbench igual a -2.09 mientras que en la fig. 3.21 que representa el costo en inventario obsoleto de noviembre de 2007 a mayo de 2008 se observa un valor de Zbench igual a 1.50, con lo que se verifica la mejora.

En la fig. 3.20 que representa el costo en inventario obsoleto de abril a octubre de 2007, se observa un valor de Cpk igual a -0.70, mientras que en la fig. 3.21, que

representa el costo en inventario obsoleto de noviembre de 2007 a mayo de 2008, se observa un valor de Cpk igual a 0.50, con lo que se verifica la mejora.

Por último, en la fig. 3.22 se presenta un gráfico de control para medidas individuales o gráfico de control de rangos móviles. En dicho gráfico se observa la reducción en la línea central (promedio de costo en inventario obsoleto). Y se observa notablemente la reducción de puntos entre la zona a1 (costo en inventario obsoleto de abril a octubre de 2007) y la zona a2 (costo en inventario obsoleto de noviembre de 2007 a mayo de 2008), con lo que se verifica la mejora.

3.2.3.2.1 Resumen de Resultados Caso 2

Descripción	Valor Antes	Valor Después	Resultado
Costo Promedio (en pesos) de Refacciones con antigüedad mayor a 180 días	\$1,866,915.46	\$515,076.00	Mejoro
Cpk	-0.70	0.50	Mejoro
Zbench	-2.09	1.50	Mejoro
Desviación Estándar	5.1E5	1.9E5	Mejoro

Tabla 3.9 Resumen de Resultados antes y después de la aplicación de AMEF para caso 2 (Reducción de Inventario Obsoleto) (Cortesía DIZAR S.A. de C.V.)

3.3 Recomendaciones

A continuación se hacen algunas recomendaciones generales para el desarrollo de un AMEF en proyectos de mejora del sector de servicios.

La primera recomendación es utilizar una escala de 1 a 4, 1 a 5 o 1 a 10 para ponderar los tres factores de AMEF (severidad, ocurrencia y detección) con aplicaciones a los servicios. Para ello, se puede hacer uso de las tablas 2.4, 2.5, 2.8, 2.9, 2.11, 2.19, 2.20, 2.24 y 2.25 del capítulo II. En el caso en que se requiera ponderar la severidad, ocurrencia y detección en otro problema o fenómeno de estudio para los servicios cuya descripción no esté contemplada en alguna de las tablas anteriores, se deberá proponer una tabla de ponderación nueva incluyendo solamente escalas en el rango de 1 a 10, ya que para fines prácticos un rango mayor de escala resultaría en un cálculo del número de prioridad de riesgo más complicado. En el caso en que se quisiera utilizar una modificación del AMEF^[1] y se quisieran utilizar otros parámetros diferentes a la severidad, ocurrencia y detección, se sugiere emplear alguno o simultáneamente los siguientes métodos: el proceso analítico de jerarquía (desarrollado por Thomas Saaty en la década de

los 70's), el método multicriteria Promethe-Gaia y/o el método de simulación estadística Monte Carlo^[1].

La segunda recomendación es tener siempre en consideración que para la correcta ponderación de la ocurrencia del AMEF, se deberá seguir el algoritmo planteado en la fig. 2.8. En el caso en que la ocurrencia de fallas sea dependiente de otra variable, primeramente se deberá realizar una prueba de hipótesis para corroborar la dependencia y enseguida se deberá ponderar la ocurrencia de acuerdo al procedimiento planteado en el apartado 2.5.2.3.

La tercera recomendación es realizar el árbol de variables críticas de calidad, lo que permitirá visualizar el nivel en que se tienen que realizar las acciones de mejora para alcanzar los objetivos del proyecto, además de que dará un antecedente para utilizar las matrices causa-efecto^[2].

La cuarta recomendación es que antes de realizar el AMEF se deberá hacer un análisis previo utilizando el diagrama de flujo del proceso, la matriz causa-efecto del diagrama de flujo, el diagrama causa-efecto y por último la matriz causa-efecto del diagrama de causa-efecto. Al utilizar conjuntamente estas herramientas en el orden mencionado, se puede realizar un análisis para seleccionar los pasos del proceso en que habrá que poner mayor atención, así como identificar las variables de mayor importancia en las que habrá que realizar acciones de mejora para alcanzar los objetivos establecidos en el proyecto^[2].

La quinta recomendación es implementar un plan de control en el caso de que no existan registros de medición previos para los objetivos particulares planteados con el árbol de variables críticas de calidad, los modos de falla detectados con el AMEF, y las acciones de mejora planteadas también con el AMEF^[3].

La sexta recomendación es monitorear y medir los resultados de las acciones de mejora propuestas en el AMEF, ya sea midiendo después de la implementación de estas acciones las tres variables del AMEF como lo son la severidad, ocurrencia y detección. O bien, como se observa en los casos 1 y 2, se pueden utilizar otras herramientas de calidad para medir el desempeño de las acciones de mejora, como son el estudio de capacidad de proceso y los gráficos de control^[4].

La séptima recomendación es tener en consideración que para la correcta implementación del AMEF, se debe realizar con base en las herramientas de inferencia estadística como la prueba de hipótesis y el diseño de experimentos. Dichas herramientas se pueden utilizar antes, durante y después de la elaboración del AMEF para establecer una ponderación adicional necesaria de la severidad o de la detección no contemplada en este trabajo de investigación, así como para corroborar de forma objetiva dependencias de las fallas o de los objetivos del proyecto con alguna variable en particular y el desempeño de las acciones de mejora^[5].

La octava recomendación es el revisar los métodos de medición de los datos. Se habría de realizar de forma completa un análisis del sistema de medición antes de iniciar cualquier implementación de acciones de mejora. Para este caso, se deberán realizar pruebas de repetibilidad y reproducibilidad (Gage R&R)^[6].

La novena recomendación es que en el desarrollo del diseño de un producto-servicio, se sugiere aplicar además de la casa de la calidad (QFD), los estudios de confiabilidad pertinentes, el árbol de fallas y los pasos y herramientas que marca el diseño para seis sigma (DFSS)^[7].

Algo de lo que no se tocó en el desarrollo del Capítulo III, fueron los métodos de identificación de fallas del análisis de causa raíz (diagrama factor evento- causa, el análisis de barreras de control, el análisis de árbol de fallas). La razón por la cual dichas herramientas no se aplicaron en el caso 1 y el caso 2, es que el nivel en donde se definieron los proyectos de mejora son en el proceso general (que fue de la venta de autos nuevos o de la generación de inventario obsoleto), es decir, el nivel de estudio se realizó de forma general y no en los pequeños sub-procesos en los cuales se pudiera dividir el análisis de mejora de los procesos generales de ambos casos, ya que lo más recomendable es ir mejorando de lo general a lo particular. Sin embargo, si quisiera definirse un nuevo proyecto de mejora para cada uno de los sub-procesos, las herramientas del análisis de causa raíz serían las más idóneas en el caso en que el árbol de variables críticas, el diagrama de flujo del proceso, la matriz causa-efecto del diagrama de flujo, el diagrama causa-efecto y la matriz causa-efecto del diagrama causa-efecto, no proveyeran información concluyente o fuera excesivamente extensa.

Otra razón del porqué no se utilizaron los métodos de identificación de fallas del análisis de causa raíz, es que éstos son por lo general aplicados cuando se desconoce en un principio la falla o el origen de una falla por el personal involucrado en el proceso, es decir se desconoce por completo la falla o causa de la falla. De esta forma, la decima recomendación es utilizar los métodos de identificación de fallas del análisis de causa raíz cuando la información del diagrama de flujo, la matriz causa efecto del diagrama de flujo, el diagrama causa-efecto, la matriz causa-efecto del diagrama causa-efecto, sea no concluyente o escasa o también en el caso en que los procesos estudiados sean complejos, complicados o muy extensos en el nivel en que se esté realizando el análisis^[8].

La onceava recomendación es que cuando se requiera redefinir el número de prioridad de riesgo, es decir volver más estricto un plan de mejora o sistema de calidad de los servicios, se sugiere seguir el procedimiento visto en el apartado 2.5.4.

Por último, es de vital importancia aclarar que una correcta implementación del AMEF en una organización de servicios, requiere que el personal haya sido capacitado en herramientas de calidad tanto básicas como avanzadas, además de haber tenido una inducción a realizar su trabajo con una cultura de calidad y de mejora continua. Por tal razón, resulta un factor muy importante para la obtención

de resultados mediante la aplicación de herramientas de calidad, el que la alta dirección de una empresa esté completamente involucrada. Si este factor de involucramiento de la alta dirección no se percibe en una organización, difícilmente se podrá implementar una herramienta de mejora o un programa de mejora exitosamente^[2]. También es importante mencionar que el proceso de mejora continua debe movilizar un gran número de empleados orientados a la mejora organizacional^[9], por lo que la creación de valores culturales, capacitación, motivación y liderazgo resultan necesarios e indispensables.

En este capítulo, se expuso la aplicación del AMEF a dos casos reales en una Organización de Servicio, así como los resultados obtenidos a partir de dicha aplicación, así como las recomendaciones y sugerencias que se deben tomar en cuenta para la implementación del AMEF en cualquier Organización de Servicio.

Por último, en el capítulo IV se exponen las conclusiones de este trabajo de tesis.

BIBLIOGRAFIA CAPÍTULO III

1. Bevilacqua, M. (2000). **Monte Carlo Simulation Approach for Modified FMECA in a Power Plant**, Quality and Reliability Engineering International Vol-16 Julio-Agosto, E.U.A, p313-324.
2. Michael L. George (2003). **Lean Six Sigma for Service: How to Use Lean Speed and Six Sigma Quality to Improve Services and Transactions**, E.U.A, McGraw-Hill.
3. Winchell William (1996). **Inspection and Measurement in Manufacturing: Keys to Process Planning and Improvement**, E.U.A, Society of Manufacturing Engineers.
4. Grant E.L. (1999). **Control Estadístico de Calidad** , México, CECSA.
5. Sleeper Andrew (2006). **Design for Six Sigma Statistics**, E.U.A, McGraw-Hill.
6. AIAG (2003). **Measure System Analysis**, México, Sistema de Entrenamiento en Core Tools Daimler-Chrysler, Ford, General Motors y Plexus.
7. Yang Kai (2005). **Design for Six Sigma Service**, E.U.A, McGraw-Hill.
8. Ammerman M. (1998). **The Root Cause Analysis Handbook**, E.U.A, Productivity.
9. Ruiz Botello Gerardo Antonio (2004). **La Mejora Continua en la Calidad de la Infraestructura Analítica y Organizacional en Laboratorios de Investigación y Docencia de la UNAM**, México, Facultad de Química, UNAM, (Tesis de Maestría).

Capítulo IV

Conclusiones

En el Capítulo I se investigaron y seleccionaron temas de calidad que fueron analizados y puestos en práctica a lo largo del capítulo II y capítulo III. Las bondades de los temas de calidad abordados en el capítulo I fueron:

- a) Plasmar temas útiles para poder establecer la escala de ponderación de la severidad, ocurrencia y detección en los servicios para la implementación del AMEF en los mismos.
- b) Exponer temas útiles que son parte de la implementación del AMEF en los procesos o necesidades de los servicios.
- c) Exponer temas útiles vinculados como parte del proceso de análisis de fallas del AMEF en los servicios.

Por otra parte en el Capítulo II se establecieron métodos de carácter general para la ponderación de las tres variables del AMEF como lo son la severidad, ocurrencia y detección. También, en este capítulo, se llevó a la práctica el uso de herramientas como la prueba de hipótesis, la función índice de falla, el DPO, el teorema de Bayes, el diseño de experimentos, el método multicriteria Promethe-Gaia, y el método de simulación estadística Monte Carlo. Todas estas herramientas fueron útiles para ponderar las tres variables del AMEF aplicado a procesos particulares en los servicios, o para establecer un método para redefinir el número de prioridad de riesgo en una organización de servicio (con el método de simulación estadística Monte Carlo).

Las mayores aportaciones del Capítulo II de este trabajo de investigación son:

- a) Proporciona evidencia objetiva del porqué una escala de ponderación de 1 a 4 o 1 a 10 es útil para ponderar la severidad, ocurrencia y detección del AMEF en los servicios.
- b) Toma en consideración el impacto que tendrá una falla dependiente del tiempo o una falla dependiente de alguna otra variable aleatoria, en la ponderación de la ocurrencia en los servicios.
- c) Incluye en la ponderación de la detección otras variables de importancia no tomadas en consideración en la práctica de los sistemas de manufactura, como son: los métodos de identificación de fallas del análisis de causa raíz (el diagrama factor evento-causa, el análisis de control de barreras, el análisis de

árbol de fallas), el efecto de la falla y los tipos de causa (causa de contribución, causa presunta y causa raíz) del análisis de causa raíz. Todo lo anterior incluido en la ponderación de la detección en los servicios.

- d) Expone el uso del método de simulación estadística Monte Carlo para el caso en que se requiera redefinir el número de prioridad de riesgo para contar con sistemas de calidad o programas de mejora más estrictos en los servicios.
- e) Expone el uso de herramientas para facilitar la toma de decisiones y obtener información objetiva y útil de los procesos o fenómenos implicados en la implementación del AMEF en los servicios.

Por otra parte, el Capítulo III muestra el procedimiento sugerido por la metodología seis sigma para la propia aplicación final del AMEF mediante el uso del diagrama de flujo de proceso, el árbol de variables críticas de calidad, la matriz causa-efecto del diagrama de flujo del proceso, el diagrama causa-efecto y la matriz causa-efecto del diagrama causa-efecto, exponiendo de esta manera un método para la realización del AMEF (según seis sigma) en una organización de servicio.

El Capítulo III expone también herramientas para la medición de las acciones de mejora planteadas por el AMEF, como son el estudio de capacidad de proceso y las graficas de control.

La última parte del Capítulo III expone recomendaciones y sugerencias que persiguen establecer lineamientos de carácter general que se deberán tener en consideración al momento de implementar un AMEF en los servicios.

Las aportaciones del Capítulo III son:

- a) Justificar con evidencia de hechos que el AMEF es una herramienta trascendental para ejercer acciones de prevención ligadas a proyectos de mejora o a sistemas de calidad en los servicios.
- b) Demostrar con evidencia de hechos que las escalas de ponderación de la severidad, ocurrencia y detección, planteadas en el Capítulo II, son útiles en la resolución práctica de los problemas reales de los servicios.
- c) Exponer un método de implementación del AMEF planteado sobre la base de las herramientas empleadas en la metodología seis sigma.
- d) Exponer criterios (recomendaciones) para la aplicación del AMEF en los servicios.

Por lo anterior, se concluye que el Marco Teórico que existe como base del AMEF para aplicaciones de Manufactura, se puede también adaptar para su aplicación en Organizaciones de Servicio. Y queda probada la efectividad de su aplicación en una

Organización de Servicio con la resolución de 2 problemas reales expuestos en el Capítulo III.

Se concluye que el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo de investigación planteados en el Capítulo II son satisfechos con el propio desarrollo de los capítulos I, II y III.

En cuanto a la hipótesis del trabajo de investigación, expuesta en el Capítulo II, queda probada con lo expuesto en el Capítulo III.

Por último, habría que destacar que el proceso de autoevaluación interna de una organización es un instrumento con el propósito de auto diagnosticar fortalezas y debilidades organizacionales. Dicho instrumento debe ser el primer paso del proceso de mejora continua. Éste ayudará primeramente a definir las acciones de mejora que se tendrán que implementar en los puntos débiles de una organización.

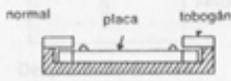
El segundo paso, será identificar las herramientas de calidad existentes que pueden aportar valor a los proyectos de mejora. Dentro de este proceso se deberá dar una gran importancia al AMEF y a las herramientas con las cuales interactúa para la efectiva aplicación de las acciones de mejora.

Apéndices

APENDICE "A"

Ejemplo de Sistema Poka-Yoke de placas en proceso de Soldadura tomada de [34] del Capítulo I

Método de inspección	Función de detección	Función regulativa	Nombre compañía
Inspección en la fuente	* Método de contacto	* Método de control	Hosei Brake Industries, Ltd.
Inspección informativa (propia)	Método valor constante	Método de aviso	Propuesto por Toshihiro Nabeta
Inspección informativa (sucesiva)	Métodos pasos-movimiento		

Tema Prevenir soldadura al revés de placas	
<p>Antes de mejora</p>  <p style="text-align: center;">placa</p> <p>Después de mejoras</p> <p>normal</p>  <p style="text-align: center;">placa tobogán</p> <p>Posición invertida</p>  <p style="text-align: center;">placa</p>  <p style="text-align: center;">tope placa tobogán</p> <p style="text-align: center;">plantilla soldadura normal</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ocasionalmente, ocurrían defectos de soldadura debidos a posicionamientos invertidos de placas en un proceso de soldadura. 2. Aunque la soldadura se hacía después de hacer un chequeo para asegurar que el lado con salientes a soldar estaba en la posición alta cuando la placa se colocaba en la plantilla de soldadura, a veces una placa inadvertidamente se colocaba invertida y entonces se soldaba. <ol style="list-style-type: none"> 1. Cuando una placa se va a posicionar en la plantilla, un tobogán impide que el producto acabado prosiga si la placa está colocada en posición inversa. 2. Una placa con la posición invertida tropieza con un bloque colocado en lo alto del tobogán y no puede posicionarse en la plantilla. <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p style="font-size: small;">normal</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p style="font-size: small;">posición invertida</p> </div> </div>
Efectos Se han eliminado soldaduras de placas en posición invertida.	Coste 500 yenes (2,50 \$)

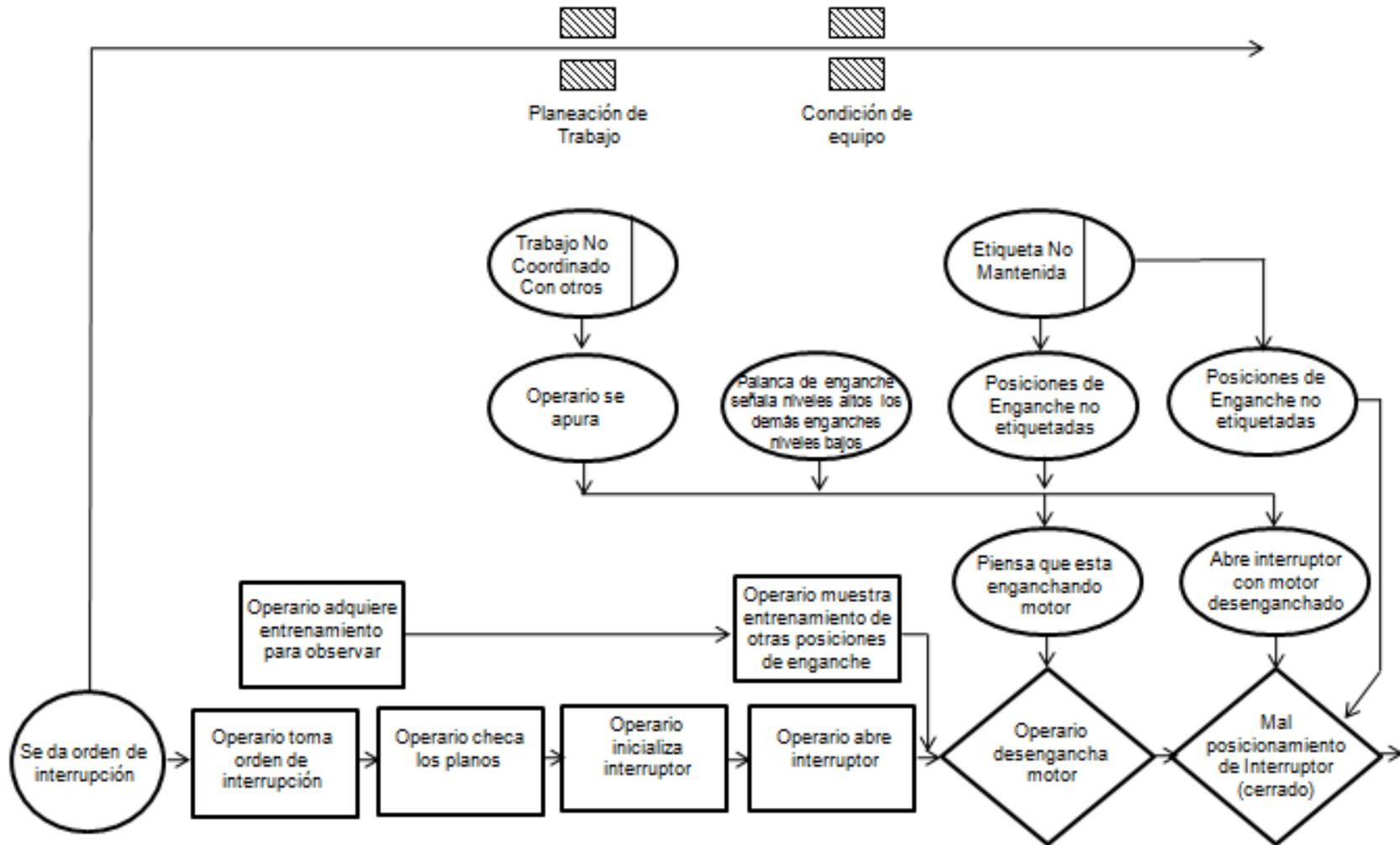
APENDICE “B”

Análisis de Barreras de Control para un ejemplo de mal posicionamiento de interruptor
tomada de [35] del Capítulo I

CONSECUENCIAS	BARRERAS QUE DEBEN IMPOSIBILITAR EL EVENTO	GRAVAMEN DE BARRERAS (PORQUE LAS BARRERAS FALLAN)
Interruptor Cerrado	Orden de proceso de interrupción	¿Se piensa que el interruptor está abierto?
	Verificación	¿Cómo se verifica el entrenamiento? ¿Cómo se etiqueta?
Interruptor de motor enganchado	Conocimiento del operario	¿Opera el interruptor antes?
	Formato de orden de interrupción	¿Se sigue el formato? ¿Existe algún inconveniente?
	Etiquetas	¿Cómo etiqueta?
Control de Entrenamiento	Políticas/Entrenamiento	¿Cuál es la política o el entrenamiento?
(LISTAR UNA A LA VEZ) NO NECESITA SER EN ORDEN SECUENCIAL	(IDENTIFICAR TODAS LAS BARRERAS FISICAS Y ADMINISTRATIVAS APLICABLES PARA CADA CONSECUENCIA)	(IDENTIFICAR SI LA BARRERA NO FUE CONSIDERADA, O FUE DEBIL O INEFECTIVA Y PORQUE)

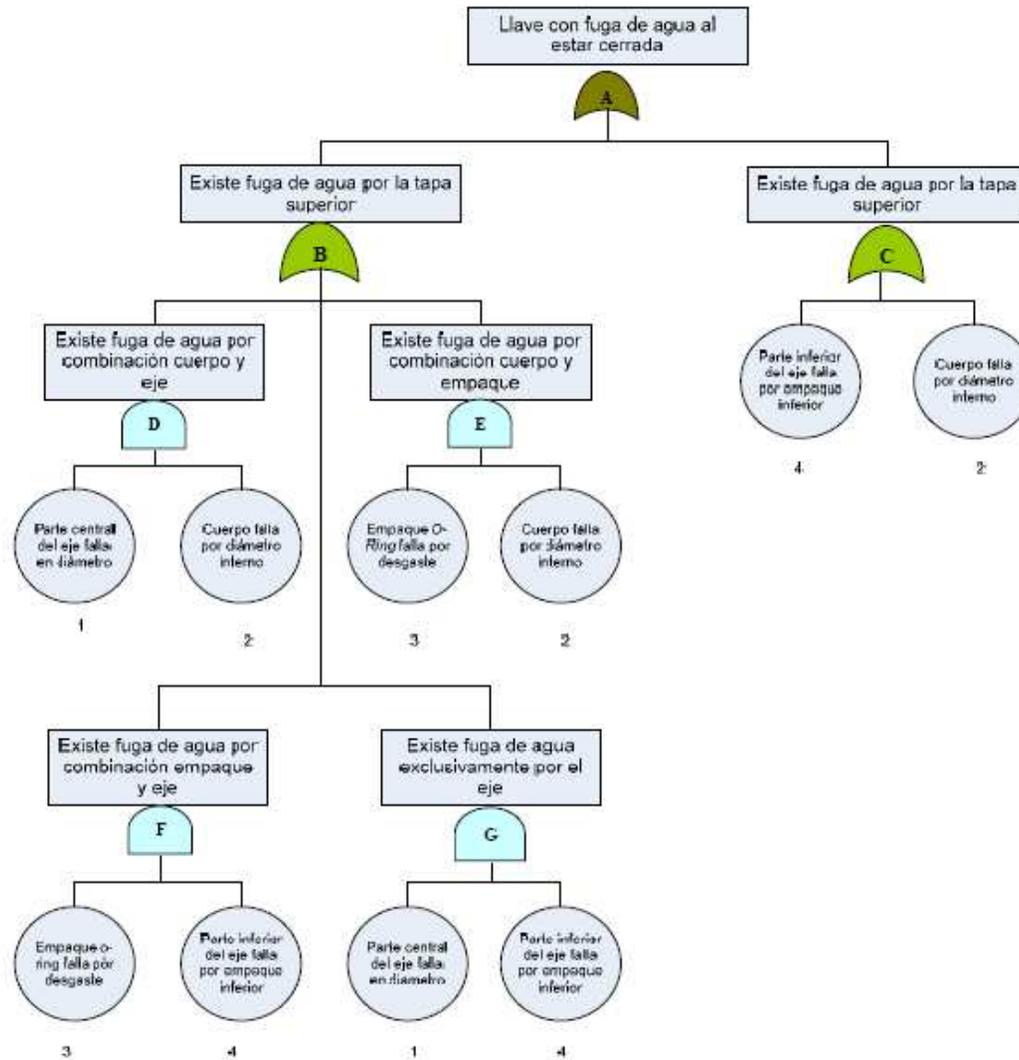
APENDICE “C”

Diagrama Factor Evento-Causa para un ejemplo de mal posicionamiento de interruptor tomada de [35] del Capítulo I



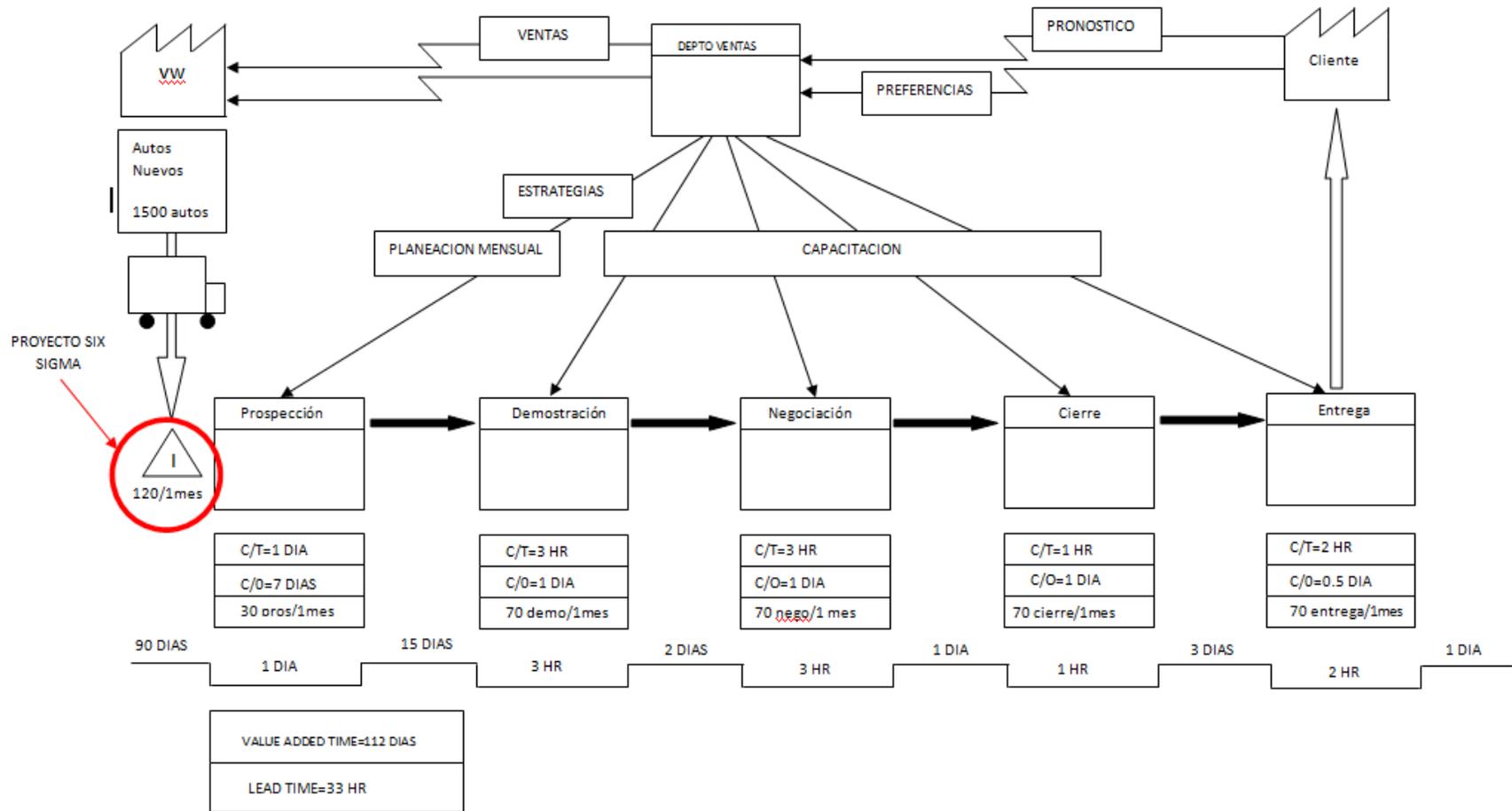
APENDICE “D”

Ejemplo de Árbol de Fallas para fuga de agua de una llave de agua tomada de [35] del Capítulo I



APENDICE "E"

Ejemplo de Croquis de Proceso (Mapa de Valor Agregado) del proceso de Ventas de Autos Nuevos (Elaboración Propia)



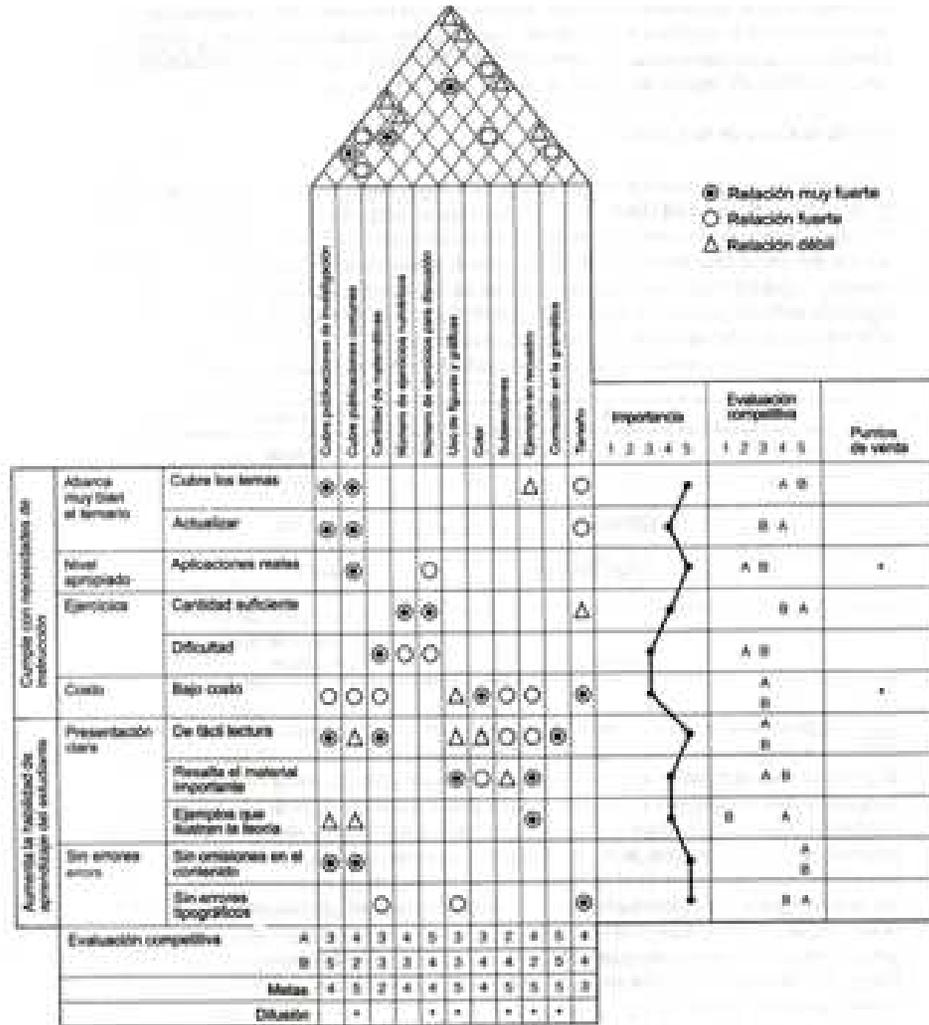
APENDICE “F”

Ejemplo de un formato de Plan de Control
tomada de [38] del Capítulo I

PLAN DE CONTROL									
Proceso: _____									
Nombre de Proceso: _____									
Aprobó: _____									
Flujo de Proceso			Parámetros de Control			Métodos			
Numero de Operación	Nombre de Proceso	Equipo o Herramientas de Identificación	Característica de Control	Especificación	Medición o Identificación	Revisión de Medición	Método de Monitoreo de Datos	Frecuencia de Colección de Datos	Plan de Muestreo
Elaboro: _____					Fecha: _____		Pagina _____ de _____		

APENDICE "G"

Ejemplo de una Casa de la Calidad (QFD) para el diseño de libros de texto tomada de [1] del Capítulo II



APENDICE “H”

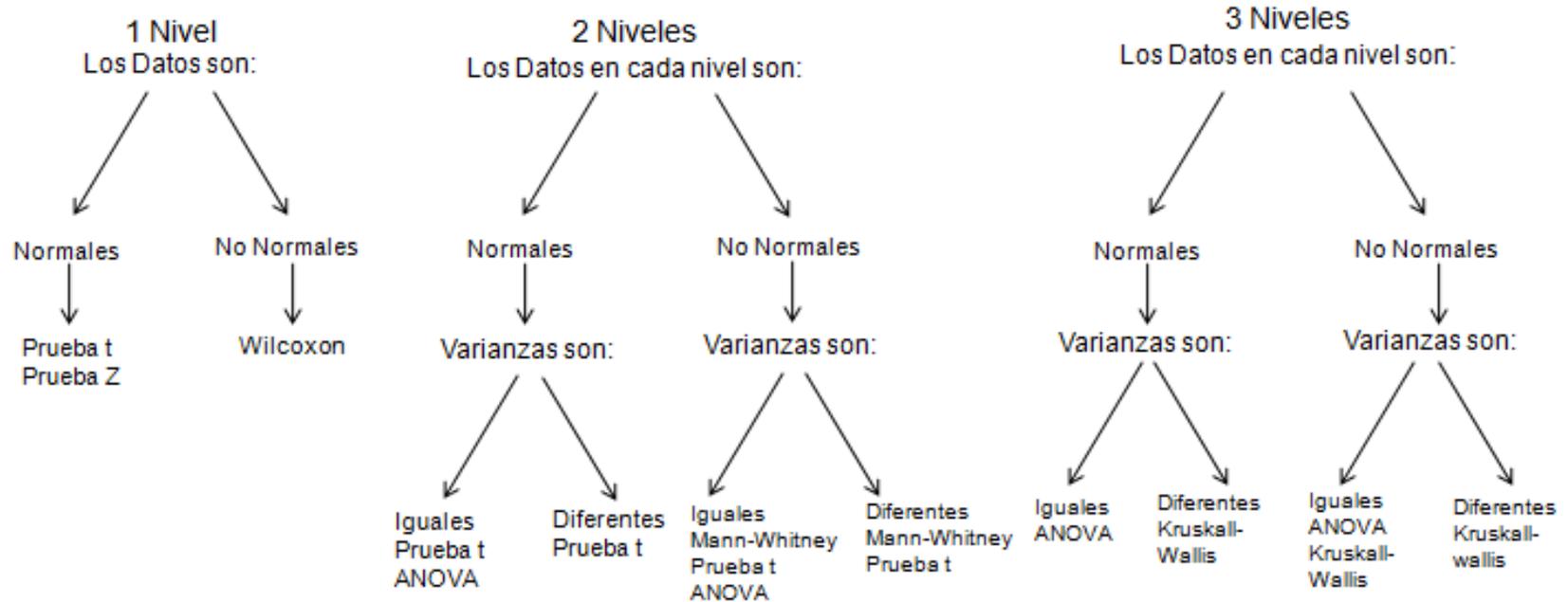
Estadístico de prueba o herramienta estadística a utilizar para el tipo de dato (discreto o continuo) de la variable de entrada (x) y de la variable de salida ($y=f(x)$)
tomada de [42] del Capítulo I

		Variable de Entrada (x)	
		Dato Continuo	Dato Discreto
Variable de Salida $y = f(x)$	Dato Continuo	Regresión Lineal Regresión Múltiple	ANOVA Prueba t Prueba Z Prueba de Wilcoxon Prueba de Mann-Whitney Prueba de Kruskal-Wallis
	Dato Discreto	Regresión Logística Binaria Regresión Logística Ordinal Regresión Logística Nominal	Prueba Xi cuadrada Prueba de proporciones

APENDICE "I"

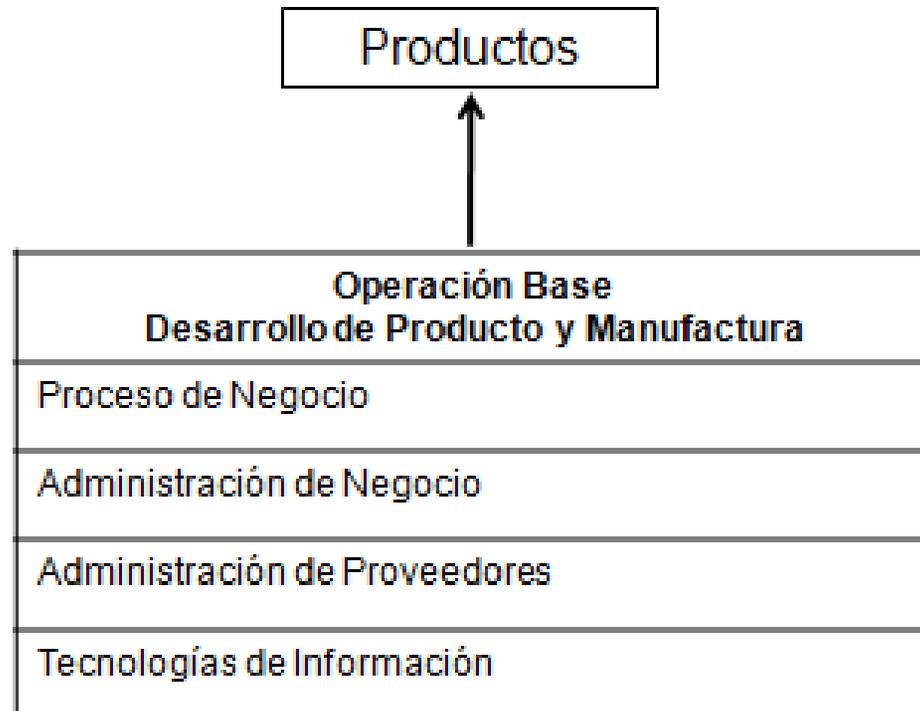
Análisis de prueba de hipótesis en el caso en que "x" (variable de entrada) sea discreto y "y" (variable de salida) sea continuo tomada de [42] del Capítulo I

Niveles de la X



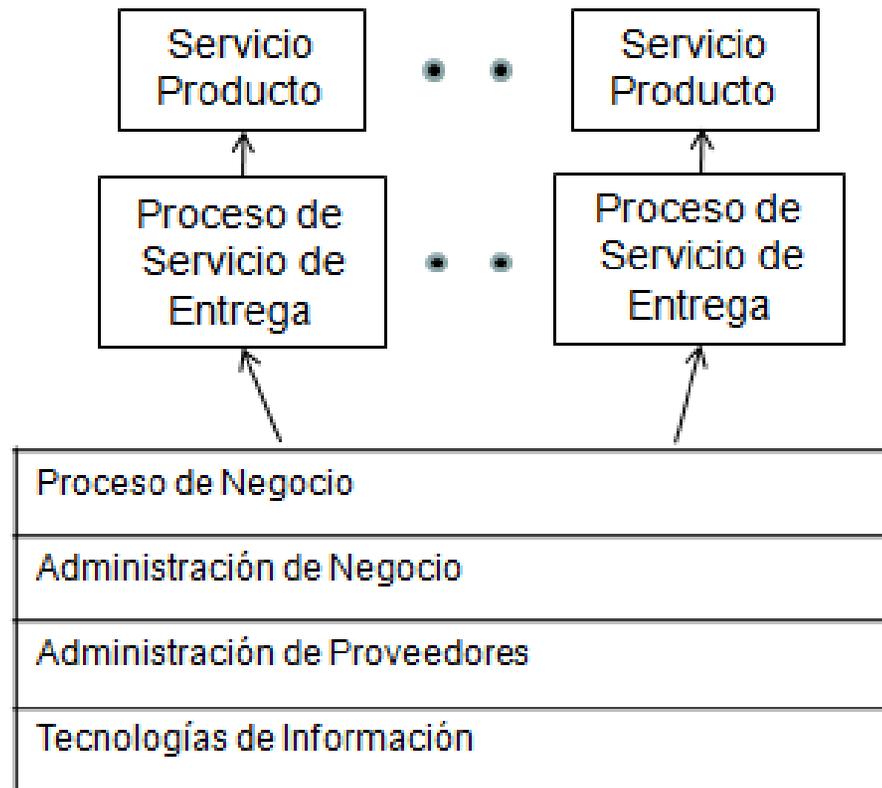
APENDICE "J"

Modelo de Operación de Negocio para compañías orientadas a la manufactura
tomada de [13] del Capítulo II



APENDICE “K”

Modelo de Operación de Negocio para muchas compañías de servicio
tomada de [13] del Capítulo II



APENDICE “L”

Algunos tipos de Servicios con sus respectivas características tomada de [13] del Capítulo II

Tipo de Servicio	Características	Ejemplos	Servicio-Producto	Proceso de Servicio de Entrega	Interacción Cliente-Proveedor
Procesos de Oficina (proceso transaccional)	Secuencia de papeles de trabajo, entrada de datos, y decisiones	Seguros, Hipotecas y Prestamos	Documento Final	Proceso de Papeles de trabajo	Generalmente sucede al principio y al final de la transacción
Servicio Fabrica	Área de atención, Área de elaboración, Requiere equipo sofisticado	Comida Rápida, Centros de Copiado	Comida, Copias	El área de elaboración es similar a una fabrica	Importante, generalmente sucede en todo el proceso
Servicio Puro	Área de atención, Área de elaboración, Gran servicio al cliente	Hospitales, Centros de Reparación, Juzgados	Diagnostico y tratamiento, reparación, reglas	Múltiples pasos: el proceso de servicio varía de cliente a cliente	Importante, generalmente sucede en todo el proceso
Tiendas de Auto Servicio	Amplia facilidad, Amplia gama de bienes, Auto servicio del cliente	Súper mercados	Selección de bienes, agradable disposición de artículos y etiquetado	Compras y embarques, administración de inventarios	Generalmente sucede al momento de pagar y cuando se requiere ayuda
Servicio Profesional	Generalmente pequeño número de expertos, alto costo sobre la labor	Consultoría	Salida de conocimiento	Cada servicio es a un proyecto	Importante sucede en todo el proceso
Servicio Telefónico	Interacciones de Teléfono	Atención Telefónica, Atención por correo electrónico Soporte Técnico	Consejos, Reservaciones, Ordenes	Sistema para rutear llamadas	Muy importante
Tiendas de Proyectos	Un gran proyecto a la vez	Software, Desarrollo, Proyectos R&D	Software, R&D, descubrimientos, patentes	Proyecto, Posible larga duración	Generalmente ocurre al principio y al final
Logística y Distribución	Embarque de bienes de un lugar a otro	Transportes de bienes en general	Entregar bienes correctamente a los destinatarios sin daño	Rutear, Calendarizar, Seleccionar, Transporte	Importante, generalmente sucede en todo el proceso
Transportación	Embarque de personas de un lugar a otro	Transportes de personas en general	Mover gente al lugar correcto a tiempo y con cuidados durante el viaje	Rutear, Calendarizar, Transporte	Importante, generalmente sucede en todo el proceso
Compra Venta	Comprar inventarios	Comprar bienes y proveerlos a las organizaciones	Comprar y entregar partes y bienes a tiempo, a buen precio y entregarlos correctamente y en buen estado	Evaluación e identificación de ventas, contratar, ordenar, comprar y pagar	Importante generalmente sucede en todo el proceso

APENDICE “M”

Como la Calidad de Servicio afecta el Valor del Cliente y el Costo Total
tomada de [13] del Capítulo II

	VALOR DEL CLIENTE						Costo Total
	BENEFICIOS			RESPONSABILIDADES			
	Conveniencia	Psicológicos	Funcionales	Conveniencia	Psicológicas	Precio	
Servicio-Producto	Importante: tener una buena locación de servicio y un plan de servicio hace la diferencia	Muy importante: un buen diseño de servicio-producto coordinado con el desarrollo de la marca creara un buen impacto psicológico en los clientes. La calidad y la confiabilidad hacen a los clientes sentirse seguros	Muy importante: el diseño y ofrecimiento de un correcto servicio-producto es la mayor clave de importancia para proveer beneficios funcionales a los clientes	Importante: la misma razón de la conveniencia de los beneficios	Muy importante: la misma razón de los beneficios psicológicos	Muy importante: lo que se realice en el diseño del servicio-producto afectara absolutamente el costo y el precio	Muy importante: Lo que se realice para el servicio-producto afectara el costo
Proceso de Servicio de Entrega	Muy importante: Un buen y eficiente servicio de entrega salva muchos problemas del cliente	Importante: un servicio de entrega eficiente y a tiempo hace que los clientes se sientan satisfechos y felices	Importante: el servicio de entrega tiene que entregar el servicio-producto confiablemente y consistentemente	Muy importante: la misma razón de la conveniencia de los beneficios	Importante: la misma razón de los beneficios psicológicos	Muy importante: un proceso eficiente bajara el costo	Muy importante: un proceso eficiente bajara el costo
Interacción Cliente-Proveedor	Relacionado: una mejor comunicación entre cliente-proveedor ayudara a los clientes	Muy importante: la interacción persona a persona afectara lo que el cliente piensa	Relacionado: la adecuada interacción hará que los clientes se sientan bien acerca de los servicios y la comunicación ayudara en los proceso de entrega que satisfacen las necesidades del cliente	Relacionado: la misma razón de la conveniencia de beneficios	Muy importante: la misma razón de los beneficios psicológicos	Relacionado: aplica en proceso de negociación	Relacionado: aplica en proceso de negociación

APENDICE "N"

Relación entre Diseño del Servicio y Servicio de Entrega tomada de [13] del Capítulo II

