

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN METODOLOGÍAS DE
ANÁLISIS DE FALLAS

DAVIAN AUGUSTO MONCADA DELGADO
EDDER RODRÍGUEZ ARENAS
JELDER QUIÑONES VELÁSQUEZ
JUAN ALEXANDER SARMIENTO GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2009

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN METODOLOGÍAS DE
ANÁLISIS DE FALLAS

DAVIAN AUGUSTO MONCADA DELGADO
EDDER RODRÍGUEZ ARENAS
JELDER QUIÑONES VELÁSQUEZ
JUAN ALEXANDER SARMIENTO GONZÁLEZ

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Director
Ing. CARLOS RAMÓN GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2009

AGRADECIMIENTOS

En esta instancia es preciso expresar nuestro sentido de gratitud a la Universidad Industrial de Santander por ser líder en la formación íntegra de profesionales. A la escuela de Ingeniería mecánica y su planta docente por ofrecer las herramientas necesarias para nuestra formación.

A Carlos Ramón González Bohórquez, ingeniero mecánico, director del proyecto por su dedicación, asesoría y orientación en el desarrollo y culminación exitosa de este proyecto de grado.

**La culminación de esta meta tan importante en mi vida es dedicada con todo mi amor
y gratitud:**

**A mi madre *María Nelly Delgado* por todo su amor e inquebrantable fe en la
superación de sus hijos.**

**A mi padre *Agustín Moncada* por todo su amor, esfuerzo, dedicación y paciencia
para sacar sus hijos adelante.**

**A mis hermanas *Solangel, Ingrid Carolina y Veris Natalia* por su cariño y
apoyo en todos los momentos de mi vida.**

A mi novia *Adriana Milena Ayala Cadena* por su amor y apoyo.

A mi mamá *Angeal María Pr* su apoyo en los inicios de mi carrera.

A mis abuelos, tios y primos por su amistad y cariño.

Davian Augusto Moncada Delgado.

A mis padres por su entereza, paciencia y esfuerzo por brindarme las herramientas y acompañamiento necesario para lograr culminar con éxito mi proyecto de vida.

A mis hermanos y novia, en especial a mi hermana Mylady y esposo Orlando por el apoyo incondicional brindado.

Dedico la consecución de este triunfo
En uno de los capítulos más importantes de mi vida
A mi madre Gladys María Velásquez,
Quien constituye el mejor ejemplo de vida.
A mis Hermanos: Rosalba Velásquez,
Charles Edwin, Osiris Milena
Gener, Rocio, Gladys y
Tania Paola;
Soporte, amigos y compañeros de batalla.

Jelder Quiñones Velásquez

Dedico este logro a mis padres Daniel y Lilian:

Por estar siempre a mi lado

Por tener siempre lo necesario para mí y mis hermanos

Por su cariño, amor y comprensión

A mis hermanos, que siempre estuvieron presentes incondicionalmente Diana,
Luis y Monica

A mis amigos y compañeros que contribuyeron
en mi formación como persona y como profesional.

Juan Sarmiento

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	3
1.1. QUÉ ES EL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	3
1.2. OBJETIVO DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	4
1.3. VENTAJAS DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	5
1.4. CARACTERÍSTICAS	6
1.5. ORGANIZACIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	7
1.6. TEMA DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN	8
1.7. DIRECCIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN METODOLOGÍAS PARA ANÁLISIS DE FALLAS	9
1.8. METODOLOGÍA	10
2. PLANEACIÓN	11
2.1. ESTUDIO Y SELECCIÓN DEL MATERIAL BIBLIOGRÁFICO	11
2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SUBTEMAS	18
2.2.1. Conocimientos previos a un estudio de análisis de fallas.	18
2.2.2. Métodos cualitativos para el análisis de fallas	19
2.2.3. Métodos cuantitativos para el análisis de fallas	19
2.3. PLANEACIÓN DE LAS SESIONES	20
3. EJECUCIÓN	22
3.1 DOCUMENTACIÓN PARA LOS SUBTEMAS	22
3.2 DESARROLLO DE UNA SESIÓN	22
3.3 ACTA	25
4. PRESENTACIONES Y DOCUMENTO	27
4.1. PRESENTACIONES	27

4.1.1. Características	27
4.2. DOCUMENTO	31
CONCLUSIONES	34
BIBLIOGRAFÍA	36
ANEXOS.....	38
A. ANÁLISIS SOBRE DIVERSOS MÉTODOS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO	40
A.1 LA OBTENCIÓN DE DATOS.....	44
A.2 ANÁLISIS CUALITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO	46
A.2.1 Naturaleza de los procedimientos del análisis cualitativo	47
A.2.2. Validez de los métodos cualitativos	48
A.2.3 ¿Cuándo se emplean los métodos de análisis cualitativos?.....	49
A.3 OBJETIVOS DEL ANÁLISIS CUALITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO.....	51
A.3.1 Identificar riesgos	51
A.3.2 Identificar equipos críticos	51
A.3.3 Identificar relaciones causas-efecto	52
A.4 DEL ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO.....	53
A.5 ANÁLISIS CUANTITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO	53
A.6 EL ANÁLISIS CUANTITATIVO EXPLORATORIO.....	55
A.7 EL ANÁLISIS CUANTITATIVO CONFIRMATORIO	56
A.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANÁLISIS CUANTITATIVOS	57
A.9 OBJETIVO DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO.....	57
A.9.1 Expresar en términos probabilísticos índices de riesgo.....	58
A.9.2 Expresar en términos probabilísticos Índices de criticidad de equipos y/o sistemas.....	58
A.9.3 Probabilidad de ocurrencia de un modo de falla.....	59
A.9.4 La tendencia de un parámetro en la operación de equipos.....	59
A.10 MÉTODOS CUANTITATIVOS USADOS EN EL MANTENIMIENTO	59

A.11 ANÁLISIS CUANTITATIVO EN EL MANTENIMIENTO.....	60
B. RIESGO EN OPERACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS.....	62
B.1. DEFINICIONES DE RIESGO	63
B.2. PRINCIPALES CONCEPTOS EN UN ESTUDIO DE RIESGO	65
B.3. CLASES DE RIESGOS	67
B.4. IDENTIFICACIÓN DE FACTORES DE RIESGO	71
B.5. PARA QUE ES ÚTIL UN ESTUDIO DE RIESGO.....	75
C. METODOLOGÍAS PARA ANÁLISIS DE CRITICIDAD	76
C.1 MODELO PARA EL ANÁLISIS DE CRITICIDAD	77
C.2 BENEFICIOS DE APLICAR UN ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	81
C.3. INFORMACIÓN REQUERIDA.....	84
C.3.1. Análisis de la probabilidad de falla (Pdf)	84
C.3.2 Modelado de la tasa de fallo.....	88
C.3.3 Escala de calificación de la probabilidad de fallas.....	97
C.3.4 Análisis de las consecuencias.....	99
C.4 MODELOS PARA CÁLCULO DE CRITICIDAD	110
C.4.1 Método de Factores Ponderados Basados en el Concepto del Riesgo	111
C.4.2 Método según estudio de DATANBANK MKS Ltda.....	115
C.4.3 Método elaborado por Monchy Francois	118
D. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTOS Y SUCRITICIDAD FMECA	121
D.1 ANTECEDENTES	121
D.2 OBJETIVOS AL APLICAR FMECA	122
D.3 ¿CUÁNDO APLICAR FMECA?.....	123
D.4 TIPOS DE FMECA	124
D.5 NORMAS PARA FMECA	124
D.6 REQUISITOS PREVIOS FMECA.....	126
D.6.1 Conformar grupo de trabajo	126
D.6.2 Recolección de información del equipo	126
D.6.3 Recolección de información anterior	127
D.6.4 Formato FMECA	127

D.7 PASOS PRINCIPALES PARA APLICAR FMECA	129
D.7.1 Determinar y definir el sistema a analizar.....	130
D.7.2 Identificar y definir las funciones del sistema	133
D.7.3 Identificar y definir las fallas funcionales	136
D.7.4 Identificar los modos y/o mecanismos de falla	137
D.7.5 Identificar los efectos de las fallas.....	141
D.7.6 Determinación de las consecuencias de falla.....	142
D.8 CONSOLIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	143
D.9 ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE MODOS DE FALLA	145
D.9.1 Número de prioridad de RIESGO (RPN)	146
D.9.2 Severidad (S)	146
D.9.3 Frecuencia de ocurrencia (O).....	147
D.9.4 Detectabilidad (D).....	148
D.10 RECOMENDACIÓN DE ACCIONES DE MANTENIMIENTO.....	149
E. ANÁLISIS CAUSA RAÍZ - RCA.....	150
E.1 GENERALIDADES DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ “RCA”	150
E.2 BENEFICIOS DEL RCA	152
E.3 TIPOS DE CAUSA RAÍZ	153
E.4 CUANDO SE APLICA EL RCA.....	156
E.5 METODOLOGÍA DEL RCA	157
E.5.1 Fase 1: análisis del problema	160
E.5.2 Fase 2: consideración de todas las causas posibles de la falla.....	164
E.5.3 Fase 3: análisis y validación de evidencias para identificar la causa raíz .	166
E.5.4 Fase 4: consideración de todas las posibles soluciones a la causa raíz ...	171
E.5.5 Fase 5. selección de la mejor solución	173
E.5.6 Fase 6: implementación de la solución y seguimiento.....	175
E.6 EJEMPLO DEL RCA: FALLA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL DE PRESIÓN PV-5	176
F. ANÁLISIS P-M	186
F.1 PROCESO PARA EL ANÁLISIS P-M.....	188

F.2 PRIMERA ETAPA: CLARIFICAR EL FENÓMENO.	189
F.3 SEGUNDA ETAPA: REALIZAR UN ANÁLISIS FÍSICO.....	195
F.3.1 Identificar principios operacionales.....	196
F.3.2 Identificar estándares operacionales	196
F.3.3 Identificar elementos que interactúan	196
F.3.4 Cuantificar cambios físicos	197
F.4 TERCERA ETAPA: DEFINIR LAS CONDICIONES QUE CONSTITUYEN EL FENÓMENO	198
F.5 CUARTA ETAPA: DETERMINAR LAS CAUSAS QUE AFECTAN CADA CONDICIÓN CONSTITUYENTE HALLANDO LAS CORRELACIONES RESPECTO A LAS 4M DE PRODUCCIÓN.	204
F.6 QUINTA ETAPA: ESTABLECER CONDICIONES ÓPTIMAS.....	207
F.7 SEXTA ETAPA: ESTABLECER EL MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	209
F.7.1 Selección de metodos apropiados.....	209
F.8 SÉPTIMA ETAPA: DETERMINAR ANORMALIDADES A TRATAR	212
F.9 OCTAVA ETAPA: FORMULAR E IMPLANTAR ACCIONES DE MEJORA..	212
G. METODOLOGÍA ¿POR QUÉ? ¿POR QUÉ?	221
G.1 ANTECEDENTES DE LA METODOLOGÍA	223
G.2 REQUISITOS Y CONSIDERACIONES SOBRE EL ANÁLISIS ¿POR QUÉ? – ¿POR QUÉ?	223
G.3 CUANDO UTILIZAR EL ANÁLISIS ¿POR QUÉ? ¿POR QUÉ?	225
G.4 MODELO A SEGUIR	225
G.4.1 Definir el problema	227
G.4.2 Establecer la relación causa–efecto a través de las preguntas ¿Por qué? ¿Por qué? y validar cada respuesta.	229
G.4.3 Generar estrategias de mantenimiento	230
G.5 Aplicación de la metodología.	232
H. ANÁLISIS CAUSA-EFECTO	239
H.1 PRINCIPIO DE CAUSALIDAD	239
H.2 RESEÑA HISTÓRICA	240
H.3 PARTES CONSTITUTIVAS	241

H.3.1 Efecto	241
H.3.2 Factores Causales	242
H.4 CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA CAUSA-EFECTO	243
H.4.1 Definir el problema	244
H.4.2 Realizar sesión de “tormenta de ideas”	244
H.4.3 Clasificar las causas en categorías	245
H.4.4 Elaborar el diagrama Causa-Efecto	245
H.4.5 Determinación del nivel de compresión del diagrama	246
H.4.6 Determinación del grado de importancia de cada causa.....	247
H.4.7 Desarrollo del plan de acción	248
H.5 ANÁLISIS DEL DIAGRAMA CAUSA-EFECTO	248
H.6 BENEFICIOS.....	249
I. ORDINOGRAMA	250
I.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES:.....	250
I.2 CUÁNDO SE UTILIZA	250
I.3 SÍMBOLOS BÁSICOS DE LOS ORDINOGRAMAS	251
I.4 RECOMENDACIONES PARA EL USO Y APLICACIÓN DE LOS SÍMBOLO..	255
I.5 NORMAS BÁSICAS PARA LA CREACIÓN DE UN ORDINOGRAMA	256
I.6 PARTES BÁSICAS DE UN ORDINOGRAMA:.....	256
I.7 PROCESO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ORDINOGRAMAS	257
I.8 UTILIDAD DE LA HERRAMIENTA	275
J. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EL	
ANÁLISIS DE FALLAS	276
J.1 DIVISIÓN DE LA ESTADÍSTICA SEGÚN EL TIPO DE INVESTIGACIÓN ...	276
J.1.1 La estadística descriptiva.....	277
J.1.2 La estadística matemática o inferencial	277
J.2 DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS	277
J.2.1 Distribución de frecuencia simple.....	278
J.2.2 Distribución de frecuencias por intervalos.....	284
J.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA.....	292

J.3.1 Representación gráfica de variables	292
J.4 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL	295
J.4.1 Media aritmética.....	295
J.4.2 Media aritmética ponderada.....	295
J.4.3 Mediana	296
J.4.4 Moda	297
J.5 MEDIDAS DE DISPERSIÓN.....	299
J.5.1 Rango o recorrido	300
J.5.2 Desviación media.....	300
J.5.3 Varianza desviación típica.....	302
J.5.4 Desviación típica	303
K. PLANILLA DE INSPECCIÓN	305
K.1 PROCEDIMIENTO	305
K.2 DEFINIR EL PROBLEMA.....	306
K.3 CONSTRUCCIÓN DE LA PLANILLA	307
K.4 OBTENCIÓN Y ANOTACIÓN DE DATOS	307
K.5 OBSERVACIONES	308
L. ANÁLISIS DE PARETO	314
L.1 DIAGRAMA DE PARETO	315
L.2 ANÁLISIS ABC	316
L.3 ANTECEDENTES.....	317
L.4 OBJETIVOS DEL ANÁLISIS DE PARETO	318
L.5 CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE PARETO	319
L.5.1 Paso 1: Identificar y definir el sistema.....	320
L.5.2 Paso 2: Preparación de los datos	321
L.5.3 Paso 3: Calcular las contribuciones totales y parciales, y ordenar	323
L.5.4 Paso 4: Calcular porcentajes y porcentajes acumulados para cada elemento.....	323
L.5.5 Paso 5: Trazar y rotular los ejes	325
L.5.6 Paso 6: Dibujar un gráfico de barras.....	325

L.5.7 Paso 7: Trazar un gráfico lineal	327
L.5.8 Paso 8: Señalar los elementos “pocos vitales” y los “muchos triviales”	327
L.5.9 Paso 9: Rotular el diagrama de Pareto	328
L.6 ALGUNOS TIPS IMPORTANTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA	329
M. HISTOGRAMA	331
M.1 CONCEPTOS IMPORTANTES	332
M.2 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN HISTOGRAMA	333
M.2.1 Preparar datos	334
M.2.2 Determinar el rango	335
M.2.3 Determinar el número de clases	335
M.2.4 Construir los intervalos de clase	337
M.2.5 Calcular la frecuencia de clase	337
M.2.6 Graficar el histograma.....	338
M.3 INTERPRETACIÓN	338
M.3.1 Pautas características de variación	339
N. DIAGRAMA DE DISPERSIÓN	346
N.1 CARACTERÍSTICAS DE UN DIAGRAMA DE DISPERSIÓN.....	346
N.2 FACTORES QUE PUEDEN AFECTAR UN DIAGRAMA DE DISPERSIÓN.....	349
N.3 TÉCNICAS DE REGRESIÓN.....	351
N.3.1 Modelo de regresión lineal	353
N.3.2 Obtención de la ecuación de regresión muestral.	354
N.3.3 Error estándar	355
N.4 MODELO DE CORRELACIÓN.....	359
N.5 PASOS PARA DESARROLLAR UN DIAGRAMA DE DISPERSIÓN	362
O. GRÁFICOS DE CONTROL	371
O.1 CONCEPTOS PREVIOS.....	371
O.1.1 Distribución normal	371
O.1.2 Teorema del límite central.....	372
O.1.3 Descripción numérica.....	373

O.2 INFERENCIA ESTADÍSTICA.....	373
O.2.1 Estimación de parámetros.....	374
O.2.2 Estimación por intervalo.....	374
O.2.3 Comprobación de hipótesis.....	376
O.2.4 Tipos de errores.....	377
O.3 CONSTRUCCIÓN DEL GRÁFICO DE CONTROL.....	378
O.4 PRINCIPIOS DE LOS GRÁFICOS DE CONTROL.....	379
O.4.1 Causas de la variación.....	379
O.4.2 Aspectos estadísticos de la elaboración de gráficas de control.....	379
O.4.3 Elección de los límites de control.....	381
O.4.4 Tamaño de la muestra y frecuencia de muestreo.....	381
O.4.5 Detección de patrones de la gráfica de control.....	382
O.4.6 Tipos de gráficas de control.....	383
O.5 EJEMPLO.....	384

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1: Subtemas de Investigación	17
Tabla 2: Asignación de roles por subtemas	21
Tabla 3. Descripción de Roles	23
Tabla 4. Dato en análisis de falla	40
Tabla 5. Diferencias entre metodología cualitativa y cuantitativa.....	43
Tabla 6. Recursos fundamentales y factores de riesgo	66
Tabla 7. Principales riesgos inherentes al tipo de empresa	69
Tabla 8. Clasificación de factores de riesgo operacional	71
Tabla 9. Valores medios clasificados de fallos en función del tamaño de la muestra (columnas) y del número medio de fallos acumulados (filas)	93
Tabla 10. Diferentes tablas de clasificación y ponderación de la probabilidad de falla	98
Tabla 11. Diferentes tablas de clasificación y ponderación de la probabilidad de falla	98
Tabla 12. Diferentes tablas de clasificación y ponderación de la probabilidad de falla	99
Tabla 13. Obtención de los datos para un análisis de las consecuencias de un fallo	102
Tabla 14 Clasificación de accidentes industriales.....	103
Tabla 15. Aspectos para un análisis de una fuga	106
Tabla 16. Clasificación por clases según la distancia y el nivel de mortalidad.....	107
Tabla 17. Consecuencias según la seguridad	107
Tabla 18. Otros fenómenos para análisis de las consecuencias	108
Tabla 19. Consecuencias para la Salud	108
Tabla 20. Aspectos a tener en cuenta para evaluar las consecuencias medio ambientales	109
Tabla 21. Consecuencias según el daño al medio ambiente	109

Tabla 22. Consecuencias según las pérdidas económicas	110
Tabla 23. Frecuencia de fallas	113
Tabla 24. Impacto operacional.....	113
Tabla 25. Flexibilidad operacional.....	114
Tabla 26. Costos de Mantenimiento	114
Tabla 27. Impacto en Seguridad, Ambiente e Higiene.....	114
Tabla 28. Importancia del equipo dentro del sistema.....	116
Tabla 29. Confiabilidad inherente del equipo	116
Tabla 30. Impacto del equipo en el sistema.....	116
Tabla 31. Formato para la evaluación del rating de cada criterio.....	117
Tabla 32. Complejidad tecnológica CT	119
Tabla 33. Importancia del equipo en el proceso IM	119
Tabla 34. Funcionamiento FM	119
Tabla 35. Costo de mantenimiento CM.....	119
Tabla 36. Valor de reemplazo por uno idéntico RE.....	120
Tabla 37. Costos indirectos CI	120
Tabla 38. Coeficiente de ponderación CP.....	120
Tabla 39. Severidad del efecto FMECA	147
Tabla 40. Valor de la frecuencia de falla	148
Tabla 41. Valor de la probabilidad de detección de un modo de falla.....	149
Tabla 42. Errores Humanos	155
Tabla 43. Pasos para la caracterización del problema	161
Tabla 44. Formato para la caracterización del problema	163
Tabla 45. Proceso de Validación.	169
Tabla 46. Verificación de las Causas.....	171
Tabla 47. Pregunta-relación.....	191
Tabla 48. Relación de las 4m con las condiciones constituyentes.....	199
Tabla 49. Factores causales	206
Tabla 50. Estándares y criterios.....	208
Tabla 51. Herramientas de medida.....	210

Tabla 52. Valores constituyentes-valores estándares.....	211
Tabla 53. Anormalidades y mejoras.....	214
Tabla 54. Medida de la efectividad total del equipo	220
Tabla 55. Preguntas claves para definir el problema	228
Tabla 56. Datos técnicos del taponador rotativo	235
Tabla 57. Resultados de la aplicación de la metodología	236
Tabla 58. Formato para la metodología ¿Por qué? ¿Por qué?.....	237
Tabla 59. Determinación del grado de importancia de las causas	238
Tabla 60. Algunos Símbolos Utilizados Norma ANSI Y32.10	252
Tabla 61. Elementos causantes de falla de 50 máquinas de la fábrica SIAF.....	279
Tabla 62. Elementos causantes de falla de 50 máquinas.....	280
Tabla 63. Elementos causantes de falla ordenados	280
Tabla 64. Distribución de frecuencias de los elementos causantes de falla	281
Tabla 65. Distribución teórica de frecuencias de n observaciones	282
Tabla 66. Distribuciones de frecuencia por elemento	283
Tabla 67. Tiempo en minutos de no disponibilidad de 100 máquinas de la fábrica SIAF.....	285
Tabla 68. Reglas empíricas para la construcción de intervalos	286
Tabla 69. Distribución de datos según intervalos.....	288
Tabla 70. Conteo de datos según intervalos.....	289
Tabla 71. Tiempo total y porcentaje de no disponibilidad de cada intervalo	289
Tabla 72. Construcción de los intervalos para el tiempo de no disponibilidad de las 100 máquinas.....	290
Tabla 73. Distribución de frecuencias por intervalos del tiempo de no disponibilidad de 100 máquinas de la fábrica SIAF.	291
Tabla 74. Construcción de los intervalos para el tiempo de no disponibilidad de las 100 máquinas (del ejemplo 2.).....	299
Tabla 75. Tiempo de no disponibilidad para el cálculo de la desviación media ...	301
Tabla 76. Cálculo de varianza del ejemplo 3	303
Tabla 77. Diametro de las varillas.....	311
Tabla 78. Identificación y definición del problema.....	321

Tabla 79. Preparación de los datos	322
Tabla 80. Cálculo de las contribuciones parciales y totales	323
Tabla 81. Tabla de Pareto.....	324
Tabla 82. Definición de los conceptos importantes en el estudio de un histograma.....	333
Tabla 83. Número de clases en un histograma.....	336
Tabla 84: Historial de Fallas.....	342
Tabla 85. Características principales de un diagrama de dispersión	349
Tabla 86. Ecuaciones de regresión.....	353
Tabla 87. Datos de las máquinas presentes en la mina	356
Tabla 88. Aplicación del método de los mínimos cuadrados para calcular la recta de regresión.....	357
Tabla 89. Clasificación del grado de correlación.....	359
Tabla 90. Obtención de los datos y determinación de valores máximos y mínimos	365
Tabla 91. Parámetros de una distribución normal.....	373
Tabla 92. Estimadores para las diferentes distribuciones	374
Tabla 93. Resumen de los intervalos de confianza.....	375
Tabla 94. Resumen de las pruebas de hipótesis	376
Tabla 95. Valore para realizar el gráfico	384
Tabla 96 Tiempo de reparación (minutos)	384
Tabla 97. Valores de las constantes D_3 y D_4 para $n=5$	385
Tabla 98. Valor de la constante A_2 para el gráfico de control.....	386

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Acta de Sesión.....	26
Figura 2. Formato de presentación	28
Figura 3. Logo del seminario de investigación en análisis de fallas.....	29
Figura 4. Naturaleza de los procedimientos de análisis cualitativo.....	47
Figura 5. Análisis cualitativo.	50
Figura 6. Tipos de análisis Cuantitativos	54
Figura 7. Métodos cuantitativos en el mantenimiento	60
Figura 8. Variables del contexto operacional	67
Figura 9. Clasificación general de riesgos	68
Figura 10. Modelo para la identificación del riesgo	72
Figura 11. Descripción de los factores de riesgo	74
Figura 12. Esquema general para realizar un análisis de criticidad independiente del método utilizado	78
Figura 13. Ciclo de vida de los equipos	87
Figura 14. Distribuciones frecuentes en el mantenimiento de los equipos o componentes	88
Figura 15. Gráficas de la distribución exponencial para determinar la probabilidad de falla.....	90
Figura 16. Papel de Weibull para el cálculo de los parámetros α y β	94
Figura 17. Introducción de datos para el ejemplo	95
Figura 18. Proceso para calcular los parámetros de escala α y forma β	96
Figura 19. Gráfica y obtención de resultados	96
Figura 20. Categorías principales afectadas por las consecuencias de una falla .	100
Figura 21. Flujo grama para el análisis de una fuga	106
Figura 22. Modelo de factores ponderados basados en el concepto del riesgo ..	112
Figura 23. Matriz de criticidad.....	115

Figura 24. Formato de procedimiento FMECA.....	128
Figura 25. Diagrama de proceso de un FMECA	130
Figura 26. Estructura taxonómica típica de un sistema.	132
Figura 27. Definición del sistema	132
Figura 28. Modelo de jerarquización taxonómica de la norma ISO 14224.....	133
Figura 29. Diagrama funcional de bloques	135
Figura 30. Definición de funciones del sistema.....	136
Figura 31. Definición de fallas funcionales.....	137
Figura 32. Fuentes fundamentales de falla.....	140
Figura 33. Identificación de modos de falla.....	141
Figura 34. Identificación de efectos	142
Figura 35. Determinación de consecuencias.	143
Figura 36. Hoja de trabajo FMECA típica	144
Figura 37. Clasificación de la causa Raíz	153
Figura 38. Diagrama para la aplicación de un Análisis Causa Raíz.....	158
Figura 39. Análisis de Posibles Causas.....	166
Figura 40. Árbol lógico de Fallas.....	167
Figura 41. Modos o causas posibles de Fallas	177
Figura 42. Descripción del modo de falla verificado.....	177
Figura 43. Causas posibles de falla	178
Figura 44. Causas probables de falla.	178
Figura 45. Causas raíz física del modo de falla 1.	179
Figura 46. Descripción de las causas posibles de falla.....	179
Figura 47. Lista de las causas posibles de falla.....	180
Figura 48. Causa de falla verificada.....	181
Figura 49. Causa raíz física del modo de falla 1.	181
Figura 50. Determinación de la causa raíz humana.....	182
Figura 51. Causa raíz humana.....	182
Figura 52. Causa posibles de falla.....	183
Figura 53. Verificación de las Causas posibles de falla.	183

Figura 54. Selección de la mejor solución.	185
Figura 55. Análisis PM	186
Figura 56. Solución a un problema crónico.....	187
Figura 57. Proceso para el análisis P-M	188
Figura 58. Productos punteados	189
Figura 59. Definición del fenómeno	190
Figura 60. Dilatadores.....	192
Figura 61. Defectos de punteado.....	193
Figura 62. Análisis físico	196
Figura 63. Diagrama de contacto.....	198
Figura 64. Mecanismos del sistema de formado.....	201
Figura 65. Presiones diferenciales.....	216
Figura 66. Flujo de aire	217
Figura 67. Guardas de seguridad	217
Figura 68. Reguladores de flujo.....	218
Figura 69. Contenedor de excesos	219
Figura 70. Desarrollo general método ¿por qué? - ¿por qué?	222
Figura 71. Que se consigue con el método ¿Por qué? - ¿Por qué?	222
Figura 72. Hasta cuando preguntarnos ¿Por qué? - ¿Por qué?	224
Figura 73. Metodología de desarrollo ¿por qué? – ¿Por qué?	226
Figura 74. Desarrollo por medio de Árbol Lógico.....	231
Figura 75. Formato para la metodología ¿Por qué? ¿Por qué?	231
Figura 76. Proceso de orientación de tapones	232
Figura 77. Disco alveolar	233
Figura 78. Soplos del orientador	233
Figura 79. Sople 2A	234
Figura 80. Funcionamiento del sople	235
Figura 81. Partes constitutivas del diagrama	241
Figura 82. Factores causales principales de una falla definidos por las 4M's.....	243
Figura 83. Clasificación de las causas por categorías	245

Figura 84. Diagrama Causa-Efecto para la falla de una caldera.....	246
Figura 85. Determinación del nivel de comprensión del diagrama Causa-Efecto ..	247
Figura 86. Símbolo de decisión.....	254
Figura 87. Símbolo conector	255
Figura 88. Recomendación para el uso de líneas de flujo	255
Figura 89. Esquema básico de un ordinograma	257
Figura 90. Ordinograma para la creación de un ordinograma para el análisis.....	257
Figura 91. Definición de los límites del proceso.....	261
Figura 92. Entradas significativas	265
Figura 93. Resultados significativos.....	265
Figura 94. Paso siguiente a realizar.....	266
Figura 95. Análisis del retroceso de las líneas de flujo del proceso	266
Figura 96. Desarrollo del símbolo de decisión	267
Figura 97. Ordinograma para el efecto de falla: no hay suficiente flujo de aire ...	268
Figura 98. Ordinograma para el efecto de falla: el aire frio sale intermitente.....	269
Figura 99. Ordinograma para el efecto de falla: el aire sale pero no esta frio.....	270
Figura 100. Ordinograma para el efecto de falla: no enfría bien	272
Figura 101. Ejemplo de diagrama de líneas	292
Figura 102. Ejemplo de diagrama de barras.....	293
Figura 103. Ejemplo de Histograma.....	294
Figura 105. Elaboración de la planilla.....	306
Figura 106. Construcción planilla de inspección.....	310
Figura 107. Anotación planilla de inspección (tendencia central)	312
Figura 108. Anotación planilla de inspección (tendencia dispersa).....	313
Figura 109. Regla 80/20	315
Figura 110. Diagrama de Pareto.....	316
Figura 111. Análisis ABC	317
Figura 112. Diagrama de flujo para la construcción del diagrama de Pareto.....	319
Figura 113. Rotulación de los ejes.....	326
Figura 114. Gráfico de Barras.....	326

Figura 115. Gráfico de línea	327
Figura 116. Diagrama de Pareto completo	328
Figura 117. Histograma	331
Figura 118. Conceptos importantes	332
Figura 119. Proceso para un histograma	334
Figura 120. Distribucción en forma de campana	340
Figura 121. Distribucción plana.....	340
Figura 122. Distribucción con un pico aislado.....	341
Figura 123. Distribucción truncada	341
Figura 124. Histograma para el ejemplo de aplicación	344
Figura 125. Algunos modelos de relación.....	347
Figura 126. Factores que afectan un diagrama de dispersión	350
Figura 127. Modelos para aplicación de regresión lineal simple.....	353
Figura 128. Diagrama de dispersión con su ecuación de regresión	358
Figura 129. Diagrama de flujo para las diferentes tendencias curvilíneas	360
Figura 130. Diagrama de flujo para elaborar un diagrama de dispersión	363
Figura 131. Rotular y trazar los ejes con sus respectivas escalas.....	366
Figura 132. Marcación de los pares de datos en el diagrama y rotulación	367
Figura 133. Análisis del gráfico de dispersión.....	368
Figura 134. Esquema de un gráfico de control	378
Figura 135. Vista analítica y gráfica de un gráfico de control.....	380
Figura 136. Curva CO para diferente tamaño de muestra	382
Figura 137. Proceso fuera de control.....	383
Figura 138. Gráfico R.....	386
Figura 139. Gráfico de Control X	387
Figura 140 Gráfico X con los valores corregidos	388

RESUMEN

TITULO: SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE FALLAS¹

AUTORES²: DAVIAN AUGUSTO MONCADA
EDDER RODRÍGUEZ ARENAS
JELDER QUIÑONES VELÁZQUEZ
JUAN ALEXANDER SARMIENTO GONZÁLEZ

PALABRAS CLAVES: Metodología, Dato, Métodos Cualitativos, Métodos Cuantitativos, Criticidad, Equipos Críticos, Falla, Análisis de Fallas.

DESCRIPCIÓN:

El análisis de falla es el conjunto de técnicas que aplicadas según un modelo estructurado permite identificar, prevenir y/o predecir las causas, circunstancias y eventos que han producido o pueden conllevar a un estado de falla del equipo, permitiendo la toma de decisiones conducentes a reparar, prevenir, controlar y/o eliminar la falla. En este sentido el análisis de falla constituye una herramienta poderosa para la gestión de activos según el nuevo enfoque de mantenimiento que exige el desarrollo, implementación y masificación de técnicas y herramientas que permitan la toma de decisiones acertadas, argumentadas y fundamentadas en un análisis riguroso de las instalaciones. El identificar los factores de riesgo operacionales conduce a realizar un análisis de criticidad, el cual permite identificar los equipos críticos, a los que es conveniente realizar un análisis de falla, además el método de análisis de falla a usar y el enfoque; ya sea cualitativo, ya sea cuantitativo, depende del problema a tratar, de los datos y registros que se tengan, de las herramientas, del nivel de conocimientos del personal de mantenimiento, del tiempo y de los recursos que se dispongan para llevar a cabo dicho análisis, por lo que es conveniente conceptualizar los términos utilizados, la formulación matemática pertinente que requieren los métodos estadísticos y el modelo estructural de cada metodología.

El presente trabajo desarrollado a través de la modalidad de seminario de investigación, busca difundir el uso de estas metodologías para análisis de fallas tanto en la comunidad estudiantil de pregrado como en el personal de ingeniería que trabaja en el mantenimiento de alta gestión, fortaleciendo el vínculo universidad-industria. Es con este objetivo que se brinda una guía al alcance que pueda facilitar el conocimiento y clarificación de las diferencias y potencialidades de los métodos de análisis de falla más representativos.

¹ Trabajo de grado

² Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Ing. Mecánico, Carlos Ramón González Bohórquez

ABSTRACT

TITLE: SEMINARY OF RESEARCH IN METHODOLOGIES OF FAILURE ANALYSIS³

AUTHORS⁴: DAVIAN AUGUSTO MONCADA
EDDER RODRÍGUEZ ARENAS
JELDER QUIÑONES VELÁZQUEZ
JUAN ALEXANDER SARMIENTO GONZALEZ

KEY WORDS: Methodology, Fact, Qualitative Methods, Quantitative Methods, Critical Equipments, Fault, Failure Analysis.

DESCRIPTION

The failure analysis is the group of technologies that are applied according to a constructed model allows to identify, to anticipate and / or to predict the reasons, circumstances, and events which can carry a state of fault of equipment, allowing the capture of conducive decisions to repair, to prevent, to control and/or to eliminate the fault. In this way the analysis of fault constitutes a powerful tool for management of assets according to the new approach of maintenance that demands development, execution and generalizing of technique and tools that allow the capture of right, argued and based decisions in a rigorous analysis of installations. To identify factors of operational risks drives to make a critical analysis which allows to identify the critical equipments, which are useful to make failure analysis, besides the method of analysis of fault to use and like as qualitative or quantitative approach, depends on problem to treat, data and searches that are given, tools, level of knowledge of human recourse of maintenance, time and recourses that prepare to carry mentioned analysis, for that it is useful to conceptualize used terms, mathematical formulation which need statistical methods and structural model of every methodology.

The present and developed work across the modality of seminary of research, seeks the use of these methodologies for failure analysis as well in student community as in human recourse of engineering who work in maintenance of high management, strengthening the link university - industry. With this objective gives a guide to scope that can facilitate the knowledge and clarifying of differences and potentials of the most representative methods of failure analyses.

³ Trabajo de grado

⁴ Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Ing. Mecánico, Carlos Ramón González Bohórquez

INTRODUCCIÓN

Sin duda, el desarrollo de nuevas tecnologías ha marcado de manera significativa la actualidad de la industria mundial, particularmente la mecánica se ha visto bajo la influencia determinante de la electrónica, la automática y las telecomunicaciones, es por esta razón que la ingeniería de mantenimiento juega un papel importante en el funcionamiento de las industrias, ya que es ésta, la encargada de aumentar la disponibilidad de las instalaciones, velar por la calidad de los trabajos de mantenimiento y reducir los costos de mantenimiento entre otras; esto se logra, exigiendo mayor preparación del personal, no sólo desde el punto de vista de la operación de la maquinaria, sino desde el punto de vista del mantenimiento industrial, por lo que se necesita la formación de líderes que se destaquen local e internacionalmente en la gestión del mantenimiento. Asimismo se hace necesario que la comunidad ingenieril, la industria y el gobierno, reconozcan la importancia del mantenimiento y la labor de los profesionales en este campo y la forma como a través de sus políticas se puede lograr en un futuro el desarrollo económico de sus empresas.

Una de las herramientas utilizadas en la ingeniería de mantenimiento para poder lograr sus objetivos, es el análisis de falla en sistemas, procesos y/o equipos, el cual permite determinar la causa origen de los problemas en instalaciones industriales, facilitando la elaboración de propuestas de mejora que reduzcan sustancialmente o eliminen la frecuencia y el impacto de las fallas. En la actualidad este campo no está restringido al departamento de ingeniería de mantenimiento sino que debe ser conocido y aplicado por todos los niveles de la organización. Por ello, resulta indispensable que ingenieros, técnicos y personal responsable de las áreas de producción, mantenimiento y control de calidad posean conocimientos básicos de cómo se realiza un análisis de falla.

En respuesta al desafío planteado y con el propósito de difundir entre la comunidad académica los aspectos distintivos del mantenimiento actual, se toma la decisión de realizar un seminario de investigación en metodologías de análisis de falla para formar personas idóneas capaces de enfrentar estos nuevos problemas.

El seminario de investigación en metodologías de análisis de falla, es un proceso reflexivo, sistemático y crítico que tiene como propósito fortalecer en el estudiante las habilidades requeridas en el manejo de la información y la comunicación para desarrollar investigación científica, valiéndose de la formación para el trabajo tanto personal como en equipo, y original, iniciando el estudio de nuevos objetos de investigación de interés tanto para la universidad como para la escuela de Ingeniería Mecánica mediante una dinámica que comprende actividades de relatoría, correlatoria, discusión y elaboración de un documento síntesis, en el cual se incluye el estudio de los referentes contextuales en metodologías de análisis de fallas, desarrollando así todo el tema de manera compacta, lógica y coherente entre los subtemas que conforman el seminario.

Como resultado de este seminario se presenta un documento en el cual se muestran los conocimientos previos que se deben tener para realizar un análisis de fallas: en qué consiste un análisis cualitativo, un análisis cuantitativo, como se identifican los factores de riesgo y su posterior evaluación mediante un estudio de criticidad. Una vez se tengan claros estos conocimientos para una industria en particular, se pueden utilizar las metodologías de análisis de falla las cuales se aplican para equipos críticos, se mostrarán los métodos cualitativos y cuantitativos para el análisis de falla con un ejemplo de aplicación en la industria. Por medio de presentaciones en formato pptx (Power Point) se explicarán estos temas durante el desarrollo del seminario. Todo esto con el fin de facilitar herramientas que permitan realizar de una forma eficaz el análisis de fallas.

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

1. GENERALIDADES DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

1.1. QUÉ ES EL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN⁵

El Seminario de Investigación, también conocido como Seminario Alemán, es una actividad académica, cuyo origen se dio a finales del siglo XVIII en la Universidad de GOTTINGEN de Alemania, para renovar las estrategias de estudio y formación de los investigadores, y demostrar que la docencia y la investigación se pueden unir y complementar para obtener mejores resultados.

Consiste en estudiar, discutir e intercambiar experiencias acerca de un tema en particular, en un grupo, en el cual sus participantes, se intercomunican exponiendo dicho tema (la Relatoría), complementándolo, evaluándolo (Correlatoría), aportando entre todos (la Discusión), sacando conclusiones y planteando nuevos interrogantes permitiendo que todo ello quede en la memoria escrita (el protocolo).

El Seminario de Investigación se programa por temas los cuales son seleccionados con la orientación del director del seminario, quien con su experiencia y conocimiento del tema central, guía la selección con la debida pertinencia, actualidad y ubicación en el contexto. Los temas son desarrollados en sesiones planificadas, en las cuales, los miembros del grupo deben asumir diferentes roles, de acuerdo con la descripción anterior, manteniendo una relación

⁵ Universidad Industrial de Santander. Lineamientos para el seminario de investigación como modalidad para el desarrollo del trabajo de grado. Vicerrectoría académica. Septiembre de 2007

de interés y compromiso con el conocimiento, sin jerarquías, en un clima de colaboración y participación activa.

1.2. OBJETIVO DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

Formar a los participantes para la investigación científica mediante el desarrollo de habilidades específicas aplicadas al asumir los diferentes roles dentro del seminario. Dichas habilidades están orientadas a desarrollar la capacidad de lector crítico de resultados de investigación en cualquiera de las áreas del conocimiento, a fortalecer la capacidad de observar e identificar los problemas presentes en temas bajo análisis, a buscar respuestas a preguntas claves y sustentarlas teórica y metodológicamente en forma verbal y por escrito, y a identificar las relaciones del problema objeto de estudio con el contexto económico, político o social, a fin de enriquecer con una mirada de integralidad, el conocimiento para el grupo de estudiantes. Para ello se programan y ejecutan ejercicios estructurados que permiten a los estudiantes desarrollar competencias iniciales de investigador, avanzar en el conocimiento y aportar buenas revisiones y análisis sobre tópicos que pueden facilitar el desarrollo de la investigación.

Para alcanzar dicho objetivo es preciso que haya una formación desde el trabajo personal hacia el trabajo en equipo; para esto, cada participante debe reconocer sus intereses, estilos de aprendizaje, su capacidad para aprender en interacción con pares; debe apropiarse de la metodología e instrumentos con los cuales trabajará, con el fin de lograr, al interactuar con los demás miembros del grupo en las sesiones del seminario, compartir, criticar y corregir las ideas que surjan de él, en un ambiente de la colaboración mutua.

Los seminarios de investigación, no se enfocan hacia la repetición de trabajos ya realizados, sino hacia la búsqueda de respuestas con nuevos argumentos; por tal razón los trabajos que se deriven del cumplimiento del objetivo del Seminario, deben caracterizarse por su originalidad y estar acordes al nivel científico de formación de sus participantes.

1.3. VENTAJAS DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

El seminario de investigación, como herramienta para el desarrollo integral, presenta las siguientes ventajas:

- Permite a los participantes contar con un director (profesor) durante el seminario, el cual les guía hacia la consecución de los propósitos establecidos, y además, resuelve las dudas e inquietudes o en su defecto, orienta sobre las fuentes de consulta y ayuda a los miembros del grupo en la búsqueda para suplir las necesidades de información.
- Fortalece el hábito de documentarse acerca del tema bajo estudio. Para esto los participantes recurren a fuentes bibliográficas, bases de datos, textos de referencia obligada; este ejercicio refuerza el desarrollo de las competencias interpretativas, argumentativas y propositivas; les permite apropiarse y aprender de los métodos que emplearon los autores de los artículos y textos, así como también, reconocer su valor y aporte a la investigación.
- Permite que los participantes desempeñen diferentes roles dentro del grupo, desarrollando habilidades comunicativas y de relaciones interpersonales, complementarias para la formación tanto personal como profesional.
- Fomenta el aprendizaje como una experiencia grupal, permite experimentar la eficiencia del trabajo en equipo y si el grupo está conformado con estudiantes

de diferentes áreas del conocimiento, la riqueza de la interdisciplinariedad, características todas aplicables y necesarias en el desempeño laboral del mundo de hoy.

- Permite el uso de distintas herramientas didácticas de apoyo al desarrollo de las sesiones, así como un control sobre la planificación establecida de éstas.
- Es una metodología integradora centrada en el estudiante, con amplio potencial para fortalecer la habilidad de aprender a aprender, fundamental para tomar el perfil del ciudadano del siglo XXI, quien deberá asumir el compromiso de aprender a lo largo de la vida, como la plantea J. Delors⁶. Sus ventajas la hacen aplicable a todas las áreas del conocimiento humano y no solo a algunas como equivocadamente pudiera pensarse⁷.

1.4. CARACTERÍSTICAS

El seminario de investigación posee las siguientes características:

- Participación activa de todos los miembros del seminario, puesto que no sólo el director (profesor) interviene, sino también todos los integrantes del grupo realizan su aporte desde el rol que estén desempeñando. En este proceso los participantes siendo discípulos empiezan a recorrer el camino hacia Maestros.
- El Seminario de Investigación está conformado por un grupo reducido, de aprendizaje activo y cooperativo, inducido a investigar, reflexionar, descubrir y concluir.

⁶ Jaques Delors et al. La Educación Encierra un Tesoro. Informe a la UNESCO de la Comisión Internacional sobre la educación para el siglo XXI. París, 1996.

⁷ Carlos M. Vélez S, Resumen El Seminario Investigativo, basado en el Simposio permanente sobre la Universidad 1990-1992 ASCUN.

- Empleo del dialogo permanente para compartir los conocimientos adquiridos
- Ambiente amable y cooperativo fomentando la mayor participación de los integrantes del grupo.
- Sesiones desarrolladas utilizando medios didácticos de apoyo al aprendizaje.
- La estructura del seminario y todas las actividades y parámetros para desarrollarlas, son planificados en la primera sesión.
- El seminario de investigación exige a los participantes una alta responsabilidad para lograr la preparación adecuada, que les permita tener bases para llevarlo a cabo.

1.5. ORGANIZACIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

El Seminario de Investigación se compone de las siguientes actividades: la Relatoría, la Correlatoría, la Discusión y el Protocolo, las cuales deben girar en torno a un tema, del que se desprenden los subtemas que se trataran durante las sesiones.

Dichas actividades son responsabilidad de los integrantes del grupo, por lo cual a cada uno de ellos es asignado un rol de carácter rotativo; es así como una persona que en una sesión asume el rol de correlator podrá ser el protocolante en la siguiente, es decir, el responsable del protocolo.

La organización del seminario también implica establecer el lugar donde se llevará a cabo, el número de sesiones y las fechas para realizarlo; así como la duración de cada una de las actividades (Relatoría, Correlatoría, Discusión y Protocolo).

El seminario de investigación en Metodologías de análisis de fallas está compuesto por:

Director: Ing. Carlos Ramón González Bohórquez
Participantes: Davian Augusto Moncada Delgado
Edder Rodríguez Arenas
Jelder Quiñones Velásquez
Juan Alexander Sarmiento González

A los participantes se les asigna un rol para cada sesión. Las sesiones se llevan a cabo en el salón 103 de la Escuela de Ingeniería Mecánica. El número de sesiones depende del tema y los subtemas mostrados en la tabla 1. Las sesiones están programadas para una duración de una hora y media.

1.6. TEMA DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

El seminario de investigación tratará las metodologías de análisis de falla, las cuales constituyen una herramienta de alto valor en la ingeniería de mantenimiento, tanto en la identificación de las fallas, como en la determinación de las acciones tendientes a disminuir el impacto de éstas sobre el propósito general de la organización, los elementos que atentan contra dicho propósito son las fallas, los imprevistos, estrategias inapropiadas de mantenimiento y problemas de diseño. El uso de técnicas de análisis de falla permite la disminución o eliminación de las fallas e imprevistos y la identificación de estrategias inadecuadas de mantenimiento y errores de diseño. Por tanto trae enormes beneficios económicos, en especial cuando los procesos poseen altos costos por pérdida de producción. Es por esta razón que el desarrollo de una cultura orientada hacia el diagnóstico proactivo e integrado de los procesos, sistemas y/o equipos es una de las tareas primordiales de mantenimiento. Y debido a que en muchos casos la aplicación de las principales metodologías de análisis de falla es vista como una

tarea demasiado compleja, se hace necesario presentar los conocimientos previos que se deben tener acerca de la implementación de éstas.

Para realizar un análisis de falla exitoso es indispensable seguir una metodología disciplinada y rigurosa que garantice el hallazgo de la causa origen del problema, de tal manera que la inversión de tiempo y recursos sea eficiente y eficaz.

El análisis de falla se inicia cuando se percibe el problema; ahora bien, la secuencia de pasos a seguir en busca de la identificación de la causa origen puede variar dependiendo de la naturaleza específica de la falla, del equipo estudiado, del contexto operacional, de la magnitud de las consecuencias y de la instancia del proceso, por esta razón es conveniente conocer las diferentes metodologías para análisis de falla y su aplicación de acuerdo a cada caso específico.

1.7. DIRECCIÓN DEL SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN METODOLOGÍAS PARA ANÁLISIS DE FALLAS

La dirección del seminario de Investigación en Metodologías para análisis de fallas estuvo a cargo del profesor: Ing. Carlos Ramón González Bohórquez quien cuenta con amplia experiencia en docencia y practica en el campo de la ingeniería de mantenimiento.

Su principal función es orientar y liderar la investigación, brindando la asesoría requerida para encaminar los trabajos y tareas hacia el cumplimiento de lo programado. Brindando un adecuado ambiente de trabajo e interviniendo durante las sesiones corrigiendo y complementando las opiniones de los participantes, propiciando el debate para enriquecer la capacidad a la expresión oral, la argumentación y la participación crítica durante el seminario.

1.8. METODOLOGÍA

Para desarrollar el seminario de Investigación en Metodologías de análisis de fallas satisfactoriamente y garantizar la claridad de las sesiones y cumplimiento de los objetivos planteados, se escogió una metodología contenida en tres fases: planeación, ejecución y finalización; las cuales se relacionan entre sí dependiendo cada una de la anterior. Fases que se explicarán en los siguientes capítulos.

2. PLANEACIÓN

En esta etapa se establecen los lineamientos bajo los cuales se desarrolla el seminario, se definen los alcances y resultados que se esperan obtener mediante la selección del tema, el estudio bibliográfico, los subtemas; y la planificación de las sesiones.

Los alcances y objetivos del seminario son:

- Elaborar un documento síntesis original donde se recopile el contenido total del seminario de investigación de acuerdo con los subtemas especificados en la tabla 1.
- Realizar presentación en Power Point de los temas investigados basada en el documento síntesis de acuerdo a los lineamientos de la tabla 1.
- Evaluación de la eficacia de las metodologías de análisis de falla estudiadas, ya aplicadas en algunos casos específicos de la industria según características de diseño y funcionamiento de la planta y/o equipo, mediante el análisis y las discusiones llevadas a cabo en el desarrollo de las relatorías.

2.1. ESTUDIO Y SELECCIÓN DEL MATERIAL BIBLIOGRÁFICO

En lo concerniente a la selección del tema de investigación, se eligió uno que fuera de interés para todos los estudiantes participantes. Se realizó un estudio previo del tema, el cual demostró que la formación académica de los estudiantes participantes cumple para desarrollar el seminario y el director cuenta con la capacidad de orientación y el perfil para dirigirlo.

Antes de iniciar el seminario se definió la bibliografía, ésta se basó en la búsqueda exhaustiva de material como: libros, revistas, páginas web, memorias de congresos, monografías y de aplicaciones específicas de la industria; si en algún caso el participante considera que ésta no es suficiente, puede recurrir a otras fuentes, siempre que aporten algo nuevo a su investigación acerca del tema. Para estudiar el tema seleccionado, la bibliografía es la siguiente:

LIBROS

- ✓ **GONZÁLEZ, Francisco Javier.** *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado. FC 2008.*

Este libro da respuesta a un gran número de preguntas que, a menudo, se hacen los Directores Técnicos de Empresa y sus Jefes de Mantenimiento. Sobre todo persigue aportar propuestas y soluciones para mejorar los indicadores básicos de los servicio de mantenimiento: Fiabilidad, Disponibilidad y Coste mediante la integración de técnicas avanzadas tanto organizativas como puramente metodológica, pero sin descuidar aspectos básicos para el éxito como los recursos humanos, la informática, etc.

- ✓ **MORA GUTIÉRREZ, Alberto** *Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicio. AMG 2009.*

El libro se fundamenta en un nuevo enfoque sistémico Kantiano que permite entender, manejar y controlar un sistema de mantenimiento y producción, bajo los más modernos y rigurosos conceptos científicos y prácticos, encontrados a través de muchos años de experiencia y estudios del autor en varios continentes. La metodología de desarrollo está organizada de una forma lógica y coherente a la luz del enfoque sistémico. Está diseñado de tal manera que todos los conceptos se manejan con el más puro tratamiento científico, con aplicaciones fáciles de entender y de llevar a cabo en las empresas.

- ✓ **PRAT BARTES, Albert.** *Métodos estadísticos. Alfaomega.2000.*

En este libro se tocan temas fundamentales como son: Histograma, Diagrama causa Efecto, Gráfico de control, Diagrama de dispersión. En general la estadística aplicada a los fallos. Ya que con respecto a los fallos también le interesa conocer al mantenimiento qué relación existe entre el tiempo de uso y la aparición de estos y la teoría más desarrollada del fallo es la probabilidad, con el concepto de confiabilidad.

✓ **SILVA, Pedro.** *El mantenimiento en la práctica.* 2008

En los últimos 20 años ha habido muchos cambios en la industria y también en la forma como hacemos mantenimiento, en un nuevo enfoque nos muestra como mediante un pensamiento sistémico aplicado al mantenimiento, podemos aplicar una estrategia de mantenimiento, aumentando la calidad, indicadores de gestión y confiabilidad, además nos muestra las principales filosofías de mantenimiento, un análisis de causa de las fallas y códigos sugeridos para su implementación.

✓ **TOVAR SANCHEZ, Gustavo.** *Fundamentos del análisis de falla.*

A lo largo de este libro se presentan, los fundamentos del análisis de falla, una propuesta sobre las etapas necesarias para realizar el análisis y las técnicas que conduzcan a establecer las causas de las fallas, así como los equipos que se utilizan en esta labor. Nos permite conocer métodos para hallar las causas de una falla en particular, con el propósito de que se pueda programar las medidas conducentes para evitar que se repita en el futuro.

✓ **WILSON, Paul F. - DELL, Larry D. - ANDERSON, Gaylor F.** *-Root Cause Analysis: A Tool for Total Quality Management-*American Society for Quality - AAQ-2000

Este libro proporciona una explicación práctica de análisis de causa raíz y se analiza el uso proactivo de las técnicas de análisis para la predicción y la prevención de problemas. Se hace hincapié en los conceptos básicos, diversas técnicas de análisis, y su propósito común para determinar la verdadera causa de los problemas.

REVISTAS

- ✓ Revista colombiana de tecnologías de avanzada ISSN: 1692-7257 Volumen 13 – 22000034. Sistemas para la detección y diagnóstico de fallas: implantación industrial. Aranguren Sandra. Tarantino Rocco.

MEMORIAS

Congresos

- ✓ 1er Congreso Mexicano de Confiabilidad y Mantenimiento – Octubre 30-31,2003 – LEON, GTO. MEXICO. El camino hacia el RCM - mantenimiento centrado en confiabilidad un enfoque práctico.
- ✓ ENCUESTA DEL ESTADO DEL ARTE DEL MANTENIMIENTO EN COLOMBIA. (Análisis comparativo 1990-2007). Comisión Nacional de Mantenimiento y Mecánica. Asociación Colombiana de Ingenieros ACIEM.

Monografías

- ✓ **AREVALO GUERRA, Heider Alonso.** *Aplicación de la metodología análisis causa raíz (RCA) para la reducción de fallas en sistemas de bombeo mecánico en los campos de la superintendencia de mares de ECOPETROL S.A. Universidad Industrial de Santander 2005*

Una de las alternativas para lograr la reducción de la frecuencia de fallas en los campos petroleros, ha sido la implementación de la metodología Análisis de Causa Raíz (ACR) la cual ha demostrado ser muy útil en la identificación y solución de fallas repetitivas, identificando la causa que da origen a las fallas.

- ✓ **HENAO MARTÍNEZ, Jhon Harvy - VALLEJO JARAMILLO, Juan Santiago - PORTALA, Alex - MORA GUTIÉRREZ, Luis Alberto** - *Informe final de investigación del Sistema de Bombeo - Análisis de Fallas - Grupo de Investigación en Mantenimiento Industrial GEMI - Universidad EAFIT - Registrado Colciencias - Medellín - Colombia - 2005-07-24*

Este proyecto de grado busca implementar un plan de mantenimiento preventivo basado en el análisis FMECA para un sistema de bombeo compuesto por seis

bombas en paralelo. La solución se desarrolla mediante la inspección e identificación de las áreas o ensambles en las cuales es más probable que se den fallas del sistema mediante herramientas de mantenimiento preventivo.

- ✓ **MONTAÑA RIVEROS, Leonardo - ROSAS NIÑO, Elkin Gustavo.** *Diseño de un sistema de mantenimiento con base en análisis de criticidad y análisis de modos y efectos de falla en la planta de coque de fabricación primaria en la empresa acerías paz del río s.a. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia 2006.*

Monografía en la cual diseñan un sistema de mantenimiento basados en dos de las herramientas del Sistema Integrado de Confiabilidad Operacional, el análisis de criticidad (CA) y el análisis de modos y efectos de falla (FMEA) no obstante, se hace una descripción de todas las herramientas utilizadas por el Sistema Integrado de Confiabilidad Operacional metodología del RCM.

- ✓ **OLAVE PÁEZ, Javier Ricardo - BURGOS SUAREZ, Libardo - SAENZ GARCIA, Rodolfo.** *Herramientas para el análisis de criticidad de equipos y sus fallas. Especialización en gerencia de mantenimiento.2003*

Libro donde se encuentra una breve descripción de diversas herramientas para minimizar las fallas de equipos. Exponiendo los diferentes modelos de los procedimientos para análisis de criticidad de equipos tanto cualitativos como cuantitativos y además métodos de análisis de fallas para equipos críticos.

- ✓ **TARAZONA ALVARADO, Silvia Juliana –** *Evaluación de integridad de los equipos estáticos de proceso de la refinería de orito – ECOPETROL S.A. Universidad Industrial de Santander 2008*

Esta monografía tiene por objeto evaluar la integridad estructural y determinar la vida útil remanente y confiable de los equipos de proceso de la refinería de Orito-Putumayo, mediante la implementación de la metodología de inspección basada en el riesgo RBI.

Aplicaciones

- ✓ HUERTA MENDOZA, Rosendo El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional PDVSA

- ✓ Análisis de Causa Raíz aplicada a fallas en bombas asociadas a sellos mecánicos. MSC. Tibaldo Alfredo, Díaz Molina Especialista en Ingeniería de Mantenimiento y Confiabilidad.
- ✓ ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE RIESGOS. Brocardo de J. Montoya B. Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. – ISA
- ✓ Investigación Causa Raíz para solucionar problemas Admisión de aire para el Motor Boletín #23 Por Richard Widman <http://www.widman.biz>

Otros

- ✓ **Norma SAE Estándar JA 1011.** Criterios de evaluación para procesos RCM.
- ✓ **ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.** Normas para presentación de trabajos de grado.
- ✓ **INTERNATIONAL STANDARD ISO 14224** Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment 2004
- ✓ **NTP 679:** Análisis modal de fallos y efectos. AMFE
- ✓ **MIL-STD-1629, Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis;** Department of Defense, Washington, DC 1998.
- ✓ **MIL-HDBK-338B;** Military Handbook Electronic Reliability Design Handbook 1 October 1998
- ✓ API RP-580 Risk based inspection. Recommended Practice, First Edition, May 2002
- ✓ API RP-580 Risk based inspection. Base Resource Document, First Edition, May 2000

Una vez efectuado el estudio bibliográfico se observa que cuenta con subtemas comunes y que profundiza en aspectos relevantes que permiten comprender de manera integral la ingeniería de mantenimiento en especial para análisis de fallas. Se tiene en cuenta que la investigación en ingeniería de mantenimiento debe estar en constante evolución e innovación, por lo cual se seleccionaron los subtemas como se muestra en la Tabla 1

Tabla 1: Subtemas de Investigación

TEMAS	SUBTEMAS
<p>1. Conocimientos previos a un estudio de análisis de fallas.</p>	<p>1.1 Análisis sobre diversos métodos cualitativos y cuantitativos.</p> <p>1.2 Riesgo en la operación técnica de equipos.</p> <p>1.3 Métodos para análisis de criticidad.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Método de Factores Ponderados Basados en el Concepto del Riesgo. • Método según estudio de DATANBANK MKS Ltda. • Método elaborado por MONCHY FRANCOIS.
<p>2 Métodos cualitativos para el análisis de fallas.</p>	<p>2.1 Análisis de los modos de falla, sus efectos y su criticidad (FMECA).</p> <p>2.2 Análisis causa raíz – RCA.</p> <p>2.3 análisis PM.</p> <p>2.4 Análisis ¿Por qué? ¿Por qué?</p> <p>2.5 Diagrama causa efecto.</p> <p>2.6 Ordinograma.</p>
<p>3. Métodos cuantitativos para el análisis de fallas.</p>	<p>3.1. Introducción.</p> <p>3.2. Planilla de inspección.</p> <p>3.3. Gráfico control.</p> <p>3.4. Histograma.</p> <p>3.5. Diagrama de dispersión.</p> <p>3.6. Diagrama de Pareto.</p>

2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SUBTEMAS

2.2.1. Conocimientos previos a un estudio de análisis de fallas.

Los análisis cualitativos y cuantitativos son un conjunto de procedimientos para extraer de los resultados de una investigación la mayor y mejor información y significado. Dependiendo de los datos presentes para realizar un análisis de falla se escoge el tipo de análisis para su solución ya sea cualitativo o cuantitativo. En el análisis cualitativo se hacen registros narrativos de los fenómenos los cuales son estudiados mediante técnicas como la observación participante, y entrevistas no estructuradas entre otras. El análisis cuantitativo se fundamenta en datos históricos que se utilizan en diversos modelos matemáticos, este tipo de análisis estudia la asociación o correlación entre variables, la generalización y objetivación de los resultados a través de una muestra para hacer inferencia a una población de la cual toda muestra procede y explicar como sucede o no de una forma determinada un fenómeno específico.

El análisis de falla para equipos al ser un proceso complejo que requiere de personal capacitado, tiempo y recursos, se aplica a equipos vitales para el funcionamiento adecuado de los procesos, con alguna probabilidad de falla. La clasificación de los equipos para determinar a cuales se debe realizar un análisis de falla, se realiza estableciendo los factores de riesgos en las operaciones técnicas de equipos y la evaluación de éstos mediante un estudio de criticidad que se basa en la probabilidad de falla y las consecuencias de la falla, en base a estos resultados se pueden clasificar los equipos en críticos, medianamente críticos y no críticos, es a los equipos críticos a los que se deben realizar los análisis de falla, estos aspectos se tratarán durante el seminario en los siguientes temas:

- Análisis sobre diversos métodos cualitativos y cuantitativos.
- Riesgo en la operación técnica de equipos.
- Modelos para análisis de criticidad.

2.2.2. Métodos cualitativos para el análisis de fallas

Los métodos cualitativos para análisis de fallas, se aplican en la ingeniería de mantenimiento para encontrar las causas que originan las fallas en procesos, sistemas o equipos mediante técnicas de observación y verificación, entrevistas no estructuradas, lluvia de ideas, entre otras. Estos métodos cualitativos son sistemáticos, lógicos y cada uno tiene un procedimiento claro a seguir para encontrar las causas origen de la falla. Los métodos cualitativos que se estudiarán en el seminario son:

- Análisis de Modos de Fallas, Efectos y su Criticidad (FMECA).
- Análisis Causa Raíz – RCA.
- Análisis PM (Physical Method).
- Análisis ¿Por qué? – ¿Por qué?
- Diagrama Causa-Efecto.
- Ordinograma.

2.2.3. Métodos cuantitativos para el análisis de fallas

Los métodos cuantitativos para el análisis de fallas se basan en el estudio de la estadística e indicadores asociados al proceso evaluado, siendo usual el empleo de modelos matemáticos rigurosos y de gráficas para la presentación y análisis de los datos. Su fundamento está en encontrar la probabilidad de que ocurra una falla y pronosticar que puede suceder en el futuro para tomar decisiones, es decir

expresar en términos probabilísticos las fallas de los equipos, esto se realiza por medio de los registros históricos de los procesos, sistemas y equipos. Los métodos cuantitativos que se estudiarán en el seminario son:

- Planilla de Inspección.
- Gráfico de Control.
- Diagrama de Dispersión.
- Histograma.
- Diagrama de Pareto.

2.3. PLANEACIÓN DE LAS SESIONES

El número de sesiones se determinó de acuerdo a los subtemas seleccionados. Se asignó a cada participante un subtema para exponer, de forma que quedaran equilibradas las cargas en los subtemas, a la vez se definieron los roles de cada participante (Relator, Correlator, Protocolante, Asistente), dichos roles se rotaran de manera equitativa con el objeto de que cada participante desarrollara las destrezas requeridas para cada rol, como se muestra en la tabla 2. Ya definido el número de sesiones se organizaron las respectivas fechas de tal modo que hubiera un lapso de tiempo prudente para la preparación de los subtemas. Las fechas de las relatorías se escogieron de acuerdo a su asequibilidad horaria, tanto para el director como para los participantes, y también por la disponibilidad de herramientas necesarias para el desarrollo de cada sesión como el vídeobeam y el salón.

Tabla 2: Asignación de roles por subtemas

TEMA	RELATOR	CORRELATOR	PROTOCOLANTE
1. Conocimientos previos a un estudio de análisis de fallas.			
1.1 Análisis sobre diversos métodos cualitativos y cuantitativos.	Davian Moncada	Juan Sarmiento	Jelder Quiñones
1.2 Riesgo en la operación técnica de equipos.	Edder Rodríguez	Davian Moncada	Juan Sarmiento
1.3 Métodos para análisis de criticidad.	Juan Sarmiento	Jelder Quiñones	Edder Rodríguez
<ul style="list-style-type: none"> • Método de Factores Ponderados Basados en el Concepto del Riesgo. • Método según estudio de DATANBANK MKS Ltda. • Método elaborado por MONCHY FRANCOIS. 			
2 Métodos cualitativos para el análisis de fallas:			
2.1 Análisis de los modos de falla, sus efectos y su criticidad (FMECA).	Jelder Quiñones	Edder Rodríguez	Davian Moncada
2.2 Análisis causa raíz – RCA.	Davian Moncada	Juan Sarmiento	Jelder Quiñones
2.3 análisis PM.	Edder Rodríguez	Davian Moncada	Juan Sarmiento
2.4 Análisis ¿Por qué? ¿Por qué?	Juan Sarmiento	Jelder Quiñones	Edder Rodríguez
2.5 Diagrama causa efecto.	Jelder Quiñones	Edder Rodríguez	Davian Moncada
2.6 Ordinograma.	Davian Moncada	Juan Sarmiento	Jelder Quiñones
3. Métodos cuantitativos para el análisis de fallas:			
3.1. Introducción.	Davian Moncada	Juan Sarmiento	Jelder Quiñones
3.2. Planilla de inspección.	Edder Rodríguez	Davian Moncada	Juan Sarmiento
3.3. Gráfico control.	Jelder Quiñones	Edder Rodríguez	Davian Moncada
3.4. Histograma.	Edder Rodríguez	Davian Moncada	Juan Sarmiento
3.5. Diagrama de dispersión	Juan Sarmiento	Jelder Quiñones	Edder Rodríguez
3.6. Diagrama de Pareto	Jelder Quiñones	Edder Rodríguez	Davian Moncada

3. EJECUCIÓN

Esta etapa consistió en llevar a cabo lo establecido en la planeación del seminario; la preparación de un documento por parte del relator de cada subtema y el desarrollo de cada sesión.

3.1 DOCUMENTACIÓN PARA LOS SUBTEMAS

El relator de cada uno de los subtemas elaboró un documento en formato de texto y su respectiva presentación en Power Point, con normas técnicas y metodología científica acerca de su exposición, producto de la actividad investigativa, propositiva y argumentativa. Antes de cada sesión este documento se sometió a una exhaustiva revisión por parte del director para su respectiva aprobación.

Previo a cada una de las sesiones, los miembros del grupo; indiferentemente del rol que desempeñaron, conocieron y estudiaron dicho documento y la bibliografía definida, con el propósito de estar preparados para participar y aportar al desarrollo de la sesión.

3.2 DESARROLLO DE UNA SESIÓN

Cada una de las sesiones del seminario, a diferencia de la primera, por no tener predecesora, se desarrolló de manera fluida siguiendo el orden de las actividades que aparecen en la tabla 3. La duración de cada relatoría se estableció en un lapso de tiempo de una hora y media, dependiendo de la complejidad del tema, ésta se podía extender hasta dos horas.

Tabla 3. Descripción de Roles

ACTIVIDAD		DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE	DURACIÓN (Minutos)
1	Apertura de la sesión	<ul style="list-style-type: none"> • Lectura del plan de trabajo. • Verificación de la asistencia. • Confirmación o asignación de roles. • Asignación de los roles para la próxima sesión. 	Profesor (Director)	5
2	Lectura del protocolo	<ul style="list-style-type: none"> • Lectura del protocolo. • Se abre una sesión de preguntas aclaratorias del texto del protocolo. Los ajustes quedaran consignados en el protocolo siguiente. 	Protocolante	15
3	Relatoría	<ul style="list-style-type: none"> • Exposición del tema. • Entrega el trabajo escrito. 	Relator	30
4	Correlatoría	<ul style="list-style-type: none"> • Se complementa y evalúa la relatoría. • Se induce a la discusión. 	Correlator	10
5	Discusión	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizan preguntas, intervenciones y aclaraciones sobre el tema. • Se valida el conocimiento demostrado por el relator. 	Todos los participantes	20
6	Conclusión	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de la sesión • Síntesis del trabajo • Redacción del protocolo • Aprobación de la síntesis y el protocolo 	Participantes Director Protocolante	10

Para dar una descripción detallada de los roles asumidos por los participantes durante la ejecución del seminario se presenta a continuación en qué consiste cada una de las actividades desempeñadas por el participante que asume cierto rol.

Relatoría:

La relatoría o relación es el procesamiento a través del cual el RELATOR expone el tema correspondiente en la sesión del seminario. El relator tiene como misión principal enriquecer, como resultado de su investigación y estudio, el saber de los demás, buscando por medio de una argumentación rigurosa, aportar algo nuevo que permita avanzar en el conocimiento sobre el objeto de estudio.

Correlatoría:

Consiste en la complementación y enriquecimiento de la relatoría por parte de un correlator, el cual debe estar muy atento a la exposición del relator, pues no debe repetir lo expuesto, sino evaluar el contenido, la claridad y el manejo de la exposición, con el fin de plantear su reflexión personal, y su posición frente a la relatoría, de una manera crítica, destacando los aportes más relevantes de la relatoría motivando a los participantes al debate.

Discusión

Es el medio a través del cual los participantes con base en lo expuesto en la relatoría y la argumentación del correlator, confrontan sus concepciones y apreciaciones sobre el tema. Esta dinámica se desarrolla a manera de discusión, la cual se caracteriza por ser de carácter positivo, argumentativo y enfocado al enriquecimiento del trabajo en grupo. La discusión requiere participación oportuna y respeto por las opiniones de los demás, criticándolas constructivamente.

Protocolo

El protocolo es la evidencia escrita de cada sesión del seminario y un insumo para la elaboración del informe final. Éste debe ser leído antes de comenzar cada

sesión, ya que es un acta de registro de lo ocurrido en la anterior y de los compromisos planteados. Su autor es el protocolante, el cual plasma en un documento las actividades tal y como fueron desarrolladas, utilizando una redacción clara y concisa.

3.3 ACTA




El acta es un documento escrito donde se hace constar el tema de la sesión, la relación de los roles de los participantes en cada una de éstas y las observaciones y conclusiones. El documento modelo que se llevó durante todas las sesiones se observa en la figura 1. La estructura del acta se relaciona a continuación.

Encabezado: Éste lleva en la fila superior el título del seminario, acompañado del logo representativo del seminario al lado izquierdo y el logo de la Universidad al lado derecho. La segunda fila corresponde al título del tema de la sesión. En las filas siguientes se ponen los roles asumidos por cada participante con su respectiva casilla para verificar su asistencia, lugar, fecha, hora de inicio y hora de finalización. Cada acta tiene su numeración desde la número 1 hasta la número 15 consecuente con las sesiones realizadas.

Observaciones: Espacio en el cual se registra la validación del conocimiento demostrado por el relator y las preguntas, intervenciones y aclaraciones sobre el tema realizadas por los participantes.

Conclusiones: Espacio en el cual se registra la evaluación de la sesión, síntesis del trabajo y aprobación de la síntesis

Figura 1. Acta de Sesión

 SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE FALLAS  		ASISTENCIA
TÍTULO DEL TEMA		
DIRECTOR	CARLOS RAMÓN GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ	
RELATOR		
CORRELATOR		
PROTOCOLANTE		
PARTICIPANTE		
LUGAR		ACTA N°
FECHA		
HORA DE INICIO		
HORA DE FINALIZACIÓN		
OBSERVACIONES		
CONCLUSIONES		
Director: Carlos Ramón González Bohórquez		

4. PRESENTACIONES Y DOCUMENTO

4.1. PRESENTACIONES

Las presentaciones son el documento elaborado en Power Point por el relator de cada sesión como apoyo para socializar el subtema ante los demás participantes. Las presentaciones constituyen el resultado del trabajo investigativo sintetizado del relator, expuesto en un ambiente gráfico y siguiendo ciertos parámetros con el objeto de que la información contenida en ésta sea entendible por el auditorio. Por ésta razón se diseñó un formato guía para las presentaciones de este seminario como se describe a continuación.

4.1.1. Características

Para las exposiciones, las diapositivas le permiten al relator una relación interactiva y dinámica en busca de centrar la atención de las personas a las que va dirigido. Los aspectos fundamentales de esta herramienta son los siguientes:

- Servir como guía al expositor
- Dar orden lógico al tema de presentación
- Ser de interés para el auditorio
- Captar la atención del auditorio
- Facilitar la presentación
- Seguir un esquema lógico en la presentación de ideas

Lo importante de la presentación es la comunicación con el auditorio, ésta se realiza por medio de una interacción verbal y corporal. Para facilitar dicha comunicación se recurre a la exposición de imágenes, graficas, esquemas taxonómicos y cuadros de texto.

En la elaboración del formato se escogió el color blanco con el objeto de captar la atención del auditorio y a su vez se consigue un menor esfuerzo visual ya que las exposiciones tienen una duración aproximada de hora y media. En la figura 2. se muestra el formato diseñado para las presentaciones.

Figura 2. Formato de presentación



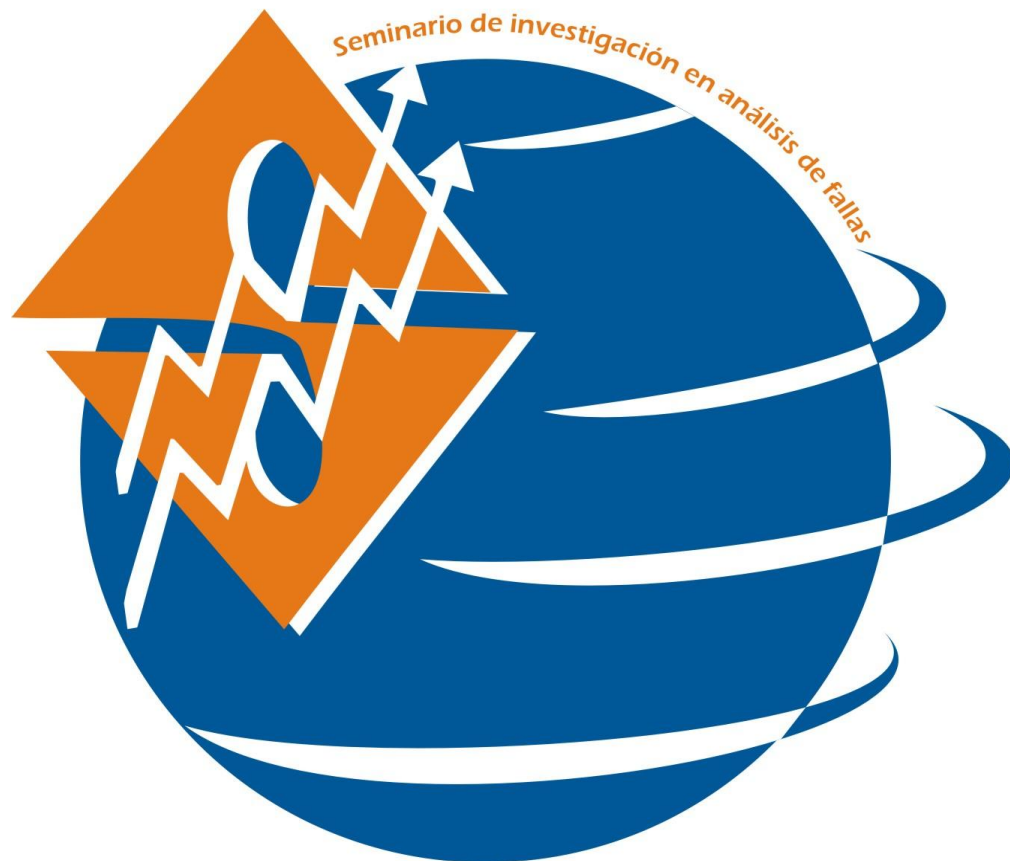
Logo del seminario

El concepto que se trabajó para diseñar el logo del seminario figura 3 fue la ingeniería de mantenimiento en especial el análisis de fallas. El significado de cada componente del logo se describe a continuación:

Sin duda alguna el elemento característico de las técnicas de análisis de fallas son los beneficios económicos que representa en las industrias que lo practican a nivel mundial, motivo por el cual se escoge el símbolo de pesos “\$”, además por ser la letra inicial de la palabra Seminario. Para este conocido símbolo de representación de dinero se le modifica las líneas verticales características por flechas ascendentes escalonadas las cuales representan indicadores de dichos beneficios económicos,

Hoy en día la ingeniería de mantenimiento está presente en las grandes compañías del mundo y sus prácticas se rigen por estándares internacionales que se enmarcan sobre el concepto de mantenimiento de clase mundial, el cual se simboliza con una esfera en el que sus líneas curvas representa la evolución continua y dinámica que tiene actualmente mantenimiento.

Figura 3. Logo del seminario de investigación en análisis de fallas



Características del diseño de diapositiva utilizada como formato general del seminario para las presentaciones en Power Point:

- En las diapositivas están siempre presentes, el logo del seminario en el centro de la diapositiva con una sutil marca de agua, en la parte superior derecha el logo de la Universidad, y en la parte superior izquierda el logo del seminario, esta combinación ofrece un buen referente visual.
- En las diapositivas se utilizan diferentes colores pero siempre se realiza de manera tal que la combinación sea agradable y facilite la exposición.
- La representación gráfica de las ideas facilita la exposición y asimilación del tema expuesto, además de cumplir una función nemotécnica⁸, éstas son fácilmente recordadas por quienes las observan.
- El color y tamaño de las imágenes se seleccionaron de tal forma que combinaran con el color de fondo.
- Al comienzo de cada presentación se coloca el título del tema con su respectiva tabla de contenido.
- El tamaño y el tipo de letra se selecciono de manera tal que facilitara la lectura y comprensión del tema.
- El espacio de trabajo en cada diapositiva está delimitado por una franja horizontal superior y una cinta decorativa en la parte inferior en la cual va registrado el nombre del seminario.

⁸ Procedimiento de asociación mental de ideas, esquemas, ejercicios sistemáticos, repeticiones, etc. Para facilitar el recuerdo de algo.

La totalidad de las diapositivas resultantes de las sesiones realizadas en el transcurso del seminario están recopiladas de forma digital; debido al gran número, y anexadas a este informe.

4.2. DOCUMENTO

La elaboración del documento síntesis se basó en normas para la presentación de trabajos científicos y representa el producto de la labor investigativa y argumentativa de los participantes, el cual se fue perfeccionando por medio de la discusión y la revisión de los temas.

El documento está dividido en quince (15) capítulos y es una recopilación de todos los subtemas expuestos durante las sesiones contenidas en la Tabla 2 siguiendo el mismo orden para tener continuidad y conexión entre ellos.

En el desarrollo del documento se realizó una evaluación de las metodologías de análisis de falla estudiadas por medio de ejemplos ya aplicados en algunos casos específicos de la industria, según características de diseño y funcionamiento de la planta y/o equipo, mediante el análisis y las discusiones llevadas a cabo en el desarrollo de las relatorías. Con el objeto de ofrecer un manual donde se encuentre registrado las metodologías de análisis de fallas paso a paso para un problema específico, logrando de esta manera un fácil entendimiento para cada metodología de análisis de fallas.

El documento se elaboró en Microsoft office Word 2007 el cual presenta un formato nativo muy utilizado, este formato se ha convertido en estándar de facto⁹ con el que pueden transferirse textos con formato o sin formato, o imágenes, siendo preferido por muchos usuarios antes que otras opciones, es por esto que

⁹ Norma generalmente aceptada y ampliamente utilizada por iniciativa propia de un gran número de interesados.

se decide realizar el documento en este formato de texto. Para la parte de diagramas, graficas y esquemas taxonómicos se utilizó herramientas como Microsoft office Excel 2007 la cual es eficaz, se puede usar para crear y aplicar formato a hojas de cálculo, analizar y compartir información para tomar decisiones mejor instituidas. La interfaz de usuario de Microsoft Office Fluent, la visualización de datos enriquecida y las vistas de tabla dinámica permiten crear, de un modo más sencillo, gráficos de aspecto profesional y fácil uso, ofrece efectos visuales con sólo hacer unos clics, utilizando diseños y estilos de gráficos predefinidos o aplicando el formato manualmente a cada componente (ejes, títulos y otras etiquetas de gráficos). Puede utilizar efectos sorprendentes como el estilo 3D, el sombreado suave y el suavizado para identificar las tendencias claves y crear resúmenes gráficos más atractivos, crear e interactuar con los diagramas independientemente de la aplicación que utilice, ya que el motor de gráficos de Excel es compatible con Microsoft Office Word 2007 y Microsoft Office PowerPoint 2007.

Una herramienta que se utilizó en gran medida fue Microsoft Visio el cual es un software de dibujo vectorial, los instrumentos que lo componen permiten realizar diagramas de oficinas, diagramas de bases de datos¹⁰, diagramas de flujo de programas y UML¹¹.

Para el cálculo de vida de los equipos y su probabilidad de falla se utilizó la Software de Análisis de Datos de Vida.

Para el análisis de diagramas de dispersión se utilizó la herramienta STATGRAPHICS 5 plus. el cual es un paquete de *software* para ordenadores

¹⁰ Conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso

¹¹ Lenguaje Unificado de Modelado. Es un lenguaje gráfico para visualizar, especificar, construir y documentar un sistema

personales que integra una gran variedad de análisis estadísticos y gráficos de alta resolución.

CONCLUSIONES

- La modalidad de seminario de investigación es una excelente herramienta que incorpora en los estudiantes estrategias de estudio propias de un investigador, promoviendo la capacidad de observar, discutir, argumentar y proponer soluciones a un problema determinado, potencializando la investigación y producción científica en aras del desarrollo tecnológico de una país en vía de desarrollo como Colombia.
- Para la aplicación de las diferentes metodologías de análisis de falla se requiere de una capacitación del recurso humano, entendida ésta como la formación integral y el fortalecimiento de las competencias directivas, profesionales y técnicas, para garantizar la consecución de los objetivos de cada metodología.
- La aplicación de las metodologías de análisis de falla facilita la toma de decisiones acertadas en la estrategia de mantenimiento, optimizando la utilización de los recursos fundamentales de la empresa.
- Se estudiaron los fundamentos para realizar un estudio de criticidad de equipos en instalaciones industriales y se presentaron tres modelos diferentes para jerarquizar los equipos en base a su nivel de criticidad.
- Se elaboró un libro que recopila la información necesaria para la aplicación de las metodologías para análisis de falla estudiadas (FMECA, RCA, P-M, ¿POR QUÉ? ¿POR QUÉ?, CAUSA-EFECTO, ORDINOGRAMA, PLANILLA DE INSPECCIÓN, ANÁLISIS DE PARETO, HISTOGRAMA, DIAGRAMA DE DISPERSIÓN Y GRÁFICOS DE CONTROL) especificando cuándo y cómo

utilizar cada una de éstas, dependiendo del contexto operacional en el que operan los equipos.

- El análisis de riesgo, los estudios de criticidad de equipos y los análisis de fallas, son tres temas relacionados entre sí, y muy importantes en la ingeniería de mantenimiento. Estos temas tienen más o menos incorporados componentes cuantitativos y/o cualitativos de ahí que no resulte procedente hacer una taxonomía afortunada, discriminatoria entre métodos cualitativos y cuantitativos aplicados al mantenimiento.
- Los métodos cuantitativos para el análisis de falla requieren de un sistema de información de mantenimiento que garantice la calidad de los datos. La norma ISO 14224 constituye la base para la implementación de dicho sistema de información.
- La baja frecuencia de ocurrencia que puede presentar un determinado modo de falla en un equipo específico redundante en insuficiente cantidad de datos disponibles para una adecuada aplicación de la estadística en los métodos cuantitativos para el análisis de falla, lo cual constituye una limitante para la utilización de estos métodos.
- Las observaciones y conclusiones correspondientes a cada metodología estudiada se encuentran detalladas en las actas respectivas a cada una de las relatorías realizadas durante el desarrollo del seminario.

BIBLIOGRAFÍA

AMENDOLA, Luis José. Gestión de proyectos de activos industriales. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2006.

ARAUJO, F., Yonke C., STRAWN T., Koehler K. Developing and Implementing a Failure Analysis Process to Optimize Well-Servicing Operations. SPE Production & Facilities, 1997.

BANKS, Jerry. Control de calidad Limusa. México. 1998.

CANAVOS, George C. Probabilidad y Estadística, aplicaciones y métodos MCGraw Hill. Virginia Commonwealth University. 2008.

CASAL, Joaquim, MONTIEL, Helena, PLANAS, Eulalia, VÍLCHEZ, Juan A. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. UPC. España. 1999.

GATICA IRRIBARRA, Patricio Humberto Análisis de fallas de la compactadora-atadora de rollos de alambón y la mesa de caballetes. Tesis de grado Universidad Técnica Federico Santa María Sede Concepción Rey Baduino de Bélgica. Chile. 2007.

GONZÁLEZ QUIJANO, Javier. Mejora en la confiabilidad operacional de las plantas de generación de energía eléctrica: desarrollo de una metodología de gestión de mantenimiento basada en el riesgo (RBM). Tesis de Máster en gestión técnica y económica en el sector eléctrico. Universidad Pontificia Comillas. España 2004.

ISHIKAWA, Kaoru. ¿Qué es control total de calidad? la modalidad japonesa. Ed. XI Norma. Colombia. 1998.

MONTAÑA RIVEROS, Leonardo. ROSAS NIÑO Elkin Gustavo; Diseño de un sistema de mantenimiento con base en análisis de criticidad y análisis de modos y efectos de falla en la planta de coque de fabricación primaria en la empresa Acerías Paz del Río S.A. Tesis de grado Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Facultad Seccional Duitama. 2006.

MORA GUTIÉRREZ, Alberto. Mantenimiento Estratégico Para Empresas Industriales o de Servicios. AMG, Colombia. 2007.

MOUBRAY Jhon. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM II. Aladon Ltda. Edición en español 2004.

OLAVE PÁEZ, Javier Ricardo - BURGOS SUAREZ, Libardo - SÁENZ GARCÍA, Rodolfo. Herramientas para el análisis de criticidad de equipos y sus fallas. Tesis Especialización en gerencia de mantenimiento. Universidad Industrial de Santander. Colombia. 2003.

QUEVEDO URIAS, Héctor Adolfo. Métodos estadísticos para la ingeniería ambiental y la ciencia. Universidad Autónoma de ciudad Juárez. México. 2006.

REDONDO EXPÓSITO, Juan Carlos Un modelo matemático óptimo de mantenimiento y fiabilidad aplicado a la aviación comercial. Tesis Doctoral Universidad Nacional de Educación a Distancia España 2007.

ANEXOS

METODOLOGÍAS EN ANÁLISIS DE FALLA

ANEXO A

A. ANÁLISIS SOBRE DIVERSOS MÉTODOS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

Los análisis cualitativos y cuantitativos son un conjunto de procedimientos para extraer de los datos de una investigación la mayoría y mejor información posible para realizar la más completa y fiel interpretación de su significado.

Los datos que se recogen en los análisis de falla cualitativos y cuantitativos son aquellos que se refieran a los fenómenos estudiados o que se piensa estudiar. Ante un determinado problema o cuestión, se plantean hipótesis, se observa, se toman datos, se registran, se ordenan y se someten a un análisis. En análisis de falla un dato es la representación simbólica (numérica, alfabética, alfanumérica) de una falla bajo una forma conveniente para ser usado como base para hacer inferencias y tomar decisiones. En la tabla 4. Se muestra que representa un dato para el análisis de falla¹².

Tabla 4. Dato en análisis de falla

RESPECTO A LA CLASE DE EQUIPO	RESPECTO AL EQUIPO	RESPECTO AL TIEMPO DE APARICIÓN DE LA FALLA	DE LA FALLA
Sistema, Sub-sistema, componente o ítem mantenible, componente de detalle.	Las funciones del equipo	Tasas de Falla y periodos de ocurrencia.	Modos, Causas y Efectos.

¹² Norma ISO 14224: Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. 2004

Los métodos son las herramientas de los investigadores. Son los medios para acercarse, o entender, lo que está ocurriendo. Si el investigador sólo conoce un método, únicamente dispone de una forma de resolver el problema o de acercarse a la realidad. En esta investigación se van a utilizar métodos de análisis de falla cualitativos y cuantitativos para estudiar los modos, causas y efectos de falla como herramientas para la gestión de mantenimiento. Se tratará de guiar al analista de fallas cual debe seguir según sus necesidades.

Los métodos inductivos están generalmente asociados con la investigación cualitativa mientras que el método deductivo está asociado frecuentemente con la investigación cuantitativa. Los análisis cualitativo y cuantitativo en mantenimiento pretenden extraer de los datos la máxima información y significado. Su objetivo final es conocer lo que hay y sucede; explicar y comprender por qué hay lo que hay y por qué sucede lo que sucede.

Todo análisis incluye siempre componentes cualitativos, porque cualesquiera que sean las técnicas que se apliquen a los datos, estos tienen que ser finalmente interpretados y comprendidos conceptualmente y expresados en palabras.

La diferencia fundamental entre la metodología cualitativa y cuantitativa es que en la metodología cualitativa se hacen registros narrativos de los fenómenos que son estudiados mediante la observación participante y las entrevistas no estructuradas¹³ en contextos estructurales y situacionales¹⁴. La metodología cualitativa trata de identificar los factores característicos de los fenómenos, su sistema de relación y su estructura dinámica. La metodología cuantitativa estudia la relación entre variables cuantificadas, su fuerza de asociación o correlación, la generalización y objetivación de los resultados a través de una muestra para hacer

¹³ ABDELLAH, Levine E. Preparing Nursing Research for the 21 st Century. Evolution. Methodologies, Chalgés. Springer: New York; 1994.

¹⁴ STRAUSS, AI. Qualitative analysis for social scientific. New York: Cambridge university press, 1987.

inferencia a una población¹⁵ de la cual toda muestra procede. Tras el estudio de la asociación o correlación pretende, a su vez, hacer inferencia causal que explique por qué las cosas suceden o no de una forma determinada.

En general los métodos cuantitativos son muy potentes en términos de validez externa¹⁶ ya que con una muestra representativa de la población o fenómenos que ocurren en un proceso, hacen inferencia a dicha población o fenómenos a partir de una muestra con una seguridad y precisión definida, a diferencia de esto una limitación de los métodos cualitativos es su dificultad para validar los resultados. La investigación cuantitativa con los test de hipótesis no sólo permite eliminar el papel del azar para descartar o rechazar una hipótesis, sino que permite cuantificar la relevancia de un fenómeno midiendo la reducción relativa del riesgo, la reducción absoluta del riesgo y el número necesario de acciones a tomar para evitar una falla. Las diferencias más ostensibles entre ambas metodologías¹⁷ se muestran en la tabla 5.

El empleo de ambos procedimientos cuantitativos y cualitativos en un análisis de fallas probablemente podría ayudar a corregir los sesgos propios de cada método, para el mantenimiento se emplea por igual cada método, sin olvidar que aunque sea cuantitativo los resultados se expresan de una forma cualitativa (expresados con palabras). El método cualitativo se puede emplear tanto de una forma rápida y con una inversión baja y dar resultados satisfactorios, como de un estudio completo con altas inversiones y resultados altamente aceptables, por su parte el

¹⁵ Población: En estadística, se identifica el término población al de variable aleatoria, o magnitud numérica de naturaleza aleatoria, X , asociada a los objetos (equipos o características de un proceso) sobre los que se desarrolla una experiencia.

¹⁶ Validez externa: Grado con que pueden generalizarse los resultados de un experimento. La validez externa se refiere a la extensión y forma en que los resultados de un experimento pueden ser generalizados a diferentes muestras, poblaciones, experimentos, etc.

¹⁷ COOK T D RICHARDT, Charles. Qualitative and quantitative methods in evaluation research. Morata, 2002.

método cuantitativo siempre tiene el inconveniente de la recogida de datos y la calidad de estos (por lo general se desarrollan software particulares para cada empresa los cuales en una de sus funciones es recoger datos de los procesos), por esta razón implementar esta metodología su inversión siempre es elevada, pero con un buen análisis se obtienen resultados satisfactorios.

Si ocurre una falla en un equipo crítico el departamento de mantenimiento puede optar por realizar un análisis cualitativo o cuantitativo, esto de las características de cada empresa, equipo y modo de falla.

Tabla 5. Diferencias entre metodología cualitativa y cuantitativa

Metodología Cualitativa	Metodología Cuantitativa
La obtención de los resultados está determinada por los eventos que ocurren durante la recopilación de la información.	La obtención de los resultados está determinada por la seguridad matemática que pueda proveer. Todo resultado obtenido es contrastado contra hipótesis.
Observación de los fenómenos en su estado natural.	Se limita a la información cuantificable y medible.
Subjetiva.	Objetiva.
Inferencias de sus datos.	Inferencias más allá de los datos.
Exploratoria, inductiva y descriptiva.	Confirmatoria, inferencial, deductiva.
Orientada al proceso.	Orientado al resultado.
Datos “cualidades”.	Datos “números”.
Estudio de casos particulares.	Generalizable.
Holística.	Particularista.
Realidad dinámica.	Realidad estática.

A.1 LA OBTENCIÓN DE DATOS.

Para analizar los datos hay que recogerlos. Para recogerlos hay que saber para qué se recogen. La fase más importante de toda investigación consiste en formular con la máxima claridad el problema que se intenta resolver, esto para no perder esfuerzos resolviendo fallas que no tienen alto impacto en algún proceso o analizar equipos que no son críticos para nuestra empresa. Podemos partir de dos escenarios al comenzar el análisis sea cualitativo o cuantitativo, el análisis exploratorio, en el cual partimos sin conocimientos previos sobre la situación, empezamos desde cero y comenzamos a recolectar datos para después plantear una hipótesis sobre la situación que se está presentando, o bien, partiendo de una hipótesis planteada con argumentos valederos (experiencia del analista, datos históricos de las fallas, procesos y equipos) definiendo con rigor las hipótesis que se pretenden comprobar: es el inicio del análisis confirmatorio.

En función de esas hipótesis se determina que datos recoger y bajo qué circunstancias, siempre atentos a corregir, eliminar o mitigar predisposiciones subjetivas y las fuentes objetivas de error. Se debe tener una mente abierta dispuesta a recibir ideas o aportes que puedan contribuir con el análisis en cuestión. Asimismo hay que elaborar un listado de posibles contenidos que puedan encontrarse; prever las categorías a las que, al menos provisionalmente, hay que atender y en las que pueden clasificarse las observaciones; determinar en fin, la muestra de unidades que se van a observar, como localizarla y con qué medios conviene hacerlo. Siempre abiertos a ampliar, restringir y, en general, modificar, todos estos aspectos, si la observación sistemática y progresiva lo aconseja.

Con la preparación y precauciones dichas, todos los métodos cualitativos exigen primero la observación¹⁸. Segundo, su registro en forma de cuaderno de campo: redacción escrita, dictada o grabada, de modo que sea posteriormente comprensible para el investigador y los demás. El cuaderno de campo puede estar complementado por grabaciones audiovisuales, reportes de los equipos que fallaron, condiciones en que se encontraban los equipos al momento de la falla, etc. Todo lo que en estos cuadernos de campo no corresponda a lo directamente observado debe hacerse constar como anexo. El cuaderno de campo ha de reflejar fielmente la observación. Varias técnicas permiten evaluar esta fidelidad: repetición de la observación, consenso de varios observadores, diversos coeficientes de acuerdo y fiabilidad.

Para los métodos cuantitativos los datos que necesitamos obtener son números que por lo general resultan de mediciones de características o propiedades de los procesos o productos, cantidades y calidad de tareas o productos fabricados, tiempos de operación, tiempos de mantenimiento, tiempo entre fallas. La cantidad de datos recogida influye en el resultado ya que se puede realizar una mejor interpretación de la realidad con mayor cantidad de muestras, otro aspecto importante es la calidad de estos, ya que datos errados o fuera de los límites condicionan el análisis que debemos realizar.

En la obtención de datos e información se debe seguir un estándar internacional para la validación y recolección de los mismos, como del método utilizado para el análisis de falla. La norma ISO 14224 brinda una base para la recolección de datos e información con el objetivo de llevar a cabo un análisis de falla independiente de si el análisis es cualitativo o cuantitativo para el estudio de Confiabilidad y Mantenimiento. Esta norma presenta los lineamientos para la especificación, recolección y aseguramiento de la calidad de los datos e

¹⁸ Observar dice el diccionario de la Real Academia, es “examinar atentamente” o, con más pormenor, “mirar o advertir con atención alguna cosa, notándola y haciendo sobre ella reflexión”.

información que permitan Cuantificar la cantidad de esfuerzo requerido para conservar las funciones normales de los sistemas y equipos de una organización y compararlos con los de otros de características similares.

Los principales objetivos de esta norma internacional son:

- Especificar los datos que serán recolectados para el análisis de:
 - Diseño y configuración del sistema.
 - Seguridad. Confiabilidad y Disponibilidad de los Sistemas y plantas.
 - Costo del Ciclo de Vida.
 - Planeamiento, optimización y ejecución del Mantenimiento.

- Especificar datos en un formato normalizado a fin de:
 - Permitir el intercambio de datos entre plantas.
 - Asegurar que los datos sean de calidad suficiente, para el análisis que se pretende realizar.

La norma ISO 14224 está orientada al registro de fallas, además se aplica para definir los límites y jerarquía de los equipos de Operación, como también la calificación de la jerarquía de las Fallas.

A.2 ANÁLISIS CUALITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

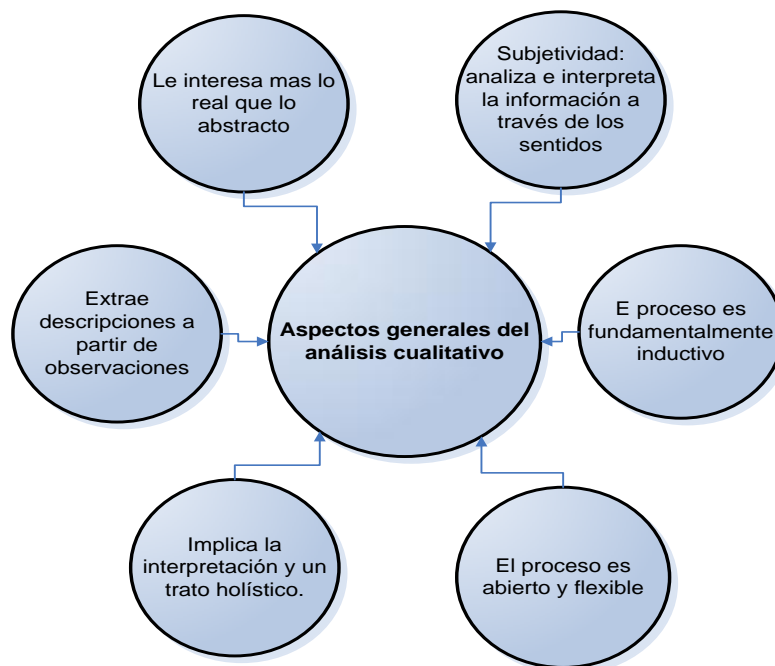
El análisis cualitativo trata de identificar la naturaleza de los equipos y de sus fallas, su estructura dinámica, aquella que da razón de su comportamiento y manifestaciones desde una perspectiva holística. De esta manera el análisis cualitativo expresa, ordena, describe, analiza e interpreta la información, observaciones y hechos mediante conceptos, razonamientos y palabras, estos generalmente se basan en la opinión y juicio de expertos, o de quien esté llevando a cabo el análisis. Se determinan situaciones, nivel de consecuencia, complejidad

y riesgo de las mismas y se asignan escalas de gravedad dependiendo de lo que se considere. Los análisis cualitativos se basan en métodos comparativos o generalizados para llegar a un resultado, los resultados de este tipo de análisis se obtienen en forma de palabras que indican la severidad, gravedad, consecuencia o nivel de complejidad de las situaciones u/o observaciones hechas.

A.2.1 Naturaleza de los procedimientos del análisis cualitativo

El análisis cualitativo desarrolla sus procedimientos atendiendo a los siguientes aspectos los cuales se muestran de una manera general en la figura 4 y se explicarán brevemente a continuación:

Figura 4. Naturaleza de los procedimientos de análisis cualitativo.



- a. Extrae descripciones a partir de observaciones que adoptan la forma de entrevistas, narraciones, cuadernos de campo, grabaciones, transcripciones de audio y vídeo cassettes, registros escritos de todo tipo, fotografías o películas.

Produce información descriptiva, a partir de los fenómenos observables y/o de las propias palabras del personal, habladas o escritas.

- b. Le interesa más lo real, lo global y concreto, más que lo disgregado y cuantificado, es decir se interesa por lo que realmente está ocurriendo o ha ocurrido.
- c. El proceso es fundamentalmente inductivo, en el sentido de que va de la información a la teorización para poder implantar soluciones reales, por medio de la observación, categorización y el análisis de falla empleando la lógica sistemática.
- d. Subjetividad: debido a que en este tipo de análisis se elabora e interpreta la información a partir de los sentidos. La elaboración e interpretación de la información está influida por el nivel de experiencia, preparación, además de los intereses y deseos de quienes realicen el análisis.
- e. El proceso es abierto y flexible, porque escucha aportes de otros expertos o personal involucrado en el análisis. Se mueve en la incertidumbre porque se plantean causas posibles del fenómeno a estudiar, las cuales después de un proceso de verificación pueden ser descartadas o aceptadas. En el análisis de fallas debemos procurar que se realice buscando siempre la causa que origino la falla.
- f. Implica la interpretación como método prevaeciente y el trato holístico de los fenómenos.

A.2.2. Validez de los métodos cualitativos

La Validez es el grado con que pueden generalizarse los resultados de un experimento. Generalmente la validación de los resultados de los análisis cualitativos depende de:

- a. Del grado de acercamiento existente entre la metodología y la realidad, así como del éxito y calidad de las técnicas empleadas.

- b. De la recolección de datos¹⁹, aquí es primordial: el tiempo de permanencia y la capacitación del personal encargado del análisis en el campo.
- c. Del grado de vinculación del grupo que realiza el análisis con los sistemas y/o equipos en estudio, que posibilitaría la recolección de información fiable.
- d. De la aplicación de normas estandarizadas para la realización del análisis.
- e. Del nivel de dialogo entre el grupo que realiza el análisis para estudiar los datos con el fin de socializar y tratar los significados y constituir conceptos y realidades comunes.
- f. Que en la presentación de los resultados se incluya una exposición lo más transparente posible del proceso de análisis, de modo que quede claro de donde surgen las respuestas del análisis.

A.2.3 ¿Cuándo se emplean los métodos de análisis cualitativos?

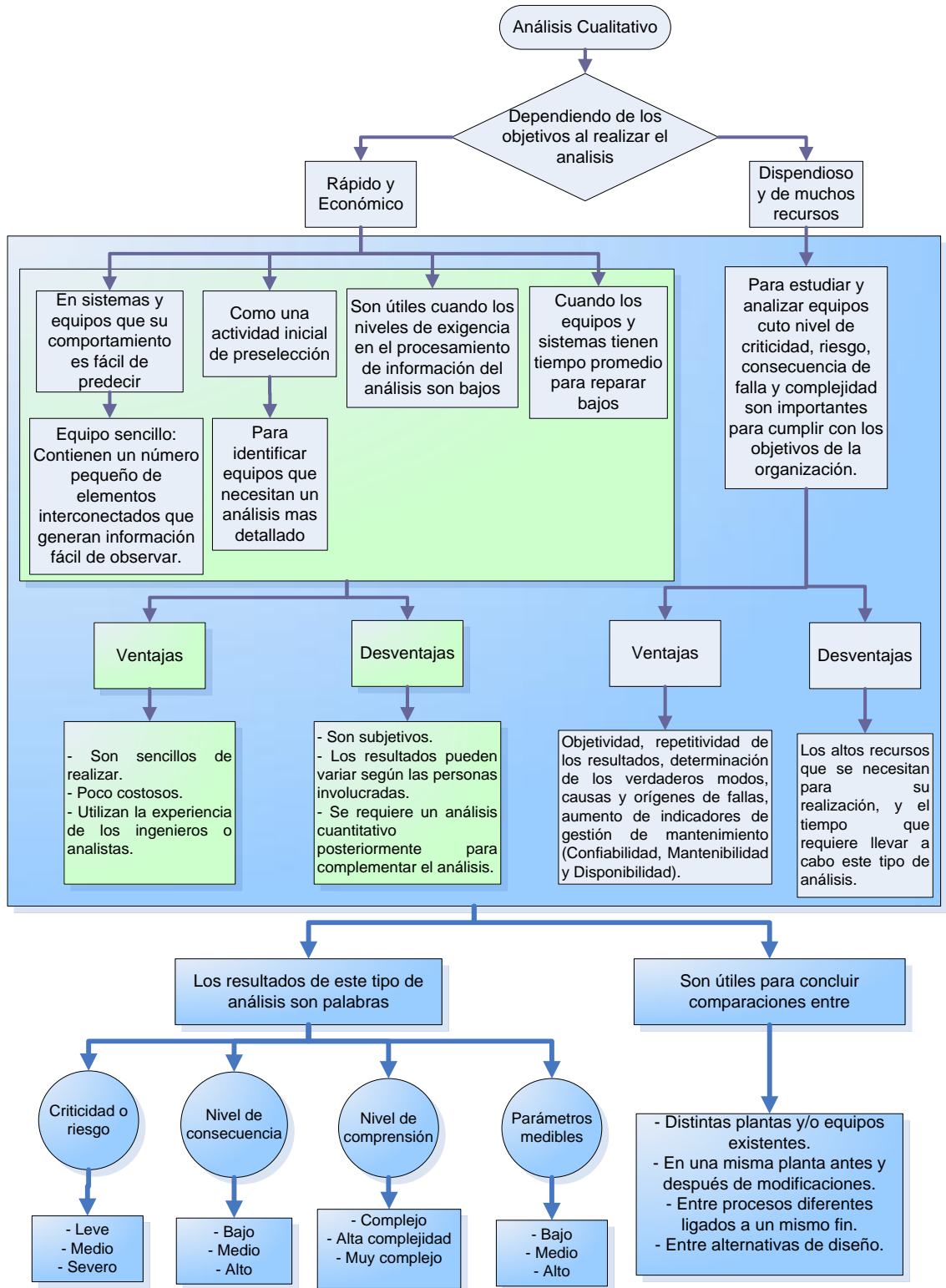
El análisis cualitativo se puede aplicar en plantas, sistemas, procesos y equipos para clasificar los riesgos existentes, sus consecuencias y probabilidad de ocurrencia con el tiempo, clasificar los procesos y equipos según su nivel de criticidad ver figura 5, en la búsqueda de la causa raíz²⁰ de fallas en equipos críticos, para eliminar o mitigar fallas. Este análisis se puede realizar tanto de una forma rápida y económica, como de una forma dispendiosa y que necesite muchos recursos, esto depende de los objetivos planteados al iniciar el análisis.

PARA TENER EN CUENTA: Los equipos de complejidad alta siempre tienen niveles de criticidad y riesgo alto ya que cuando aumenta la complejidad inherentemente se aumenta el nivel de riesgo y criticidad de los equipos lo que hace que a estos tipos de equipos se les dirija más tiempo y esfuerzo en su análisis.

¹⁹ Norma ISO 14224: Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. 2004

²⁰ Causa raíz: es el origen del cual procede el efecto o problema visible. (ver Anexo E)

Figura 5. Análisis cualitativo.



A.3 OBJETIVOS DEL ANÁLISIS CUALITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

Los principales objetivos para utilizar los métodos cualitativos en el análisis de fallas son:

- Identificar Riesgos
- Identificar equipos críticos
- Identificar la relación causa-efecto.

A.3.1 Identificar riesgos

La identificación de un riesgo mediante el análisis cualitativo consiste en hallar o determinar los factores que pueden degradar, demorar, impedir o interrumpir la realización de las actividades operacionales²¹. De esta identificación debe salir una lista en donde se muestre los factores causantes de riesgo.

A.3.2 Identificar equipos críticos

La identificación de equipos críticos mediante análisis cualitativo consiste en hallar y analizar los factores que ocasionan criticidad en los equipos, por ejemplo complejidad del equipo, importancia en el proceso productivo, impacto en la seguridad, impacto en el medioambiente, impacto en los costos operacionales de la organización.

Una vez realizado el estudio de criticidad²² se procederá a realizar un listado de los equipos clasificándolos de acuerdo a su criticidad. Este objetivo es de vital importancia ya que a los equipos de mayor criticidad se les debe prestar mayor atención en cuanto a las tareas de mantenimiento.

²¹ El concepto de riesgo puede estudiarse en el anexo B.

²² El concepto de criticidad se estudia en el anexo C.

A.3.3 Identificar relaciones causas-efecto

La Identificación de las relaciones causa-efecto mediante el análisis cualitativo consiste en hallar los factores que determinan la dependencia entre la ocurrencia de un fenómeno y otro siendo el primero la causa y el segundo el efecto, según el principio de determinismo causal²³.

El efecto en una falla es lo que se observa o se conoce, el efecto se puede apreciar por los sentidos (ruido, vibración, calentamiento, malos olores, grietas, rugosidades, etc.), o con aparatos de medición sofisticados, esto va ligado con el nivel estratégico de mantenimiento de cada empresa. El fenómeno producido por un efecto es la pérdida potencial de un equipo para realizar correctamente sus funciones (falla). Por ejemplo, la bomba no da la presión requerida por el sistema, el motor no arranca, la velocidad de rotación de la turbina no es la adecuada, etc. La causa es lo que origina el efecto. El objetivo de identificar relaciones causa-efecto es hallar la causa raíz de un modo de falla, mediante la exploración de una cadena causa efecto, donde conocida la causa de un efecto, ésta en un siguiente nivel de exploración se convierte ahora en efecto al cual se le busca su causa y así sucesivamente hasta hallar la causa raíz, cuya fuente puede estar en:

- Deficiencias de diseño
- Defectos en la estructura interna del material.
- Deficiencias en la Operación de equipos
- Errores de instalación y montaje
- Condiciones medioambientales desfavorables
- Problemas de manufactura
- Condiciones de operación de equipos fuera de especificación
- Mantenimiento inadecuado

²³ Ver análisis causa efecto anexo H.

Algunas causas no son mutuamente excluyentes si no factibles y para determinar corregir o controlar la causa dominante debe realizarse, por ejemplo, un diseño de experimentos para determinar que causa tiene la mayor influencia y cuál puede ser más fácilmente controlada.

A.4 DEL ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

El análisis de riesgo, los estudios de criticidad de equipos y los análisis de fallas, son tres temas relacionados entre sí, y muy importantes en la ingeniería de mantenimiento. Estos temas tienen más o menos incorporados componentes cuantitativos y/o cualitativos de ahí que no resulte procedente hacer una taxonomía afortunada, discriminatoria entre métodos cualitativos y cuantitativos aplicados al mantenimiento.

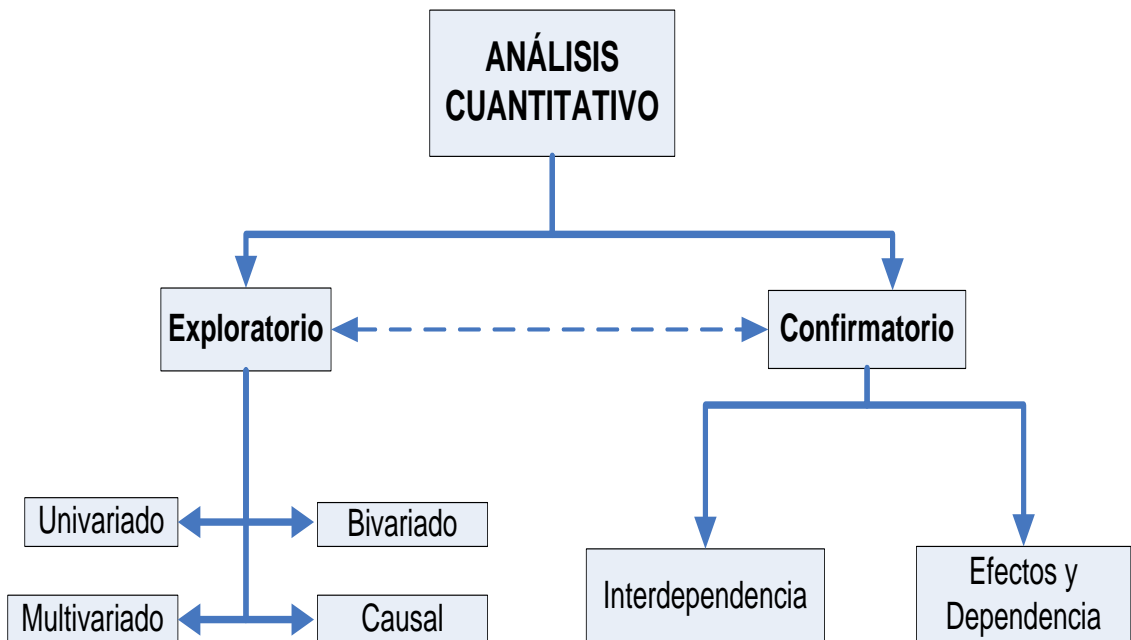
A.5 ANÁLISIS CUANTITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

El análisis cuantitativo se basa en el análisis de las estadísticas e indicadores asociadas al proceso evaluado, siendo usual el empleo de gráficas y tablas para la presentación y facilidad del análisis de las cifras. Emplea valores numéricos, en lugar de las escalas descriptivas empleadas en los análisis cualitativos. Para el cálculo de las consecuencias como para la probabilidad se emplean datos de una variedad de distintas fuentes. Este análisis se puede aplicar para el estudio de las fallas de equipos críticos o para determinar indicadores de gestión para evaluar los procesos de la planta, la eficiencia y eficacia de los programas de mantenimiento. El análisis cuantitativo trata de determinar la fuerza de asociación o correlación entre variables, la generalización y objetivación de los resultados a través de una muestra para hacer inferencia a una población de la cual toda muestra procede. Para esta clase de análisis lo importante es la interpretación de los datos, ya que por medio de la estadística podemos analizar distintas situaciones que pueden

sucedir o proyectar hacia el futuro, es decir sacar la tendencia de una propiedad o una característica, un ejemplo sería medir el diámetro de una varilla, compararlo con los valores permitidos (estándar y la tolerancia \pm) y según esta medida decidir si la máquina necesita mantenimiento o no o determinar el tiempo de funcionamiento antes de intervenir la máquina, en un cuarto frío podemos medir la temperatura en función del tiempo y analizar en que hora, día o mes la temperatura se incrementa y de acuerdo a esto tomar una decisión.

El análisis cuantitativo puede ser exploratorio o confirmatorio. Los análisis exploratorios van siempre dirigidos por algunas ideas o expectativas, no se tiene conocimiento cierto sobre la falla o el estudio (riesgo, criticidad) a analizar, se aplica partiendo desde cero, recolectando los datos y planteando una hipótesis. Los confirmatorios deben estar siempre abiertos a estudiar los datos no solo para confirmar o rechazar una hipótesis, sino también para enriquecer las ideas previas. En la figura 6. Se muestran los tipos de análisis cuantitativos.

Figura 6. Tipos de análisis Cuantitativos



A.6 EL ANÁLISIS CUANTITATIVO EXPLORATORIO

El análisis exploratorio consiste en describir variables y expresar sus relaciones mediante valores numéricos que permiten estimar parámetros, descubrir asociaciones entre variables y pronosticar una variable a partir de otra u otras (inferir).

Se puede realizar el análisis dependiendo de los datos recogidos y de las variables involucradas, entre estos análisis tenemos: Las técnicas univariadas se aplican a la descripción de una variable mediante valores estadísticos que resumen las características más importantes de su distribución, principalmente, su localización, es decir, el valor en torno al cual se distribuyen los datos (promedios como la media, la mediana o la moda), su dispersión (medida por la varianza y las distancias entre puntos diversos, como entre los valores máximo y mínimo), y su forma (asimetrías, normalidad y distribuciones multimodales). Permite la estimación de parámetros de variables en la población a partir de los datos de la muestra, bien sea de forma puntual, indicando el valor del parámetro, bien sea calculando intervalos confidenciales en los que se afirma que está el parámetro, con un determinado grado de probabilidad, el cual es una característica medible en la operación técnica de equipos (velocidad, presión, temperatura, flujo, niveles de ruido, niveles de vibración, dimensiones, niveles de corrosión).

Cuando lo que importa es averiguar las relaciones entre dos o más variables se aplican las técnicas bivariadas y multivariadas. Con ellas se puede estudiar la interdependencia o asociación entre las variables, mediante distintos coeficientes de correlación, o la cuantía en que los valores de una de ellas, se pueden pronosticar a partir de los valores de otra u otras, mediante las técnicas de regresión.

El análisis exploratorio causal, además de las relaciones multivariadas que se presenten, pueden interesar las relaciones parciales, como las que existen entre dos variables cuando se controlan o se mantienen constantes los influjos de otra u otras, es lo que exige la investigación cuando se pretende hacer inferencias sobre relaciones causales.

A.7 EL ANÁLISIS CUANTITATIVO CONFIRMATORIO

El análisis confirmatorio consiste en poner a prueba una hipótesis. Las técnicas son numerosas y están expuestas y programadas para su uso en el computador. Todas ellas se emplean, bien para expresar interdependencias entre variables, bien para averiguar dependencias previstas entre ellas. En el análisis de interdependencia entre dos variables, se aplican las técnicas que permiten poner a prueba la significación estadística de coeficientes de correlación y de regresión.

En el análisis de efectos y dependencias, el caso de dos o más variables, una o más independientes y una dependiente, si se puede suponer la normalidad, se utilizan las técnicas de análisis de varianza y análisis de covarianza. Cuando se estudian las dependencias entre más de dos variables, se recurre a las técnicas multivariadas. Si sólo hay una variable dependiente, se puede utilizar la regresión múltiple, si hay varias variables dependientes, se utilizará el análisis de varianza multivariado.

En todos estos casos conviene, como queda dicho examinar previamente las distribuciones de las variables y la forma de sus relaciones mediante un análisis exploratorio que aclare cuál es la técnica más pertinente para poner a prueba la hipótesis o, incluso, para reescalar las variables, suavizar las líneas de sus dependencias para un mejor manejo de la información que pudiera contener. Las técnicas a utilizar, en este seminario, son una combinación de las dos clases de análisis confirmatorio y exploratorio los cuales son: plantilla de inspección,

gráfico de control, histograma, diagrama de dispersión y diagrama de Pareto, cada uno de estos métodos será analizado con más detalle en los capítulos siguientes.

A.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANÁLISIS CUANTITATIVOS

- a. Tratan de determinar la fuerza de asociación o correlación entre variables, la generalización y objetivación de los resultados a través de una muestra para hacer inferencia a una población de la cual toda muestra procede. Tras el estudio de la asociación o correlación pretende, a su vez, hacer inferencia causal que explique por qué las cosas suceden o no de una forma determinada.
- b. Su fundamento está en encontrar la probabilidad de que ocurra un evento y pronosticar que puede suceder en el futuro para tomar decisiones en el presente.
- c. Son potentes en términos de validez externa ya que con una muestra representativa de la población hacen inferencia a dicha población a partir de una muestra con una seguridad y precisión definida.
- d. Son cada vez más sofisticados e informatizados, engloban la recopilación de gran volumen de datos estadísticos descriptivos y la utilización de técnicas de muestreo, modelos matemáticos avanzados y simulaciones informáticas de procesos industriales, tareas de mantenimiento, análisis de fallas.
- e. Se pueden determinar intervalos de confianza hasta de un 99% para los datos obtenidos por medio del análisis estadístico (varianza) lo cual nos daría una excelente confianza de los datos utilizados para el análisis.

A.9 OBJETIVO DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO EN LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

Los principales objetivos del análisis cuantitativo en la ingeniería de mantenimiento son expresar en términos probabilísticos:

- Índices de riesgo
- Índices de criticidad de equipos
- La ocurrencia de un modo de falla.
- La tendencia de un parámetro en la operación de equipos.

A.9.1 Expresar en términos probabilísticos índices de riesgo.

Expresar en términos probabilísticos índices de riesgo consiste en evaluar el proceso o equipo y determinar aquellos factores de riesgo que pueden degradar, demorar, impedir o interrumpir la función operacional del proceso o equipo. Para esto se debe poseer información estadística de accidentes, anomalías, eventos, sucesos o siniestros ocurridos por causa de cada factor de riesgo en el proceso, en las instalaciones o en el entorno es decir se debe contar con un registro histórico que sea aplicable para analizar el comportamiento o la posible tendencia, aunque también se puede realizar sin conocer estos datos haciendo una lista de posibles factores de riesgos presentes en los procesos y/o equipos, evaluando la probabilidad de que ocurran y el efecto de la ocurrencia del evento.

A.9.2 Expresar en términos probabilísticos Índices de criticidad de equipos y/o sistemas.

Expresar en términos probabilísticos índices de criticidad de equipos consiste en cuantificar la incidencia de un equipo en criterios como seguridad, ambiente, producción, coste de operación y de mantenimiento, porcentaje de fallos y tiempo de reparación. Estos criterios se relacionan con una ecuación matemática, que genera una puntuación para cada equipo evaluado. Seguidamente se genera una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del total del universo analizado diferenciando tres zonas de clasificación principalmente: alta criticidad, mediana criticidad y baja criticidad. Para la selección del método de

evaluación de índices de criticidad se toman criterios de ingeniería, factores de ponderación y cuantificación.

A.9.3 Probabilidad de ocurrencia de un modo de falla

Expresar en términos probabilísticos la ocurrencia de un modo de falla consiste en calcular la probabilidad de que una causa específica de falla se produzca y de lugar al modo de falla. El índice de la ocurrencia representa un dato estadístico si se dispone de datos históricos de confiabilidad de los sistemas y/o equipos, si no se dispone de datos estadísticos el índice de ocurrencia será un valor intuitivo²⁴.

A.9.4 La tendencia de un parámetro en la operación de equipos.

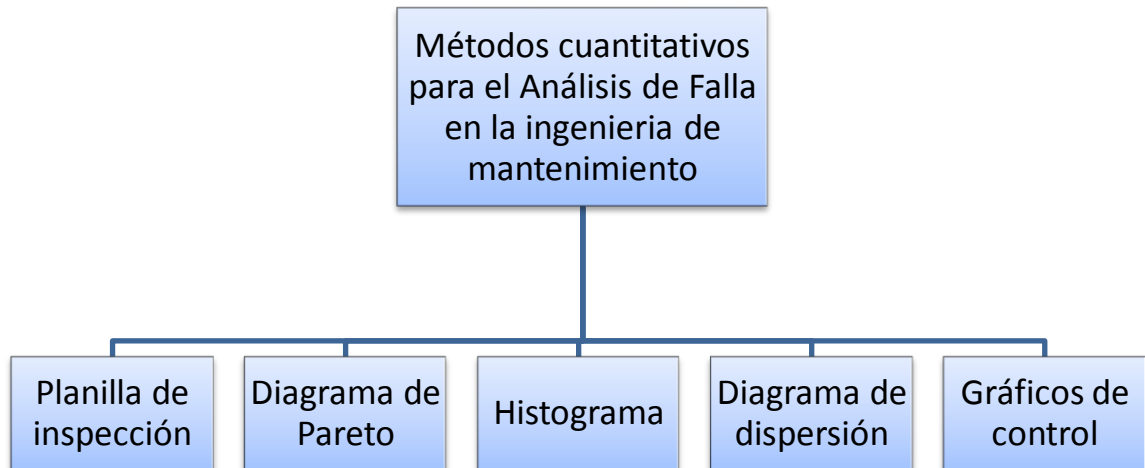
Expresar en términos probabilísticos la tendencia de un parámetro consiste en medir los cambios y calcular la tendencia de los parámetros de un equipo que determinan su condición. Cuando se detecta que los parámetros críticos de un equipo tienen valores medidos o tendencias que están fuera del estándar establecido se considera como causa de falla.

A.10 MÉTODOS CUANTITATIVOS USADOS EN EL MANTENIMIENTO

Para poder realizar estos objetivos utilizaremos diferentes métodos cuantitativos los cuales se muestran en la figura 7, y cada uno de ellos será analizado en un capítulo posterior con más detenimiento, la primera parte es para determinar los riesgos existentes en plantas industriales, después analizaremos los equipos críticos los cuales son a los que debemos realizar los análisis de sus fallas.

²⁴ SERRA B, Juan A, BUGUEÑO, Graciela. Gestión de calidad en las pymes agroindustriales, Universidad politécnica de Valencia, 2005.pag 130-140.

Figura 7. Métodos cuantitativos en el mantenimiento



A.11 ANÁLISIS CUANTITATIVO EN EL MANTENIMIENTO.

El análisis exhaustivo y completo de los datos obtenidos de procesos de mantenimiento y producción mediante las herramientas estadísticas, genera instrumentos avanzados de mantenimiento que ayudan a encontrar: fallas para su eliminación o control; productos y servicios defectuosos para su erradicación; fundamentos cuantitativos para la selección o mejora de acciones-táctica-estrategia de mantenimiento y/o producción; elementos básicos para una mejor toma de decisiones sobre el manejo y operación de los instrumentos básicos de mantenimiento-producción-calidad; índices para el mejor control de los procesos²⁵. La desviación de los estándares establecidos como óptimos es la causa de los servicios (reparaciones o tareas proactivas) inadecuados de mantenimiento y/o producción; esta variación se puede encontrar en cuatro fuentes:

²⁵ SOLS, Alberto. Fiabilidad, Mantenibilidad, efectividad. Universidad Pontificia comillas de Madrid. 2000

- Materiales de la misma calidad y con idénticas especificaciones técnicas.
- Máquinas, herramientas, utensilios y repuestos adecuados.
- Métodos y procedimientos estándares, normalizados y reglamentados de trabajo.
- Verificaciones de calidad de las acciones y procesos de trabajos realizados, similares en todas las inspecciones.

Cuando algunas de estas características varían de los estándares establecidos, se producen errores en las acciones, en las tácticas o en las estrategias de mantenimiento. La estadística provee las herramientas básicas para su análisis y control. Las causas pueden ser innumerables, pero solo algunas de ellas generan una gran cantidad de fallas y productos como servicios defectuosos con características fuera del estándar.

La estrategia para encontrar las causas de fallas y de servicios defectuosos requiere de varios elementos básicos; el primero es la actitud de las personas hacia el cambio para encontrar las fuentes de errores; el segundo es el grado de entrenamiento para el desarrollo de habilidades y competencias del personal analítico de producción y mantenimiento para realizar los estudios y dedicar gran parte del tiempo a la captura de las causas de las desviaciones; un tercer elemento lo constituyen las herramientas estadísticas. Es importante aclarar que estas últimas por sí solas no solucionan los problemas de variación; requiere de los tres elementos simultáneos y de otros menos relevantes²⁶.

²⁶ Mora Gutiérrez, Alberto. Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios. AMG. 2009.

ANEXO B

B. RIESGO EN OPERACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS

El concepto del riesgo ha tomado importancia en los últimos años, siendo común el uso de términos como “exposición al riesgo”, “gestión de riesgos”, “análisis de riesgos”, etc.

Parece que cuanto más conocemos sobre el mundo en el que vivimos, más aprendemos sobre los peligros existentes. Los avances tecnológicos nos permiten ser conscientes de los posibles desastres que podrían ocurrir, esta mayor conciencia del riesgo provoca que cada vez haya más interés en mitigarlo o gestionarlo mediante diferentes tipos de análisis. Aún así, es imposible eliminar todos los riesgos por completo y en muchos casos no sería ni aconsejable.

El riesgo es siempre futuro. Si algo ha ocurrido ya, el riesgo asociado a ese evento ya no existe. Por tanto el riesgo se refiere únicamente a cosas que pueden pasar y así cuanto más conocimiento tengamos sobre él, más posibilidades tendremos de evitar posibles desastres que pueden ocurrir.

Nuestra sociedad tecnológica, cada día más consciente de los peligros y sus riesgos, aplica continuamente sistemas para reducirlos. De esta forma, usamos el cinturón de seguridad, evitamos conducir de noche, etc. El hecho es que el análisis de riesgos es una característica natural e innata a la existencia humana.

El riesgo no se puede medir directamente sino que debe ser calculado. El riesgo no es un fenómeno natural sino un parámetro que requiere la integración de al menos dos cantidades: La posibilidad y el tipo de evento.

B.1. DEFINICIONES DE RIESGO

Por riesgo se entiende la probabilidad de que se desencadene un determinado fenómeno o suceso que, como consecuencia de su propia naturaleza o intensidad y la vulnerabilidad de los elementos expuestos puede producir efectos perjudiciales en personas, pérdida material, económica o degradación ambiental.

Riesgo es la probabilidad de que un peligro (causa inminente de pérdida) asociado a una actividad determinada, ocasione un incidente con consecuencias factibles de ser estimadas.²⁷

Riesgo es una medida de la pérdida de valor de una propiedad daño a personas o ambiente dada por la probabilidad de ocurrencia del evento (falla) y la magnitud de la pérdida o daño (consecuencia).

En el lenguaje común por riesgo cabe también entender el fenómeno, suceso o actividad humana, susceptible de producir daños en personas y/o bienes.

Se puede definir al riesgo como la combinación entre la probabilidad de que ocurra un determinado evento y la consecuencia (generalmente negativa) asociada con ese evento²⁸.

Riesgo es la oportunidad que suceda algo que tendrá impacto en los objetivos²⁹.

Los riesgos son inherentes a los procesos. Por tal razón, puede afirmarse que no hay procesos libres de riesgos, aunque sobre éstos se puede intervenir con el propósito de mantenerlos en niveles donde la frecuencia de ocurrencia de sucesos, sus consecuencias, o ambos factores, puedan ser mínimos o aceptables.

²⁷ GONZÁLEZ Q, Javier García. Mejora en la confiabilidad operacional de las plantas de generación de energía eléctrica desarrollo de una metodología de gestión de mantenimiento basado en el riesgo (rbm), Tesis de máster Universidad Pontificia Comillas. Madrid, Julio de 2004.

²⁸ API Recommended Practice 580: Risk-Based Inspection. 1st ed. 2000

²⁹ Norma Técnica Colombiana NTC 5254

Usualmente la intervención sobre los riesgos se orienta a uno o más de los siguientes objetivos: reducirlos, minimizarlos, mantenerlos o controlarlos³⁰.

Matemáticamente hablando, el riesgo es la multiplicación de la probabilidad de ocurrencia de un evento por sus consecuencias.

$$\text{Riesgo (t)} = \text{Probabilidad de ocurrencia (t)} * \text{Consecuencia} \quad (1)$$

El análisis de la ecuación del riesgo, permite entender el poder de este indicador para el diagnóstico y la toma de decisiones, debido a que el mismo combina probabilidades o frecuencias de fallas con consecuencias, permitiendo la comparación de unidades como los equipos rotativos, que normalmente presentan alta frecuencia de fallas con bajas consecuencias, con equipos estáticos, que normalmente presentan patrones de baja frecuencia de fallas y alta consecuencia.

La sencillez matemática de esta expresión, contrasta con su utilidad práctica. En primer lugar, es preciso identificar todos y cada uno de los peligros presentes en una instalación industrial y después conocer la frecuencia con la que ocurrirá un evento (en el contexto del análisis de riesgos será siempre un evento no deseado), y la magnitud del daño que se producirá. Esta tarea es muy costosa en términos de tiempo y recursos a emplear. De hecho, algo tan aparentemente simple como conocer estas dos magnitudes ha obligado al desarrollo de un sinnúmero de metodologías encaminadas a su estimación más o menos precisa. En este capítulo se desarrollara la parte de identificación de riesgo, el desarrollo de la ecuación de riesgo se tratara en el anexo C métodos para análisis de criticidad según el método de factores ponderados basados en el concepto de riesgo.

³⁰ BROCARDON MONTOYA, Arturo. Elaboración de estudios de riesgos. Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. - ISA

B.2. PRINCIPALES CONCEPTOS EN UN ESTUDIO DE RIESGO

Para la identificación de los factores de riesgo de un proceso, sistema o equipo es necesaria la definición de los siguientes conceptos:

RECURSOS FUNDAMENTALES

Son aquellos presentes en todos los procesos operacionales y que son necesarios para la continuidad y competitividad de la organización. Los recursos fundamentales son básicamente Físicos y Humanos los cuales son vulnerables o corren riesgo durante los procesos según el entorno donde se desarrollen. En ese entorno, generalmente están contenidos los factores de riesgo. La tabla 6 muestra la relación de recursos fundamentales y factores de riesgo.

LOS FACTORES DE RIESGO

Un factor de riesgo es aquella condición de trabajo de naturaleza financiera, operacional, de seguridad, tecnológicos y medio ambiental, que, constituye una situación adversa, en la cual existe la posibilidad de una afectación a los recursos fundamentales de la organización. La evaluación de un factor de riesgo frente a su probabilidad de ocurrencia y las consecuencias que ocasionaría a los recursos fundamentales determina el riesgo asociado a una determinada actividad.

Para el presente estudio se enfatizará en los factores de riesgo de naturaleza operacional; es decir, las condiciones de trabajo que al estar presentes incrementan la probabilidad de aparición de falla en la operación técnica de equipos. Los factores de riesgo operacional se clasifican en: Físicos o mecánicos, Químicos, Térmicos, Eléctricos, Técnicos y ambientales.

Tabla 6. Recursos fundamentales y factores de riesgo

Campo y naturaleza del riesgo	Recursos	Factores de riesgo
Financiero	Dinero	Pérdida económica, Riesgo financiero
Operacional	Equipos	Daño o Falla
Seguridad	Recursos	Muerte, Accidente de trabajo, Daño de equipos
Tecnológico	Hardware, Software	Daño de equipo o software, Obsolescencia
Medio Ambiente	Medio Ambiente	Deterioro, Contaminación, Imagen corporativa, Sanciones

RIESGO ACEPTABLE

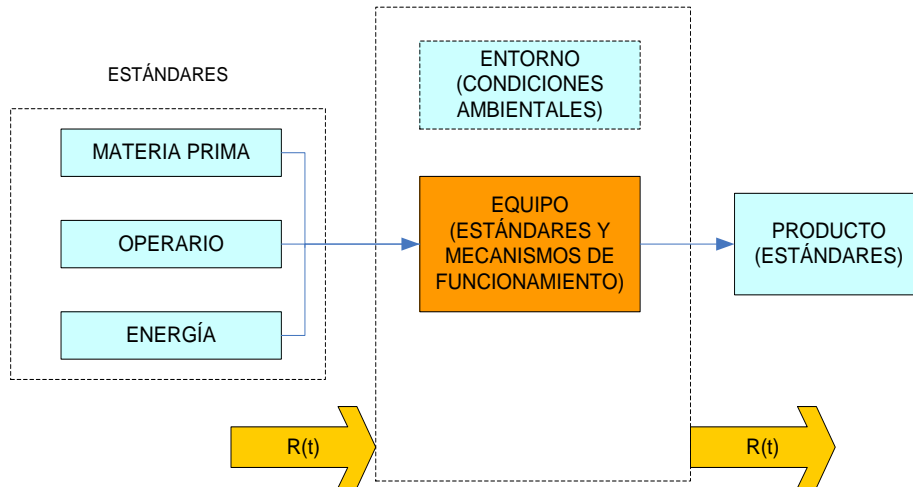
De forma subjetiva, el riesgo se puede describir como la percepción de un peligro. La forma de percepción que tienen las personas de los peligros influye en la percepción que tienen del riesgo asociado. Así, las personas están dispuestas a aceptar riesgos más elevados cuando ellas mismas tienen control sobre el proceso.

Existen riesgos los cuales mediante un previo estudio del grupo de trabajo se admiten o aceptan, es decir se puede convivir con ellos o se tiene control sobre estos, a este tipo de condición se llama riesgo aceptable.

CONTEXTO OPERACIONAL

El contexto operacional clarifica el evento que se analiza observando los diferentes parámetros que entran y salen del sistema o equipo los cuales son causantes de los factores de riesgos, definiendo el estándar operacional así como las actividades secuenciales del proceso o equipo. En la figura 8 se representan los parámetros que definen el contexto operacional.

Figura 8. Variables del contexto operacional



B.3. CLASES DE RIESGOS

Los riesgos en general, se pueden clasificar en riesgo puro y riesgo especulativo. La figura 9 muestra la clasificación general.

El riesgo especulativo es aquel en el cual, existe la posibilidad de ganar o perder, como por ejemplo, las apuestas o los juegos de azar.

En cambio el **riesgo puro** es aquel en el que existe la posibilidad de perder o no perder pero jamás de ganar.

El riesgo puro se clasifica en:

- Riesgo inherente
- Riesgo incorporado

El riesgo inherente Es aquel que por el tipo de actividad empresarial no se puede separar de la situación donde existe. Es propio del trabajo a realizar. Es el riesgo propio de cada actividad. En la tabla 7 se muestran algunos ejemplos de riesgos inherentes:

Figura 9. Clasificación general de riesgos

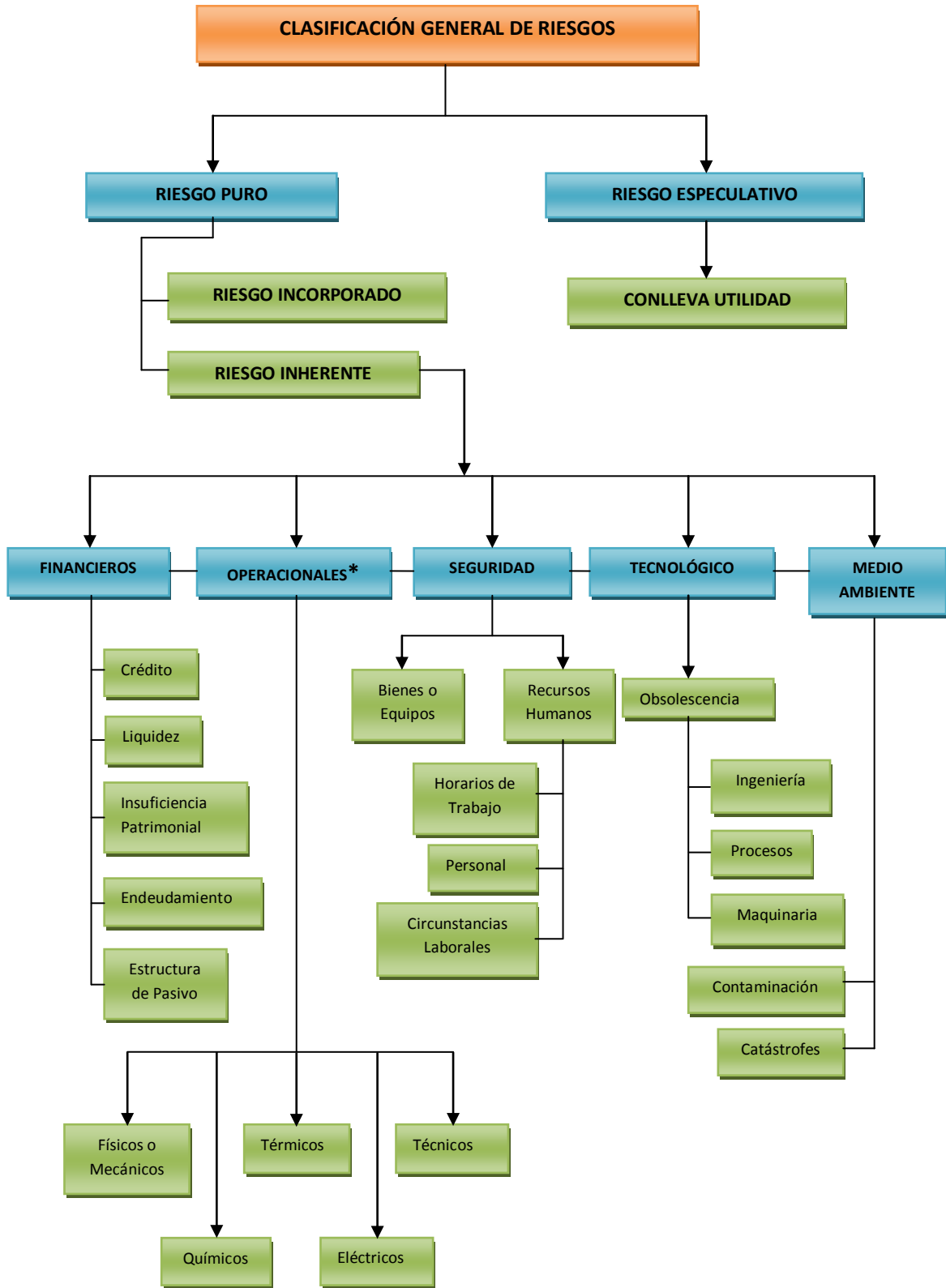


Tabla 7. Principales riesgos inherentes al tipo de empresa

TIPO DE ACTIVIDAD EMPRESARIAL	PRINCIPALES RIESGOS INHERENTES
Transporte	Choques, colisiones, volcados
Metalmecánica	Quemaduras, golpes
Construcción	Caída distinto nivel, golpes, atrapamiento
Minería	Derrumbes, explosiones, caídas, atrapamientos
Servicios	Choque, colisiones, lumbago, caídas, quemaduras, golpes

El riesgo incorporado es aquel que no es propio de la actividad, sino que es producto de conductas poco responsables de un trabajador, el cual asume otros riesgos con objeto de conseguir algo que cree que es bueno para el y/o para la empresa, como por ejemplo ganar tiempo, terminar antes el trabajo para destacar, demostrar a sus compañeros que es mejor, etc.

Los siguientes son ejemplos de riesgos incorporados:

- Poner un clavo con un alicate o llave y no con un martillo.
- Subir a un andamio sin enlazarse o sin protección.
- Levantar o transportar sobrepeso.

- Transitar a exceso de velocidad.
- Seguir trabajando con un fallo mecánico lesionante.
- Trabajar en una máquina sin protección en las partes móviles.

Los riesgos inherentes en una empresa se deben controlar y/o eliminar siempre que sea posible, ya que al estar en directa relación con la actividad de la empresa, si ésta no los asume no puede existir. Los riesgos incorporados se deben eliminar de inmediato.

Cuando un riesgo se sale de nuestro control produce accidentes que provocan muertes, lesiones incapacitantes, daños a los equipos, materiales y/o medio ambiente.

Todo esto, provoca pérdidas para la empresa, ya que ocurrido un accidente, la empresa debe:

1. Contratar un nuevo trabajador y prepararlo para esa actividad.
2. Redistribuir los trabajadores en el área.
3. Pérdidas de tiempo
4. Aumentos de seguro
5. Comprar o reparar la maquinaria y/o equipos
6. Pago de indemnizaciones
7. Pérdida de tiempo de los trabajadores involucrados en el accidente

La tabla 8 muestra la clasificación de factores de riesgo operacional, los cuales son los de interés para la identificación de factores de riesgo en operaciones técnicas de equipos, esta clasificación se desarrolla en base a las propiedades de los materiales y en las acciones de uso común en la ingeniería de mantenimiento.

Tabla 8. Clasificación de factores de riesgo operacional

CLASIFICACIÓN DE FACTORES DE RIESGO OPERACIONAL				
FÍSICOS O MECÁNICOS	QUÍMICOS	TÉRMICOS	ELÉCTRICOS	TÉCNICOS
Fatiga	Corrosión	Fatiga	Intensidad	Sistemas de control
Alta Vibración	Erosión	Alta o baja	Voltaje	Calidad
Desalineamiento	Abrasión	Temperatura	Aislamiento	Montaje
Fugas	Oxidación	Condensación	Conexiones incorrectas	Diseño
Defecto en Lubricación	Fugas químicas	Defecto de Refrigeración	Alta Temperatura	Conexiones
Alta o Baja Velocidad	Velocidad de reacción		Campos magnéticos	Recursos humanos
Cavitación	Propiedad de las sustancias		Alta Vibración	
Aireación			Humedad	
Alta baja Presión				
Desgaste mecánico				
Inadecuadas Propiedades mecánicas del material				
Ruido				
Sobrecarga				

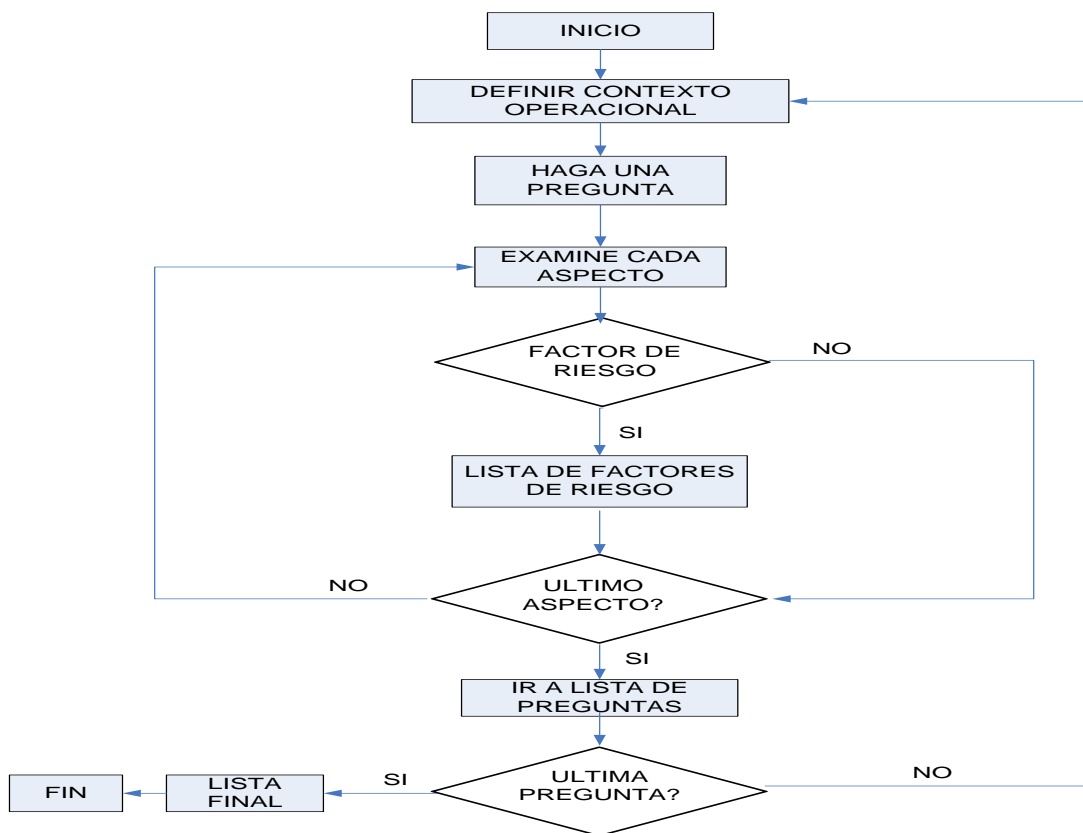
B.4. IDENTIFICACIÓN DE FACTORES DE RIESGO

La identificación de factores de riesgo consiste en evaluar el proceso o equipo y determinar aquellos factores de riesgo que pueden degradar, demorar, impedir o interrumpir la función operacional del proceso o equipo.

Cada empresa y sus grupos de trabajo son responsables de identificar, evaluar, valorar, prevenir, proteger, controlar, atender y consolidar los riesgos asociados a sus procesos, actividades y tareas de acuerdo a un grupo de trabajo.

La identificación de los factores de riesgo también describe la manera como pueden presentarse de modo que se distinga claramente, para esto se debe poseer información estadística de accidentes, anomalías, eventos, sucesos o siniestros ocurridos por causa de cada factor de riesgo en el proceso, en las instalaciones o en el entorno es decir se debe contar con un registro histórico que sea aplicable para analizar el comportamiento o la posible tendencia, aunque también se puede realizar sin conocer estos datos haciendo un trabajo tedioso. La figura 10 representa un modelo para identificar los factores de riesgo:

Figura 10. Modelo para la identificación del riesgo



Se sugieren tres pasos para identificar los factores de riesgo en procesos:

1. Definir el contexto operacional: con esto se identifican las actividades secuenciales del proceso.

Una vez que se tienen identificadas las actividades secuenciales del proceso (contexto operacional), cada actividad deberá revisarse sistemáticamente mediante la aplicación de palabras o preguntas claves que faciliten visualizar los factores de riesgo inherentes a cada actividad.

2. Realización de preguntas en la siguiente secuencia:

Las respuestas deben ser posibles problemas los cuales se registran en forma de una lista de aspectos, que son las posibles amenazas o factores de riesgo para la actividad.

¿Qué es lo que debe hacerse?

Describe en pocas palabras lo que se pretende hacer por ejemplo: abrir la exclusiva, cargar material, cerrar válvula, encender quemadores. Su objetivo es determinar claramente el propósito de la actividad y la manera correcta de proceder para lograrlo.

A continuación se plantea un cuestionario de preguntas:

¿Qué puede llevar a que la actividad no se realice? Coloque los modos de falla de cada actividad.

¿Qué puede conducir a que se haga lo contrario a lo que debería hacerse?*

¿Qué puede ocasionar que se ejecute únicamente parte de la actividad?

¿Qué puede conducir a realizar tareas o labores adicionales a la actividad?

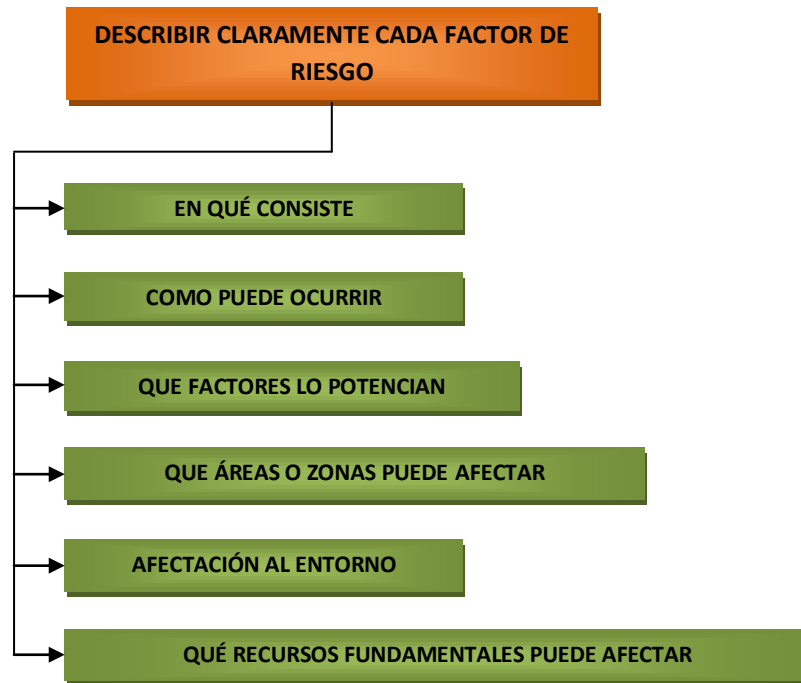
¿Qué puede llevar a que las variables del proceso se desvíen de su estándar operacional?

* Siempre y cuando aplique teniendo en cuenta el contexto operacional.

El mismo procedimiento se efectuará para cada una de las actividades del proceso. Al término de esta labor ya se tendrá confeccionada una lista de amenazas del proceso que se está analizando.

3. Descripción de los factores de riesgo, se puede ver en la figura 11. Después de obtener la lista de factores de riesgos, se debe describir claramente en qué consiste, conocer dónde, cuándo y cómo puede ocurrir este.

Figura 11. Descripción de los factores de riesgo



Para facilitar la descripción de los factores de riesgo es importante:

- Realizar la búsqueda de antecedentes.
- Recopilación de experiencias de equipos de trabajo, registro de anomalías relacionadas con el riesgo.
- Consulta de registros fotográficos, vídeos o informes escritos.
- Recolección de información estadística de accidentes o siniestros ocurridos por causa del mismo factor de riesgo en el proceso, en la instalación locativa, en la empresa o en el entorno, que sea aplicable para analizar el comportamiento o la posible tendencia de la amenaza.
- Catalogo o recomendaciones del fabricante.

Es importante la identificación de factores de riesgo presentes en procesos o equipos de esta manera se puede actuar sobre estos para mitigarlos o controlarlos con el objeto de reducir accidentes con impacto en seguridad, medio ambiente y planta que tienen como origen la falla en equipos mecánicos.

B.5. PARA QUE ES ÚTIL UN ESTUDIO DE RIESGO

- Realizar un análisis de riesgo en la operación técnica de equipos.
- Controlar la frecuencia de fallas.
- Diagnostico y toma de decisiones.
- Identificación de acciones correctivas apropiadas.
- Para realizar gestión de mantenimiento.
- Análisis de criticidad basado en el concepto de riesgo.

ANEXO C

C. METODOLOGÍAS PARA ANÁLISIS DE CRITICIDAD

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, dirigiendo el esfuerzo y los recursos a áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional³¹, basado en la realidad actual.

¿Cómo establecer que una planta, proceso, sistema o equipo es más crítico que otro? ¿Qué criterio se debe usar? ¿Todos los que toman decisiones usan el mismo criterio? El análisis de criticidad da respuesta a estas interrogantes, dado que genera una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del total del universo analizado, diferenciando tres zonas de clasificación principalmente: alta criticidad, mediana criticidad y baja criticidad, una vez identificadas estas zonas es mucho más fácil diseñar una estrategia, para realizar estudios o proyectos que mejoren la confiabilidad operacional.

Desde el punto de vista matemático la criticidad se puede expresar como:

$$\text{CRITICIDAD} = \text{Probabilidad de falla} * \text{Consecuencia de la falla} \quad (2)$$

Donde la probabilidad de falla está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado y la consecuencia de la falla está referida como: el impacto, flexibilidad operacional, los costos de reparación, los impactos en seguridad, ambiente e imagen corporativa.

Basados en esta ecuación, se observa que el nivel criticidad puede ser modificado, bien sea disminuyendo la probabilidad de falla, disminuyendo las

³¹ CONFIABILIDAD OPERACIONAL: Es la capacidad de una instalación o sistema (integrados por procesos, tecnología y gente), para cumplir su función dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico.

consecuencias o ambos, es importante resaltar que de acuerdo a la experiencia, las acciones dirigidas a disminuir probabilidad de falla (frecuencia de ocurrencia de eventos) son más factibles o viables de ejecutar que las dirigidas a disminuir consecuencias ya que estas involucran mayores esfuerzos y decisiones de altos niveles gerenciales³², Para algunos autores, disminuir la frecuencia (probabilidad) es prevención y disminuir las consecuencias (gravedad de los efectos) es protección.

Esta ecuación que define la criticidad es una particularización de la ecuación de riesgo ya que para el estudio de criticidad el evento a estudiar son las fallas (factores de riesgo), y las consecuencias en que estas fallas afectan los recursos fundamentales de la empresa (físicos y humanos).

C.1 MODELO PARA EL ANÁLISIS DE CRITICIDAD

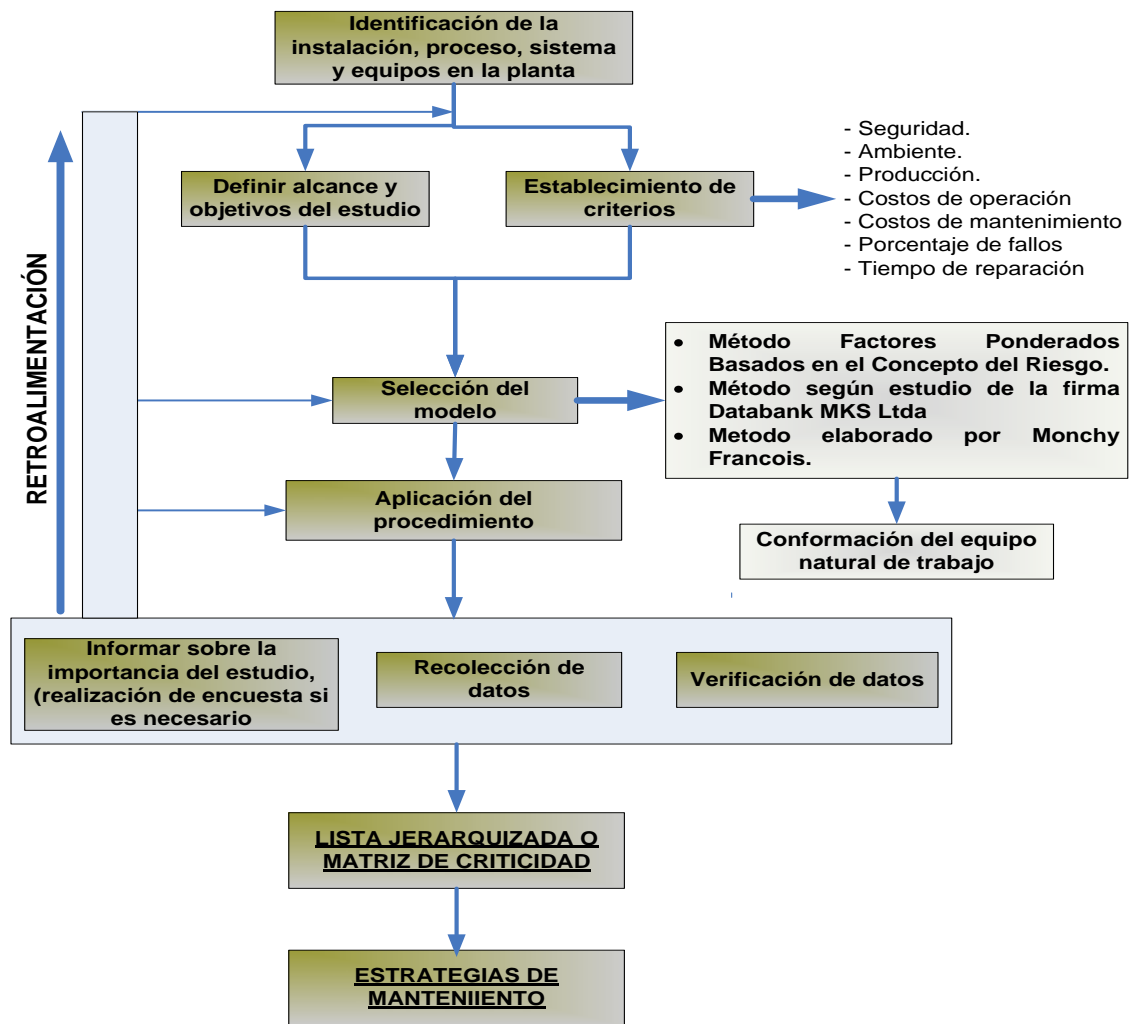
El modelo a seguir se presenta de una forma general, la aplicación de un modelo definido se diseña de acuerdo al método seleccionado, la selección del método es un proceso subjetivo por lo que cada empresa puede optar por utilizar un método o adaptarlo de acuerdo a sus necesidades o contexto operacional en el cual se desarrollen sus actividades, por último, la lista jerarquizada o matriz de criticidad de los procesos o equipos críticos es el producto que se obtiene del análisis.

En la figura 12 se muestra el esquema para realizar un análisis de criticidad independiente del método con el cual se desarrolle, que para nuestro estudio serian:

- Método de factores ponderados basados en el concepto del riesgo.
- Método según estudio de la firma Databank MKS Ltda.
- Método elaborado por MONCHY FRANÇOIS.

³² Aranguren, José G., Bravo, Javier E., Materán, Elisaúl de J., Medina, Robinson J., Generación de Planes Óptimos de Inspección para Equipos Estáticos en Instalaciones Petroleras., Reliability and Risk Management – Integrity Assessment Services.

Figura 12. Esquema general para realizar un análisis de criticidad independiente del método utilizado



El modelo se realiza y complementa en cada fase con los siguientes pasos para realizar en el estudio de criticidad de una planta independientemente de su actividad³³.

Criterios a analizar en un estudio de criticidad: Los principales criterios para un análisis de criticidad están asociados con seguridad, ambiente, producción, costos de operación y de mantenimiento, probabilidad de fallas y tiempo de reparación. Estos criterios dependen del método a utilizar.

³³ AMENDOLA, Luis J., Gestión de proyectos de activos, UPV, 2006.

Identificación de la instalación, proceso, sistema y equipos a estudiar: Define el número de elementos o componentes de una instalación y/o planta en agrupaciones secundarias que trabajan conjuntamente para alcanzar propósitos preestablecidos.

Según la NORMA ISO 14224³⁴ se clasifica una industria dividiéndola de mayor a menor jerarquía o grado de detalle. Para el estudio se parte de la clase que representa el tipo de proceso a realizarse, hasta llegar al ítem mantenible que serían las partes de la máquina, como se muestra a continuación:

- **CLASES:** Se define como una agrupación lógica de sistemas que funcionan unidos para suministrar un servicio (Ej. electricidad) o producto (Ej. gasolina) al procesar y manipular materia prima e insumos (Ej. agua, crudo, gas natural, catalizador).
- **SISTEMA:** Conjunto de elementos interrelacionados dentro de las unidades de proceso, que tienen una función específica. Ej. separación de gas, suministrar aire, regeneración de catalizador, etc.
- **SUBSISTEMA:** Es una agrupación de componentes que hacen parte de un Sistema. Un subsistema es fundamental para el funcionamiento del sistema que lo contiene Ej. subsistema de lubricación, de refrigeración, transmisión de potencia, control y monitoreo.
- **ÍTEM MANTENIBLE:** Es el grupo de piezas o equipos a los cuales se les debe hacer mantenimiento (chequear, reparar, restaurar, etc.) debido a que estas son susceptibles de fallas. Hacen parte de los subsistemas. Ej. Intercambiadores, acoples, ejes, motores, válvulas, etc.
- **COMPONENTE DE DETALLE** (en un grado último de división, opcional): son las partes que componen el Ítem Mantenible, puede ser una sola pieza. Ej. Sello, tubo, rotor, juntas, filtro, perno, tuerca, etc.

³⁴ Norma ISO 14224: Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. 2004

Si el grado de detalle es bajo (pocas funciones), entonces el número de modos de fallo (factores de riesgo) por función será elevado y el análisis será difícil de manejar. Por el contrario, si el nivel de detalle es elevado (muchas funciones diferentes), entonces el esfuerzo necesario para desarrollar el análisis será grande y el resultado de este será muy detallado y preciso.

Definir alcance y objetivos para el estudio: En este paso se determina la cantidad de recursos que se deben disponer para realizar el análisis, el grupo de analistas y los problemas que se deben solucionar en la instalación.

Selección del equipo de trabajo e información al personal sobre la importancia del estudio: Para obtener la información requerida, se forma un equipo natural de trabajo integrado por un facilitador (experto en análisis de criticidad y quien será el encargado de conducir la actividad), y personal de las áreas involucradas en el estudio como lo son operaciones, mantenimiento y especialistas. Este personal deberá conocer completamente los equipos, sus sistemas y su funcionamiento dentro del proceso.

Recolección de datos: Se forma una lista con los sistemas que harán parte del estudio, ésta sale de la discusión del personal escogido de las áreas involucradas en el estudio, se obtienen los datos de las probabilidades de fallas de los equipos o su tasa de falla y las consecuencias de estas, se elaboran unas tablas indicando en nivel de afectación de cada criterio a analizar (seguridad, ambiente, producción, costos de operación y de mantenimiento, probabilidad de fallas y tiempo de reparación) dependiendo del método a utilizar (factores ponderados basados en el concepto del riesgo, Método según estudio de la firma Databank MKS Ltda., Método elaborado por MONCHY FRANÇOIS); si es necesario se realiza una encuesta para validar estos datos, ésta se realizara preferiblemente de forma personal, la mejor forma de conducir este proceso, es que el facilitador aclare la forma en que se debe llenar dicha encuesta, dando ejemplos en cada caso, para que luego los encuestados procedan con su respectiva respuesta, se aconseja

que el modelo sea sencillo, para facilitar la dinámica de la encuesta y a la vez de permitir el máximo confort a los entrevistados.

Verificación y análisis de datos: una vez se tengan los datos, se verificará por el facilitador y los principales representantes de cada área, la validez de éstos, revisando los sistemas de adquisición de datos, datos históricos, modelos matemáticos utilizados, etc. Si la obtención de estos datos se realizó por medio de encuestas, se verifica una por una y para cada equipo se saca un promedio de cada criterio calificado. Para analizar los datos, se reemplaza en la ecuación de criticidad y dependiendo de los resultados se clasifican los equipos como críticos, medianamente críticos o no críticos. Los resultados del análisis se pueden mostrar en una matriz de criticidad, un diagrama de barras o simplemente en forma de lista. Se mostrará para los tres modelos a analizar en este estudio la verificación y el análisis de los datos.

Retroalimentación: Si en un equipo quedan dudas sobre su clasificación, se analizará con más detalle por parte del facilitador y los principales representantes del equipo de trabajo, si los datos de el equipo se obtuvieron de una encuesta, esta se vuelve a realizar, informando de una forma más detallada a todo el grupo participante del análisis de criticidad.

C.2 BENEFICIOS DE APLICAR UN ANÁLISIS DE CRITICIDAD

A través de los aspectos mencionados, se observa claramente la gran utilidad del análisis de criticidad. Mediante este análisis se obtiene una jerarquización validada de todos los procesos / sistemas, lo cual permite³⁵:

³⁵ Montaña, Leonardo., Diseño de un sistema de mantenimiento con base en análisis de criticidad y análisis de modos y efectos de falla en la planta de coque de fabricación primaria en la empresa acerías paz del río s.a., UPTC, Colombia, 2006.

- Priorizar órdenes de trabajo de operaciones y mantenimiento.
- Priorizar proyectos de inversión.
- Diseñar políticas de mantenimiento.
- Seleccionar una política de manejo de repuestos y materiales.
- Dirigir las políticas de mantenimiento a las áreas o sistemas más críticos.
- Utilización óptima de los recursos humanos y económicos dirigidos hacia sistemas claves de alto impacto.
- Potencializar adiestramiento y desarrollo de habilidades en el personal, basado en la criticidad de sus procesos y sistemas.
-

Otra forma de ver los beneficios de un análisis de criticidad es según el área o departamento de la empresa en la cual se realizó el análisis:

En el área de Mantenimiento: Al tener plenamente establecido cuales sistemas son más críticos, se podrá establecer de una manera más eficiente la priorización de los programas y planes de mantenimiento de tipo: predictivo, preventivo, correctivo, detectivo e inclusive posibles rediseños al nivel de procedimientos y modificaciones menores; a su vez permitirá establecer la prioridad para la programación y ejecución de las órdenes de trabajo.

En el área de las Inspecciones: El estudio de criticidad facilita y centraliza la implantación de un programa de inspección, dado que la lista jerarquizada indica donde vale la pena realizar inspecciones y ayuda en los criterios de selección de los intervalos, tipo de inspección requerida para sistemas de protección y control (presión, temperatura, nivel, velocidad, espesores, flujo, etc.), así como para equipos dinámicos, estáticos y estructurales.

En el área de Materiales: La criticidad de los sistemas ayuda a tomar decisiones más acertadas sobre la cantidad de equipos y piezas de repuesto que deben existir en el almacén central, así como los requerimientos de partes, materiales y herramientas que deben estar disponibles en los almacenes de planta, es decir, es

posible cancelar el stock de materiales y repuestos de sistemas menos críticos logrando un costo optimo de inventario.

En la Disponibilidad de Planta: Los datos de criticidad permiten una orientación certera en la ejecución de proyectos, dado que es el mejor punto de partida para realizar estudios de inversión de capital y renovaciones en los procesos, sistemas o equipos de una instalación, basados en el área de mayor impacto total, que será aquella con el mayor nivel de criticidad.

En el departamento de Personal: Un buen estudio de criticidad permite potenciar el adiestramiento y desarrollo de habilidades en el personal, dado que se puede diseñar un plan de formación técnica, artesanal y de crecimiento personal, basado en las necesidades reales de la instalación, teniendo en cuenta primero las áreas más críticas, que es donde se concentran las mejores oportunidades iniciales de mejora y de agregar el máximo valor.

Se aclara que el grado de criticidad es esencialmente una función específica de cada proceso o equipo dentro de un tipo de industria, no se puede darle el mismo valor a un equipo similar, ya sea en la misma planta o en una similar, ya que la criticidad se ve afectada principalmente por los criterios propios de cada estudio y estos a su vez varían dependiendo de³⁶:

- Diseño de la planta
- Antigüedad de los equipos
- Tipo de proceso
- Regulaciones locales.

³⁶ Mantenimiento mundial www.mantenimientomundial.com

C.3. INFORMACIÓN REQUERIDA

La condición ideal sería disponer de datos estadísticos bien precisos de los sistemas a evaluar, lo cual permitirá cálculos “exactos y absolutos”. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, dado que pocas veces se dispone de una data histórica de excelente calidad, el análisis de criticidad permite trabajar en rangos, es decir, establecer cuál sería la condición más favorable, así como la condición menos favorable de cada uno de los criterios a evaluar. La información requerida para el análisis siempre estará referida con la probabilidad o frecuencia de falla y sus consecuencias.

C.3.1. Análisis de la probabilidad de falla (Pdf)

En instalaciones en las que se quiere optimizar la confiabilidad operacional y evitar accidentes de graves consecuencias, se hace hoy imprescindible conocer la probabilidad de que éstos acontezcan durante la vida del sistema. Por esta razón, los estudios de confiabilidad adquieren cada vez mayor relevancia en la actividad de prevención, por parte de los técnicos de seguridad y en general de los responsables de procesos u operaciones cuando estos puedan desencadenar situaciones críticas.

La confiabilidad (R) de un equipo es la probabilidad que no falle estando en servicio durante un lapso de tiempo determinado. En otras palabras, es la capacidad del equipo de no sufrir averías mientras se encuentra en servicio. El estudio de la confiabilidad y, en general, el análisis estadístico de las fallas, estudia la dependencia existente entre la variable tiempo y los mecanismos que conducen a la falla de componentes, equipos ó sistemas.

La probabilidad de fallo se define como la probabilidad de que ocurra el modo de fallo en un intervalo de tiempo definido T. El intervalo de tiempo

deberá ser fijo durante todo el análisis, para calcular la probabilidad de falla se utilizan modelos matemáticos y/o datos estadísticos, es importante considerar como la Pdf varía en función del tiempo. Se puede utilizar la tasa de fallos para definir este concepto.

Antes de definir la tasa de fallos, se hará un repaso a los conceptos básicos de confiabilidad:

- **Llamaremos T** a la variable aleatoria continua que describe los tiempos de fallo de un determinado componente.

T = Tiempo transcurrido hasta que se produce la falla

- **Función de densidad de probabilidad f (t)**. La función de densidad representa la probabilidad de que el componente falle en el instante de tiempo t. $t \in T$

$$f(t) = Fdp \quad (3)$$

- **Función de Distribución F (t)**. La función de distribución representa la probabilidad de que el componente falle en el periodo de tiempo comprendido entre 0 y t.

Se cumple que:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

- **La función de confiabilidad R (t)**. Es la complementaria de la Función de Distribución y determina la probabilidad de que el componente “sobreviva” hasta el instante de tiempo t, o lo que es lo mismo la proporción de dispositivos iniciales que seguirán funcionando correctamente en el instante t.

$$R(T) = 1 - F(T) \quad (5)$$

Se llama **vida media o tiempo medio hasta el fallo** (Mean Time To Failure o MTTF) de un dispositivo a la esperanza de la variable aleatoria T. La vida media determina el tiempo de duración esperada de un dispositivo:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t * f(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (6)$$

Cuando se consideren dispositivos reparables (que pueden seguir funcionando tras un fallo), se hablará de tiempo medio entre fallos (MTBF).

Se define la **tasa de falla media** h en el intervalo (t_1, t_2)

$$h(t_1, t_2) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_1 - t_2) * R(t_1)} \quad (7)$$

$R(t_1) - R(t_2)$ Representa la proporción de dispositivos totales que, habiendo sobrevivido al instante t_1 , han fallado en el intervalo (t_1, t_2) . Al dividir esta diferencia por $R(t_1)$ se obtiene la proporción de dispositivos supervivientes a t_1 que han fallado en (t_1, t_2) :

$$\frac{R(t_1) - R(t_2)}{R(t_1)}$$

Es la probabilidad condicional de que un dispositivo que haya sobrevivido al instante t_1 falle en el intervalo (t_1, t_2) . Finalmente, al dividir por la longitud del intervalo, obtenemos la proporción anterior (su media) por unidad de tiempo.

Haciendo tender t_2 a t_1 , obtenemos la llamada **tasa de fallos o tasa de riesgo**:

$$h(t_1) = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_1 - t_2) * R(t_1)} = \frac{-R'(t_1)}{R(t_1)} = \frac{F'(t_1)}{R(t_1)} = \frac{f(t_1)}{R(t_1)} \quad (8)$$

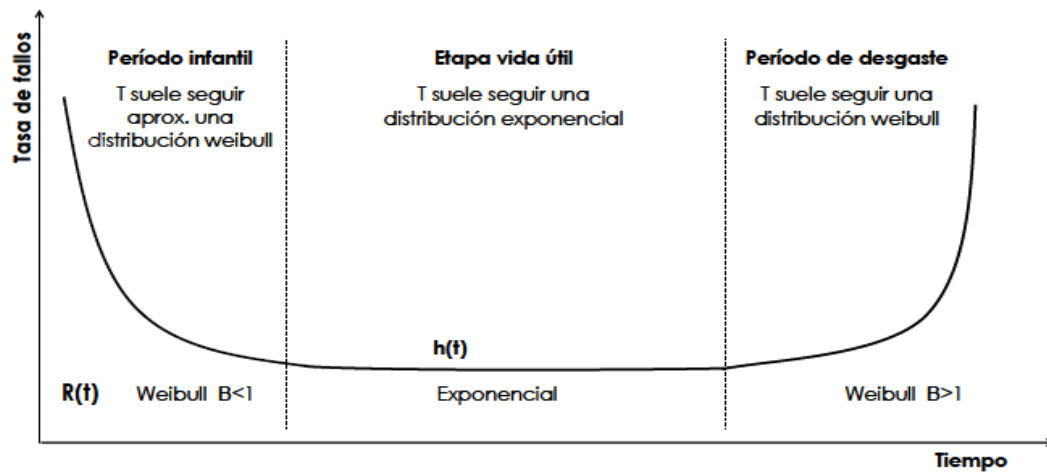
La tasa de fallos o tasa de riesgo $h(t)$ se define como la probabilidad que tiene un componente de fallar en el instante siguiente al dado $(t+\Delta t)$, si éste ha sobrevivido desde el instante 0 hasta el tiempo t . Es una medida de lo propenso que resulta un componente a fallar en función de su edad.

Un buen análisis de fallas constituye el paso más importante en la formulación de un programa de mantenimiento racional y económico. La bondad del estudio dependerá de la posibilidad de evaluar la tasa de fallas de un equipo en cada instante de tiempo de su vida útil.

El ciclo de vida de un equipo, como se ve en la figura 13, puede ser dividido en tres etapas ó periodos distintos:

1. Arranque (tasa de fallas decreciente, mortalidad infantil).
2. Operación normal (tasa de fallas constante, etapa de vida útil).
3. Desgaste (tasa de fallas creciente).

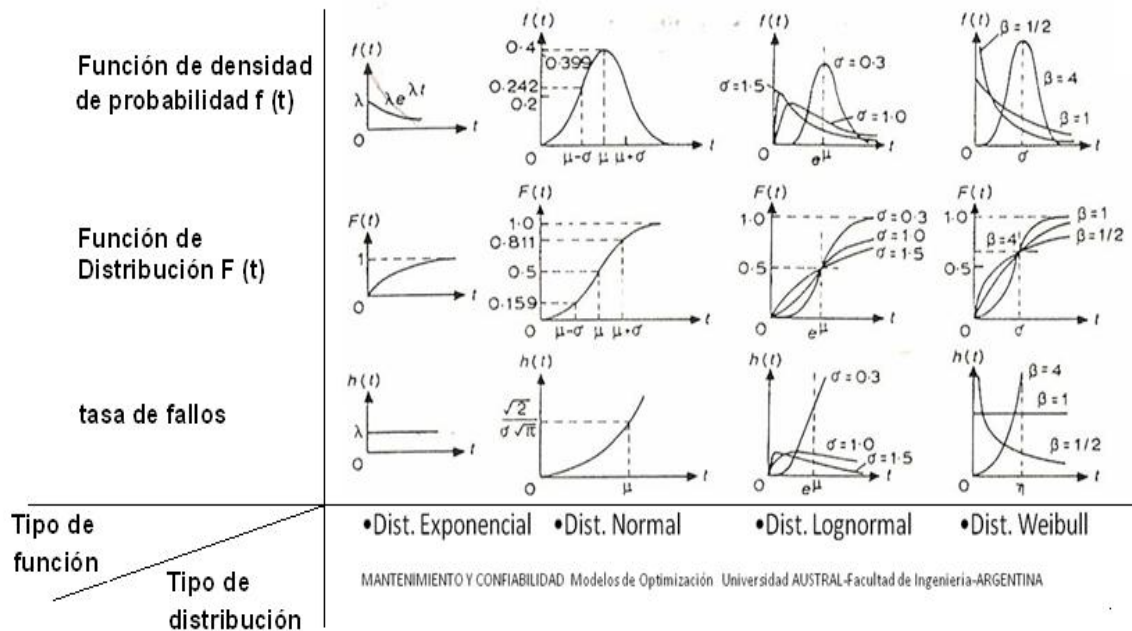
Figura 13. Ciclo de vida de los equipos



Las fallas durante la etapa de arranque, se describen mediante la distribución de Weibull. Durante el periodo de operación normal, la dinámica de las fallas se ajusta a una distribución exponencial. En el periodo de desgaste, las fallas se describen mediante la distribución de Weibull o normal.

Aunque unos pocos elementos de máquinas obedecen a la curva de la bañera, la mayoría en su vida útil tienen una tasa de falla constante la cual se estudiara mediante la distribución exponencial, en caso de ser variable la tasa de fallas se aplicara la distribución de Weibull, la cual se acomoda a cualquier tipo de distribución de la tasa de fallos, en la figura 14 se mostrará las formas que tienen cada una de las funciones, dependiendo del tipo de distribución con el cual se analicen.

Figura 14. Distribuciones frecuentes en el mantenimiento de los equipos o componentes



Fuente: Mantenimiento y Confiabilidad Modelos de optimización. Universidad austral. Argentina 2005

C.3.2 Modelado de la tasa de fallo

Los modelos estadísticos que más comúnmente se utilizan para modelar el tiempo transcurrido hasta el primer fallo son:

- Distribución Exponencial.
- Distribución de Weibull.

Distribución Exponencial: se utiliza para modelar el tiempo transcurrido entre dos sucesos aleatorios no muy frecuentes cuando la tasa de ocurrencia, λ , se supone constante. En confiabilidad se usa para describir los tiempos de fallo de un dispositivo durante su vida útil, cuando a lo largo de ésta la tasa de fallos es (aproximadamente) constante.

$$h(t) = \lambda = \text{cte} \quad (9)$$

Una tasa de fallos constante significa que, para un dispositivo que no haya fallado con anterioridad, la probabilidad de fallar en el siguiente intervalo infinitesimal es independiente de la edad del dispositivo. Por tanto, las etapas de vida útil de los patrones de tasas fallos que presenten un $h(t) = \text{cte}$, se pueden ajustar a una distribución exponencial.

La tasa de fallos λ es el parámetro que caracteriza a esta distribución. Este valor es la inversa del tiempo medio que transcurre hasta el fallo (o entre dos fallos consecutivos, MTBF, si el dispositivo sigue funcionando)

$$\alpha = \text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

Observar, que aquí, α es el parámetro de escala, también llamado vida característica.

- **Función de densidad de probabilidad (Fdp)**

$$f(t) = \lambda * e^{-\lambda * t} \quad 0 < t < \infty, \quad \lambda > 0 \quad (11)$$

- **Función de Distribución F(t)**

$$F(t) = \int_0^t f(u) du = 1 - e^{-\lambda t} \quad (12)$$

- **Función de confiabilidad R(t)**

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (13)$$

- **MTBF**

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (14)$$

Para aplicar estas ecuaciones se desarrolla un ejemplo de un motor eléctrico que tiene una tasa de falla de 1 en 40.000 horas, el MTBF será de 40.000 horas. La tasa de falla para el motor sería de $1/\text{MTBF}$, o 0.000025 (identificada como λ). Conociendo la tasa de falla, la información puede ser aplicada a la función de confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Así, la probabilidad de que el sistema motriz operará a las 50.000 horas será de:

$$R(t) = e^{-(0.000025) * (50000)}$$

$R(t) = 0.287$, o 28.7 por ciento.

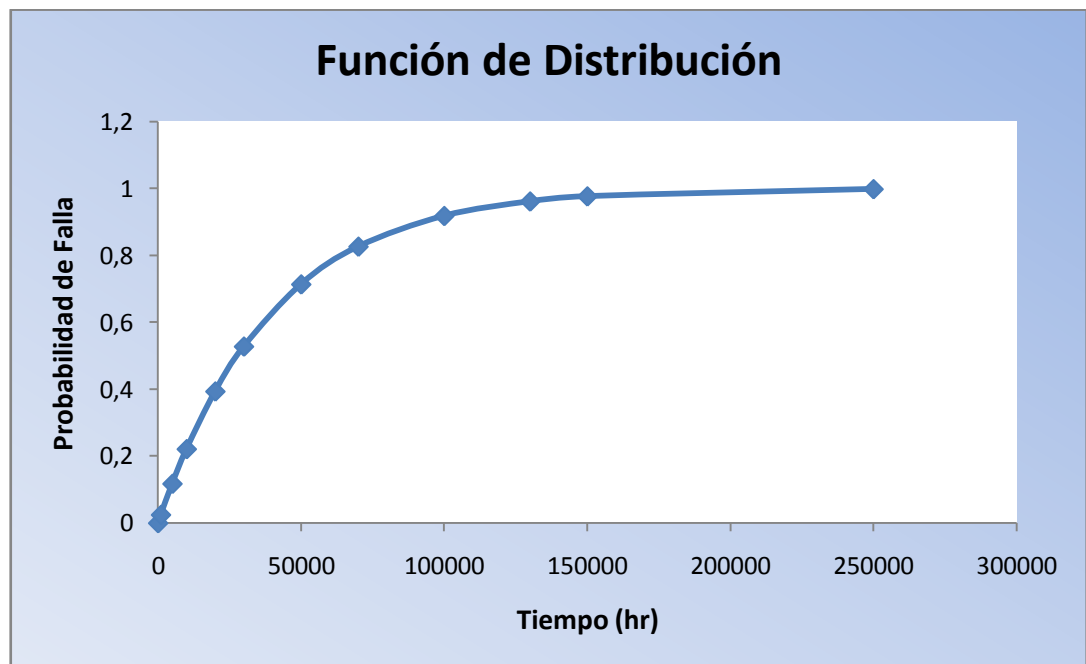
La probabilidad de falla del motor eléctrico sería

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - R(t)$$

La figura 15 muestra la gráfica de la distribución exponencial para el ejemplo.

$F(t) = 0.723$, o 72.3 por ciento

Figura 15. Gráficas de la distribución exponencial para determinar la probabilidad de falla



Distribución de Weibull: El análisis de Weibull es la técnica mayormente elegida para estimar una probabilidad, basada en datos medidos o asumidos. La distribución de Weibull fue descubierta por el sueco Walodi Weibull, fue anunciada por primera vez en un escrito en 1951. La distribución de Weibull es útil por su habilidad para simular un amplio rango de distribuciones como la Normal, la Exponencial, etc. Ésta distribución nos permite estudiar, cuál es la distribución de fallos de un componente que pretendemos controlar, y que a través del registro se observa que los fallos varían a lo largo del tiempo, y dentro de lo que se considera tiempo normal de uso.

Esta técnica es útil para aquellas empresas que desarrollan programas de mantenimiento preventivo de sus instalaciones. La Weibull es tan flexible que, eligiendo adecuadamente sus parámetros, permite describir las tres etapas de la función tasa de fallos (curva de la bañera). Esta distribución viene caracterizada por dos parámetros: α (escala) y β (forma).

- **La función densidad de probabilidad (fdp)**

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} * \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad 0 < t < \infty \quad \lambda > 0 \quad (15)$$

Se observa que cuando $\beta = 1$, basta con tomar $\alpha = 1/\lambda$ para obtener la fdp de la distribución exponencial.

- **Función de Distribución F(t)**

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (16)$$

- **Función de confiabilidad R(t)**

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (17)$$

- **La tasa de fallos**

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (18)$$

1. **Si $\beta < 1$.** La tasa de fallos disminuye con la edad sin llegar a cero, por lo que se puede suponer que la juventud del componente con un margen de seguridad bajo, dando lugar a fallos por tensión de rotura.
2. **Si $\beta = 1$.** La tasa de fallos se mantiene constante siempre, lo que indica una característica de fallos aleatoria o pseudo-aleatoria. En este caso encontramos que la distribución de Weibull es igual a la exponencial.
3. **Si $\beta > 1$.** La tasa de fallo se incrementa con la edad de forma continua lo que indica que los desgastes empiezan en el momento en que el mecanismo se pone en servicio.
4. **Si $\beta = 3,44$.** Se cumple que la media es igual a la mediana y la distribución de Weibull es sensiblemente igual a la normal.

Una forma de estimar los parámetros α y β pertenecientes a la distribución de Weibull es a través de una resolución gráfica. Este procedimiento exige varios pasos y una o dos iteraciones, es relativamente directo y requiere de álgebra sencilla.

Este método utiliza un papel a escala funcional llamado papel de Weibull o gráfico de Allen Plait. En el eje de ordenadas se tiene la linealización de la función distribución acumulativa

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

Es decir:

$$y = \ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \right\} = \beta \ln(t) - \beta \ln(\alpha) \quad (19)$$

Los valores $F(t)$ para el cálculo de los parámetros de Weibull por el método gráfico se obtienen de la tabla 9 que nos da directamente los valores medios clasificados de los fallos o probabilidades acumuladas según el tamaño de la muestra.

Y en el eje de abscisas se coloca el $\ln(t)$.

Entonces, cualquier grupo de datos que sigan la distribución de Weibull se puede representar por una línea recta siendo:

$$y = a - b * x \quad (20)$$

$$a = -\beta * \ln(\alpha) \quad (21)$$

$$b = \beta \quad (22)$$

Ahora se recurre al papel de Weibull ver figura 16 para hallar los parámetros α y β . Para calcular β , es decir, el parámetro de forma que representa la pendiente de la recta, se hace pasar una recta paralela a la recta obtenida con la representación gráfica de los datos por el punto 1 de abscisas y 63,2 de ordenadas pudiendo leer directamente el valor de β en una escala tabulada de 0 a 7.

Para calcular α , es decir el parámetro de escala, basta con encontrar la intersección de la recta trazada con la línea paralela al eje de abscisas correspondiente al 63,2% de fallos acumulados. De esta manera se halla el valor de t correspondiente a la estimación de α .

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{\alpha}{\alpha}\right)^\beta} = 1 - e^{-1} = 0,632$$

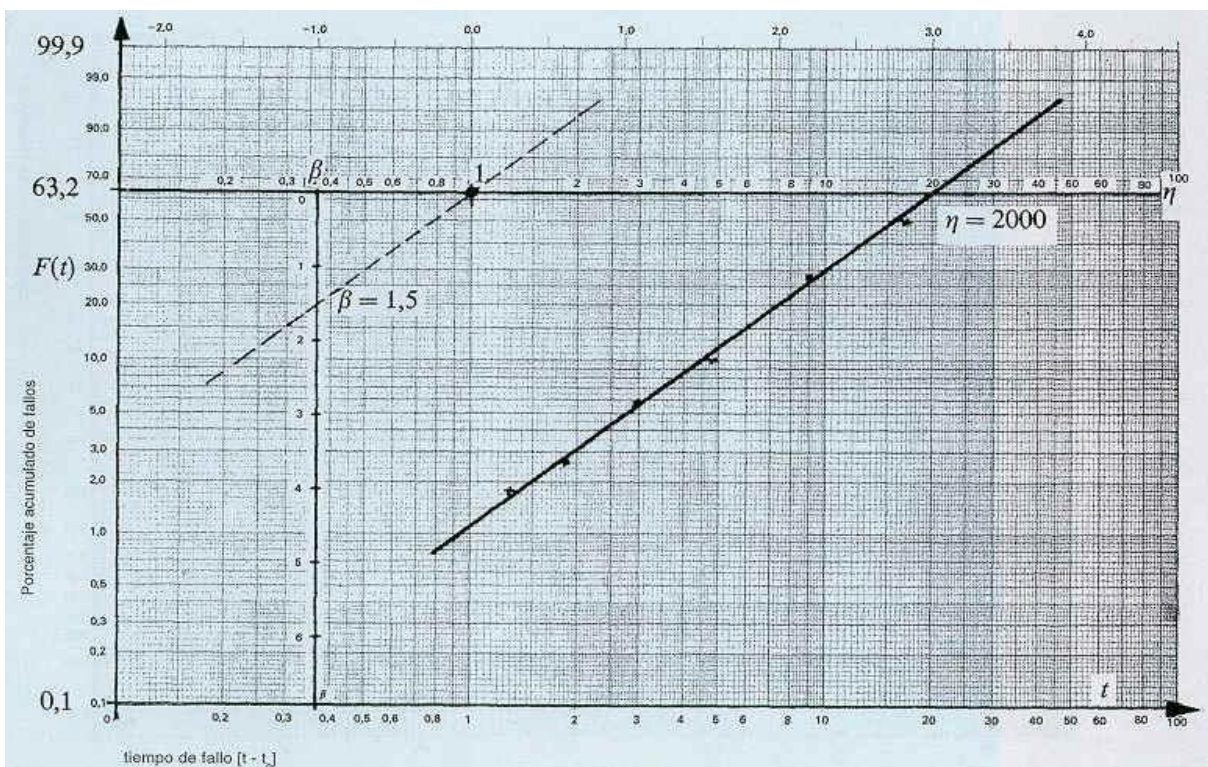
Tabla 9. Valores medios clasificados de fallos en función del tamaño de la muestra (columnas) y del número medio de fallos acumulados (filas)³⁷

j \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N \ j
1	0.5000	0.2929	0.2063	0.1591	0.1295	0.1091	0.0943	0.0830	0.0741	0.0670	0.0611	0.0561	0.0519	0.0483	0.0452	0.0424	0.0400	0.0378	0.0358	0.0341	0.0325	0.0310	0.0297	0.0285	0.0274	1
2		0.7071	0.5000	0.3857	0.3138	0.2645	0.2285	0.2011	0.1796	0.1623	0.1480	0.1360	0.1258	0.1170	0.1094	0.1027	0.0968	0.0915	0.0868	0.0825	0.0786	0.0751	0.0719	0.0690	0.0662	2
3			0.7937	0.6143	0.5000	0.4214	0.3641	0.3205	0.2862	0.2586	0.2358	0.2167	0.2005	0.1865	0.1743	0.1637	0.1542	0.1458	0.1383	0.1315	0.1253	0.1197	0.1146	0.1099	0.1055	3
4				0.8409	0.6862	0.5786	0.5000	0.4402	0.3931	0.3551	0.3238	0.2976	0.2753	0.2561	0.2394	0.2247	0.2118	0.2002	0.1899	0.1806	0.1721	0.1644	0.1573	0.1509	0.1449	4
5					0.8706	0.7356	0.6359	0.5598	0.5000	0.4517	0.4119	0.3785	0.3502	0.3258	0.3045	0.2859	0.2694	0.2547	0.2415	0.2297	0.2189	0.2091	0.2002	0.1919	0.1844	5
6						0.8909	0.7715	0.6795	0.6069	0.5483	0.5000	0.4595	0.4251	0.3954	0.3697	0.3471	0.3270	0.3092	0.2932	0.2788	0.2657	0.2538	0.2430	0.2330	0.2238	6
7							0.9057	0.7989	0.7138	0.6449	0.5881	0.5405	0.5000	0.4652	0.4348	0.4082	0.3847	0.3637	0.3449	0.3280	0.3126	0.2986	0.2858	0.2741	0.2632	7
8								0.9170	0.8204	0.7414	0.6762	0.6215	0.5749	0.5349	0.5000	0.4694	0.4423	0.4182	0.3966	0.3771	0.3594	0.3433	0.3286	0.3151	0.3027	8
9									0.9259	0.8377	0.7642	0.7024	0.6498	0.6046	0.5652	0.5306	0.5000	0.4727	0.4483	0.4263	0.4063	0.3881	0.3715	0.3562	0.3422	9
10										0.9330	0.8520	0.7833	0.7247	0.6743	0.6303	0.5918	0.5577	0.5273	0.5000	0.4754	0.4531	0.4329	0.4143	0.3973	0.3816	10
11											0.9389	0.8640	0.7996	0.7439	0.6955	0.6530	0.6153	0.5818	0.5517	0.5246	0.5000	0.4776	0.4572	0.4384	0.4211	11
12												0.9439	0.8742	0.8135	0.7606	0.7141	0.6730	0.6363	0.6034	0.5737	0.5469	0.5224	0.5000	0.4795	0.4605	12
13													0.9481	0.8830	0.8257	0.7753	0.7306	0.6908	0.6551	0.6229	0.5937	0.5671	0.5428	0.5205	0.5000	13
14														0.9517	0.8906	0.8364	0.7882	0.7453	0.7068	0.6721	0.6406	0.6119	0.5857	0.5616	0.5395	14
15															0.9548	0.8973	0.8458	0.7998	0.7585	0.7212	0.6874	0.6567	0.6285	0.6027	0.5789	15
16																0.9576	0.9032	0.8542	0.8101	0.7703	0.7343	0.7014	0.6714	0.6438	0.6184	16
17																	0.9601	0.9085	0.8617	0.8195	0.7811	0.7462	0.7142	0.6849	0.6579	17
18																		0.9622	0.9132	0.8685	0.8279	0.7909	0.7570	0.7259	0.6973	18
19																			0.9642	0.9175	0.8747	0.8356	0.7999	0.7670	0.7368	19
20																				0.9659	0.9214	0.8803	0.8427	0.8081	0.7762	20
21																					0.9675	0.9249	0.8854	0.8491	0.8157	21
22																						0.9690	0.9281	0.8901	0.8551	22
23																							0.9703	0.9311	0.8945	23
24																								0.9715	0.9338	24
25																									0.9727	25

En la actualidad y con el desarrollo de los programas por ordenador (Software), el cálculo de estos parámetros y las respectivas distribuciones para el equipo en estudio, se realizan de una forma sencilla, solo se necesitan los datos de los tiempos en que el equipo deja de funcionar, es decir los tiempos hasta el fallo de determinado equipo. Se desarrollara un ejemplo mediante uno de los software presentes en el mercado en el cual se trabajará a modo de prueba, en el mercado se encuentran programas que sirven para el cálculo de probabilidad de falla de los equipos como lo son Weibull++ de la corporación RealSoft, Relex 2009, Weibull Analysis de Isograh, SuperSmith Weibull, entre otros.

³⁷ NTP 331: Fiabilidad: la distribución de Weibull

Figura 16. Papel de Weibull para el cálculo de los parámetros α y β



Ejemplo para la aplicación de la distribución de Weibull. La información disponible acerca de la duración de 10 sistemas mecánicos de detectores de presencia sometidos a funcionamiento continuo hasta que se produce un fallo, da los siguientes resultados, expresados por su duración en meses y ordenados:

1,7	3,5	5	6	8	11	13	18	22
-----	-----	---	---	---	----	----	----	----

Calcular los parámetros de Weibull, tipo de fallo, la confiabilidad de forma general, y la probabilidad de falla de forma general.

Utilizando un programa para el cálculo de los parámetros de Weibull introducimos los datos de tiempos de falla como se muestra en la figura 17.

Ahora escogemos el tipo de distribución que queremos calcular, que para nuestro caso es la distribución de Weibull y le damos click en el icono de graficar, como se muestra en la figura 18.

Obtenemos los valores de β y α del programa, y el gráfico de los valores en el papel de Weibull como se muestra en la figura 19

Los valores son:

$$\alpha = 11.0989$$

$$\beta = 1,3550$$

El valor de β nos indica que los tipos de fallo son debidos al desgaste.

La confiabilidad será:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{11.0989}\right)^{1.355}}$$

La probabilidad de fallo será:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{11.0989}\right)^{1.355}}$$

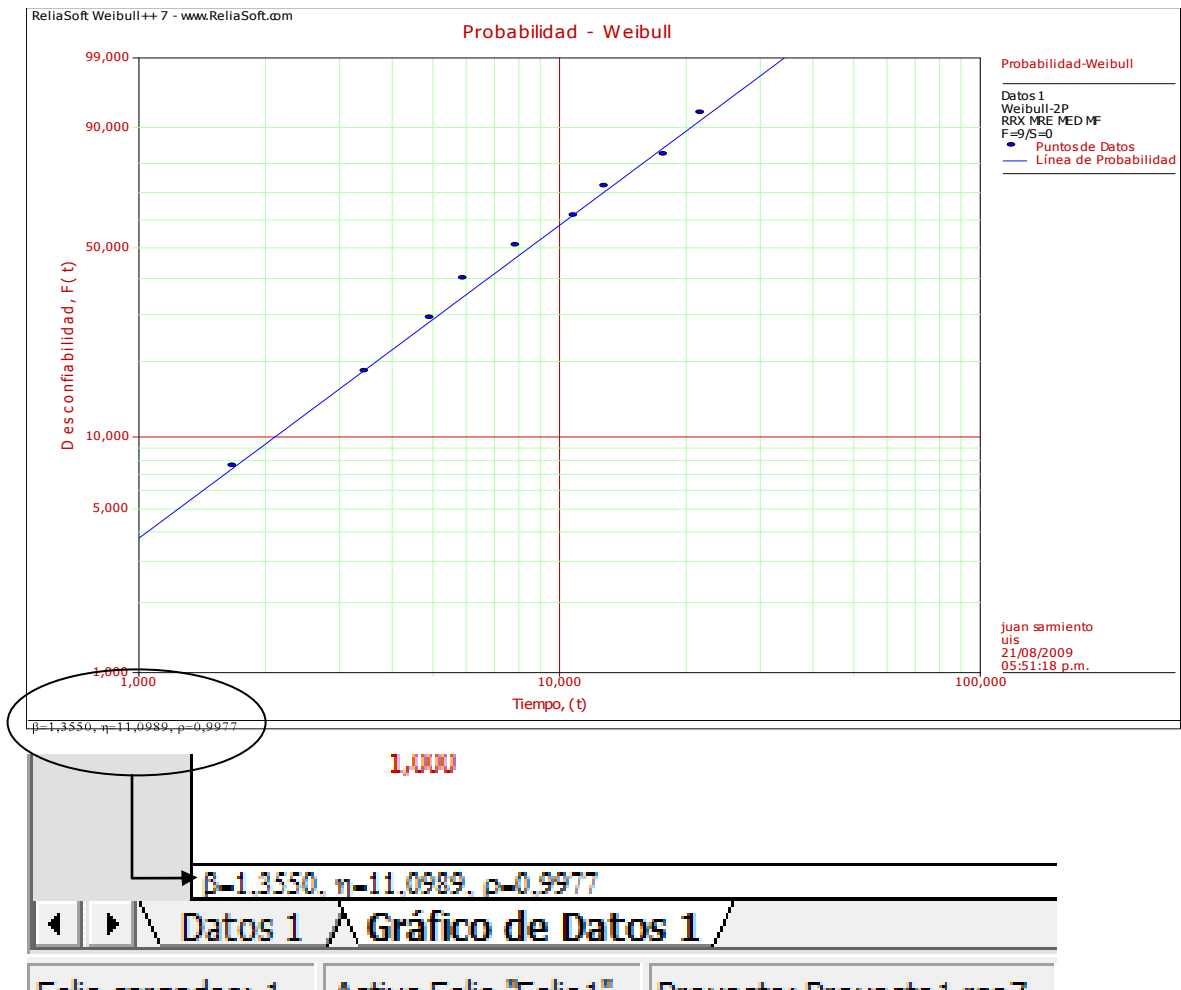
Figura 17. Introducción de datos para el ejemplo

	Tiempo de Falla	ID del Subconjunto
1	1,7	
2	3,5	
3	5	
4	6	
5	8	
6	11	
7	13	
8	18	
9	22	
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		
32		
33		

Figura 18. Proceso para calcular los parámetros de escala α y forma β



Figura 19. Gráfica y obtención de resultados para el ejemplo



C.3.3 Escala de calificación de la probabilidad de fallas.

Una vez obtenidas las probabilidades de falla de los equipos para la empresa en estudio procedemos a realizar una tabla con una escala de calificación cualitativa que se pondera para darle algún valor numérico, este valor dependerá de los objetivos del estudio y del método utilizado para éste, la calificación que se da a cada probabilidad de falla cualitativa se expresa con palabras, por ejemplo alta, media, baja, probable, poco probable, improbable, etc., el resultado de estas calificaciones y ponderaciones se muestran en las tablas 10, 11 y 12 en las que se observa el nivel de probabilidad, su descripción respectiva y el valor numérico de cada calificación.

Cuando no se tienen los recursos técnicos en una empresa, para realizar un estudio estadístico completo de la probabilidad de falla de sus equipos, esta se puede determina por medio de rangos, los cuales serian desde la condición menos favorable hasta la más favorable en funcionamiento de dichos equipos, estos rangos de probabilidad de falla pueden determinarse realizando un estudio de la planta, en base a los equipos que mas fallas presentan, con fallos ocurridos con anterioridad o con datos disponibles de empresas similares, para elaborar la tabla correspondiente para el estudio.

En ocasiones se pueden socializar estas tablas realizando un formato tipo encuesta en la que participarían personal de las áreas involucradas en el estudio las cuales podrían ser operaciones, mecánica, electricidad, instrumentación, estructura, programación, especialistas en proceso, diseñadores, etc., cada uno califica cada equipo con base a esta tabla y se saca un promedio por equipo, donde este será su probabilidad de falla.

Tabla 10. Diferentes tablas de clasificación y ponderación de la probabilidad de falla

NIVEL DE PROBABILIDAD DE LA FALLA	DESCRIPCIÓN	VALOR
Muy baja	La falla ha ocurrido al menos una vez en los últimos 10 años o mas	1
Baja	La falla ha ocurrido al menos una vez en los últimos 5 años	2
Media	La falla ha ocurrido al menos una vez en los últimos 2 años	3
Alta	La falla ha ocurrido al menos una vez en el último año	4

Elaboración de estudios de riesgos Brocardo de J. Montoya B. Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. – ISA

Tabla 11. Diferentes tablas de clasificación y ponderación de la probabilidad de falla

	ALTA		MEDIA		BAJA
FRECUENCIA DE FALLA	Ocurren >4 fallas por año. MTBF < 3 meses	Ocurren entre 1 y 4 fallas por año. MTBF entre 3 y 12 meses	Ocurren entre 0.2 y 1 fallas por año. MTBF entre 1 y 5 años	Ocurren entre 0.1 y 0.2 fallas por año. MTBF entre 5 y 10 años	Menos de 0.1 fallas por año. MTBF > 10 años
VALOR	1	0.9	0.8	0.6	0.4

Estudio de Criticidad de equipos- *Ingeniería de Mantenimiento - STAFF TÉCNICO ABB*

Tabla 12. Diferentes tablas de clasificación y ponderación de la probabilidad de falla

FRECUENCIA DE FALLAS:	VALOR
Pobre, mayor a 2 fallas/año	4
Promedio, 1 – 2 fallas/año	3
Buena, 0.5 – 1 fallas/año	2
Excelente, menos de 0.5 fallas/año	1

The Woodhouse Partnership Limited Woodhouse Jhon. “Criticality Analysis Revisited”

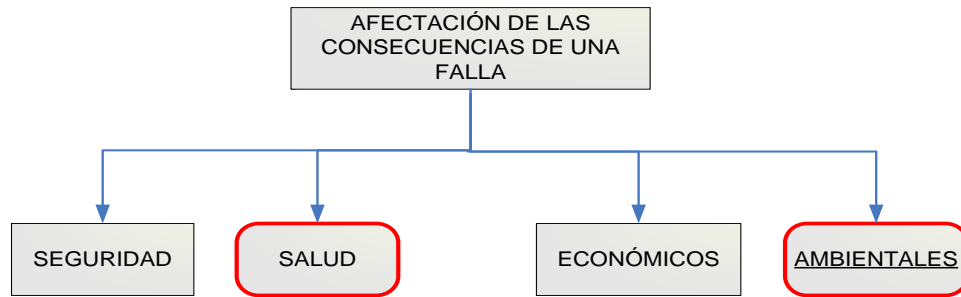
C.3.4 Análisis de las consecuencias

Las consecuencias de determinado fallo en un equipo se podrían clasificar dependiendo de su importancia en:

1. Consecuencias que puedan herir o matar a alguien o incluso si puede provocar efectos serios en el medio ambiente.
2. Consecuencias que interfieran en la producción, que pueden causar daños secundarios o alta afectación económica en la empresa.
3. Consecuencias que no interfieren o muy poca afectación a los objetivos fundamentales de la empresa, puede ocurrir que en la presencia de estos no se realice ninguna acción preventiva y simplemente se corrija el fallo.

Las consecuencias causadas por una falla o la aparición de ésta en un proceso, sistema o equipo se agrupan en estas categorías, las cuales son: Seguridad, Salud, Medio Ambiente y económicas ver figura 20, las cuales afectan los criterios que propiciaron el estudio, aunque cada empresa en particular puede optar por otras (Informático, Importancia del equipo), o analizar las que crea necesarias para economizar recursos y tiempo en el análisis.

Figura 20. Categorías principales afectadas por las consecuencias de una falla



A continuación se dará una breve descripción de cada una de las categorías

– **Seguridad y salud**

La seguridad es una característica de cualquier sistema que nos indica que ese sistema está libre de todo peligro, daño o riesgo, y que es, en cierta manera confiable. Se estudia la seguridad de los procesos, equipos y estándares de operación utilizados en la planta, y la estimación del número de personas que pueden resultar afectadas y en qué medida por determinado fallo (incapacidades temporales o permanentes, pérdida de vidas).

– **Económicos**

Se estimarán los costos totales esperados (producción, operación, mantenimiento o pérdida total), teniendo en cuenta que por lo general cualquier otro recurso afectado, causará impacto sobre el recurso financiero.

Se mira la trascendencia de la falla potencial a nivel local, regional o nacional.

La medida en la que puede ser controlada y cómo afecta el posicionamiento empresarial, la afectación negativa o desfavorable de la imagen corporativa por posibles comentarios o declaraciones de funcionarios o de otras entidades del sector, publicaciones en prensa escrita, informes en televisión, etc.

La indicación de si se espera que haya afectación financiera por lucro cesante, penalizaciones, necesidad de reposición de activos, activación de planes de contingencia o de planes de emergencia, reclamaciones, pago de incapacidades, consecución de reemplazos, pago de indemnizaciones, pago de compensaciones, gastos de transporte y similares.

– **Ambientales**

Impacto ambiental sobre ecosistemas o comunidades indicando tipo de flora, fauna, fuentes de agua, terrenos y comunidades que puedan ser afectadas.

Cantidad de terreno que puede cubrir el siniestro, qué tan severa puede ser la afectación de fuentes de agua (área de contaminación, tiempo para descontaminación, reducción de caudales, desaparición de la fuente), destrucción de ecosistemas, tiempo para el restablecimiento, acciones necesarias para el restablecimiento.

Impacto sobre cultivos y animales domésticos que afecten la sustentabilidad de las comunidades, entre otras.

Otros criterios en los que se pueden evaluar las consecuencias son:

– **Importancia del equipo**

Valorar el costo del equipo, el equipo en la cadena productiva de la planta, si produce parálisis total o parcial o si se puede reemplazar al fallar sin afectar la producción, si funciona con equipo gemelo, si se tiene una o más líneas de producción.

– **Informáticos**

Para los datos (información) se evalúa su importancia teniendo en cuenta si su pérdida implica fácil o difícil recuperación, si la recuperación es total, parcial o no puede hacerse y si se trata de información clasificada como confidencial o estratégica, si se tienen sistemas de copias de seguridad (backup).

El análisis de las consecuencias de fallo se puede basar en modelos físicos; métodos estadísticos; valoración experta o una combinación de todos ellos. La selección del modelo a utilizar depende de las herramientas disponibles.

Las consecuencias en la seguridad se pueden evaluar mediante herramientas de simulación. Existen métodos de referencia (normalmente leyes gubernamentales o regulación) para su validación. Las consecuencias en la salud suelen ser evaluadas mediante valoraciones expertas ya que no existen métodos de referencia para su valoración, en Colombia tenemos en la constitución política art 48. Derecho a seguridad social, ministerio de protección social, código sustantivo

del trabajo, ley 100 de 1993, y normas técnicas colombianas NTC, respectivas para aplicaciones particulares.

En la sección 3.3.3 se vio como las probabilidades de fallo (Pdf) pueden ser calculadas basándose en datos de otras compañías. Sin embargo, este método no suele ser adecuado para evaluar las consecuencias de fallo, debido a que las consecuencias medioambientales, en la seguridad, y económicas dependen de las condiciones de operación, de la distribución y situación de la planta, etc. Por lo tanto no existen modelos o datos genéricos para realizar valoraciones de consecuencias de la falla, sino que depende más del conocimiento interno que se tenga de la planta y del entorno interno y externo.

A continuación se muestran en la tabla 13 como pueden obtenerse los datos necesarios para evaluar las consecuencias de un fallo:

Tabla 13. Obtención de los datos para un análisis de las consecuencias de un fallo

<p>1.Datos históricos</p>	<p>Los fallos y accidentes ocurridos en el pasado pueden ser analizados para obtener históricos de datos, estos pueden ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Genéricos (agrupados en bases de datos) • Estadísticas de la compañía (datos provenientes de la instalación) • Resultados de un “benchmarking” • Datos provenientes de prácticas recomendadas (inspección de equipos, estándar de los equipos) <p>Los datos históricos se pueden utilizar para:</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Determinar directamente las consecuencias de un fallo ❖ Para determinar parámetros para los modelos físicos de Consecuencias de un fallo.
<p>2.Juicios expertos</p>	<p>Las consecuencias de un fallo son evaluadas en cooperación con expertos (Pueden ser expertos de la propia compañía o de fuera de la compañía).</p>
<p>3.Modelos</p>	<p>Desarrollo de un modelo para determinar las consecuencias de un fallo</p>

Javier González. MEJORA EN LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO BASADO EN EL RIESGO (RBM), 2004

Consecuencias en la Seguridad

Un modo de fallo presenta consecuencias en la seguridad cuando provoca una pérdida de funcionalidad u otra circunstancia que pueda herir o matar a alguien.

Existe un sentimiento creciente entre los trabajadores, dirigentes, clientes y entre toda la sociedad en general, de que la muerte o la lesión de alguna persona debido a una actividad industrial no es tolerable. Por tanto, se debe hacer todo lo posible para eliminar cualquier accidente que provoque consecuencias en la seguridad de las personas.

El análisis de consecuencias en la seguridad debe estudiar los diferentes tipos de accidentes potenciales en establecimientos que puedan producir fenómenos peligrosos para las personas.

Los accidentes potenciales se pueden seleccionar a partir de un análisis e identificación de factores de riesgos, estos accidentes podemos clasificarlos como se muestra en la tabla 14, en los siguientes:

Tabla 14 Clasificación de accidentes industriales

• Fugas o derrames incontrolados de sustancias peligrosas: líquidos o gases en depósitos y conducciones
• Dispersión de nubes de gases, vapores y aerosoles
• Evaporación de líquidos derramados
• Incendios de charco o "pool fire"
• Dardos de fuego o "jet fire"
• Deflagraciones no confinadas de nubes de gases inflamables o "UVCE"
• Estallido de depósitos o "BLEVE"
• Explosiones físicas y/o químicas
• Fallos estructurales

Normalmente, un accidente de estos se produce a partir de algún suceso menor que trae como consecuencia la pérdida de estanqueidad de algún recipiente, depósito o tubería que contiene alguna sustancia, lo que produce la fuga o derrame de esta sustancia al exterior. También es posible un incendio previo o

simultáneo a una fuga o incluso, una explosión previa a la fuga o al incendio. No obstante, en la mayoría de los casos el primer suceso consiste en una fuga incontrolada de producto.

Si se trata de algún líquido, se vaporiza total o parcialmente, según cuál sea su volatilidad, temperatura respecto a su punto de ebullición y ésta respecto al ambiente. En el caso de que reste alguna fracción en fase líquida, ésta se extiende al mismo tiempo que se evapora con más o menos intensidad, según su tensión superficial, temperatura sea inferior o superior a la del sustrato sobre el que se extiende.

Si además el líquido es inflamable y dependiendo de punto de inflamación, existe la posibilidad de que, por encontrarse una fuente de ignición en las proximidades del punto de fuga, se produzca un incendio del charco. Si éste es de grandes proporciones, provoca un flujo de calor radiante peligroso hasta distancias apreciables. También se producen grandes cantidades de humo y productos tóxicos y contaminantes.

Si el incendio envuelve o rodea un depósito que contenga algún líquido inflamable bajo presión y dura el tiempo suficiente, puede ocasionar una explosión por expansión de vapor del líquido en ebullición, conocida como BLEVE según su acrónimo inglés "*boiling liquid expanding vapour explosion*". La rotura catastrófica de un depósito, provocando la fuga masiva de una sustancia inflamable, puede originar lo que se denomina bola de fuego, en el caso de que se produzca la ignición de la misma. Por otra parte, una BLEVE genera una serie de proyectiles de todas dimensiones, procedentes del depósito siniestrado que pueden causar graves daños en el entorno si las distancias de seguridad son demasiado pequeñas o las protecciones inadecuadas.

Si el líquido que se derrama es tóxico, su vaporización, puede generar una nube de características tóxicas para las personas que se encuentren en las proximidades del punto de fuga.

Cuando se trata de líquidos inflamables que se evaporan o de fugas de gases más densos que el aire, la nube de gas se diluye en el aire existente, haciendo que en determinados instantes y zonas existan mezclas de combustible y comburente en condiciones de efectuar la combustión. Si en una de estas zonas se encuentra un punto de ignición puede desprenderse la cantidad de calor necesaria para acelerar la velocidad de combustión de forma que se produzca una explosión, denominada explosión de vapor no confinada o UVCE en su acrónimo inglés "Unconfined Vapour Cloud Explosion".

También es posible, si la cantidad premezclada es muy grande, que se produzca una llamarada o "flash fire", sin efectos explosivos, pero con una intensa radiación. Si el gas fugado se halla a alta presión en depósitos o conducciones de gas (gasoductos) se produce un chorro o fuga inercial que ocupa una larga zona muy limitada transversalmente, con concentraciones de la sustancia progresivamente decrecientes al alejarse del origen de la fuga.

En el caso de tratarse de gases inflamables, si se produce ignición, se forma un dardo de fuego o "jet fire" análogo a un soplete de grandes dimensiones, aunque de alcance limitado.

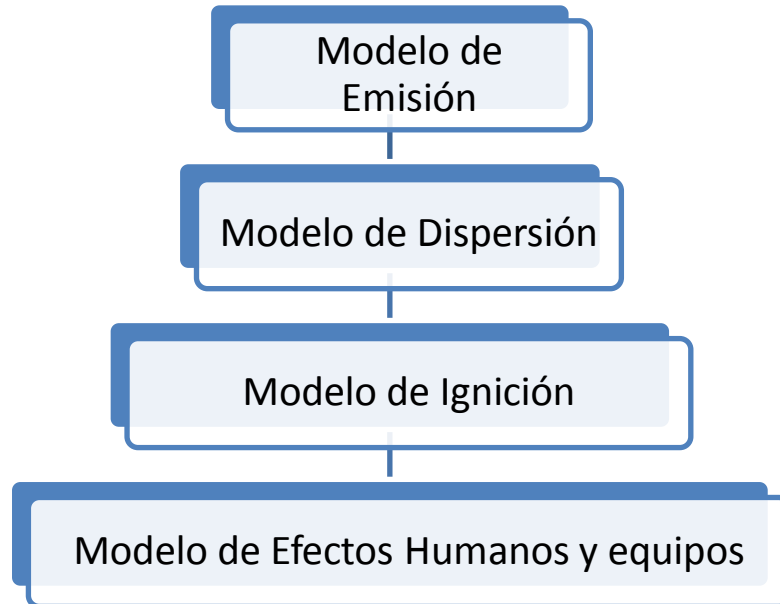
Un fallo estructural, fallo de cimentación, agente externo, incendio, proyectil, etc. pueden causar una rotura catastrófica de un depósito, provocando todos alguno de los fenómenos anteriores, o originar también una bola de fuego caso de producirse la ignición de la misma.

Además de todo esto, existe la posibilidad de que estos fenómenos afecten, además de a los elementos vulnerables exteriores, a otros depósitos, tuberías o equipos de la instalación siniestrada, de tal manera que se produzca una nueva fuga, incendio o explosión en otra instalación diferente de la inicial, aumentando las consecuencias del accidente primario. Esta concatenación de sucesos con la propagación sucesiva de consecuencias es lo que se denomina efecto dominó.

La mayoría de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, comienzan con una fuga de su lugar de confinamiento (depósitos, tuberías, reactores, válvulas, bombas, etc.), por lo que hay que prestar una especial

atención a este fenómeno. En la figura 21 se muestra un modelo de análisis, que se utiliza para una fuga.

Figura 21. Flujo grama para el análisis de una fuga



En la tabla 15 se muestran algunos aspectos que se consideran en este tipo de análisis.

Tabla 15. Aspectos para un análisis de una fuga

• Toxicidad	• Temperatura
• Inflamabilidad	• Velocidad de reacción y propagación
• Masa	• Distancias de afectación
• Presión	• Densidad de afectados
• Flujo	

Los modelos se utilizan para categorizar los equipos en un nivel de distancia de daño entre I y V, como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Clasificación por clases según la distancia y el nivel de mortalidad

Clase	Significado
I	No hay mortalidad, ni siquiera pegado al equipo estudiado
II	X % de mortalidad dentro de A metros (ej. 100 % dentro de 10 metros)
III	X % de mortalidad dentro de B metros (ej. 100 % dentro de 30 metros)
IV	X % de mortalidad dentro de C metros (ej. 100 % dentro de 100 metros)
V	X % de mortalidad dentro de D metros (ej. 100 % dentro de 1000 metros)

Los porcentajes “X %” representan la probabilidad de mortalidad.

Los niveles de distancia de daño se combinan con la densidad de afectados para caracterizar unos niveles de consecuencias de seguridad. Como se muestra en la tabla 17, las categorías se definen en afectación y número de muertes.

Tabla 17. Consecuencias según la seguridad

CONSECUENCIAS	
NIVEL	SEGURIDAD
1	Sin efectos/ ningún herido
2	Heridos leves/ Tratamiento médico
3	Lesiones leves con hospitalización
4	Lesiones importantes con daños irreversibles
5	Discapacidad total permanente /De 1 a 3 víctimas mortales
6	Múltiples víctimas mortales

Para los tipos de fenómenos que se muestran en la tabla 18 se debe diseñar un método de análisis similar al desarrollado para fugas.

Tabla 18. Otros fenómenos para análisis de las consecuencias

Ruido	Corriente eléctrica
Vibraciones	Daños mecánicos
Corrosión	Agentes biológicos
Inclencias del medio ambiente	Procesos antrópicos
Desgaste	

Consecuencias en la Salud

Para la evaluación de las consecuencias en la salud, no existe un modelo similar al presentado en el caso del análisis de seguridad, estas consecuencias están determinadas por regulaciones locales o nacionales. En Colombia está el ministerio de protección social, quien es la entidad que fija las políticas que propendan por el ingreso de las personas al mercado laboral, a la previsión social y a las redes de protección social, y diferentes Normas Técnicas colombianas NTC para cada fenómeno en particular entre los cuales tenemos los enunciados en la tabla 18. Y otros como exposición a calor, polvos, fundidores, soldadores, etc. En la tabla 19, se muestra una escala de clasificación y afectación para la salud.

Tabla 19. Consecuencias para la Salud

CONSECUENCIAS	
NIVEL	SALUD
1	Sin efectos
2	Posibilidad de problemas de salud temporales
3	Posibilidad de problemas de salud permanentes
4	Mucha probabilidad de problemas de salud permanentes
5	Mucha probabilidad de problemas de salud permanentes con alguna víctima mortal
6	Mucha probabilidad de problemas de salud permanentes con múltiples víctimas mortales

Consecuencias en el Medio Ambiente

Un modelo para la evaluación de las consecuencias medioambientales que provoca un evento debería tener en cuenta tabla 20.

Tabla 20. Aspectos a tener en cuenta para evaluar las consecuencias medioambientales

Los efectos a largo plazo de las emisiones	Tierra
Características de la sustancia emitida	Aire
Cantidad de sustancia (masa) liberada	Agua (ríos, mares)
Tiempo de exposición	Humedales
Posibilidad de mediación	Paramos
Área afectada	Flora
Tiempo de descomposición de la sustancia en el ambiente	Fauna
Desplazamientos de especies	Humanos

Las consecuencias medioambientales se pueden analizar considerando los costos asociados a las emisiones: costos por multas y correcciones.

Las multas se pueden considerar como el costo del daño medioambiental que la sociedad define.

Las emisiones podrían también tener graves consecuencias de marketing e imagen corporativa, las cuales también deben ser incluidas en la evaluación de las consecuencias medioambientales. En Colombia podemos adquirir la Certificación de Sistemas de Gestión Medioambiental bajo la norma ISO 14001, con la cual mitigaríamos las consecuencias medioambientales. La tabla 21 muestra una escala de clasificación y afectación para el medio ambiente.

Tabla 21. Consecuencias según el daño al medio ambiente

CONSECUENCIAS	
NIVEL	Medio ambiente
1	Sin efectos
2	Ligero daño dentro de una zona controlada
3	Ligero daño, con una infracción o denuncia
4	Efectos significativos con repetidas infracciones y muchas denuncias
5	Efectos importantes con infracciones prolongadas y daños generalizados
6	Efectos masivos con daños severos persistentes

Consecuencias Económicas

Las consecuencias económicas pueden calcularse según la siguiente expresión:

$$\text{Consecuencia de la falla}_{Economicas} = C_{pp} + C_p + C_s + C_l \quad (23)$$

Donde:

C_{pp} = Costos indirectos (reputación en el mercado, imagen, perdida de ventas, multas, sanciones, indemnizaciones, etc.)

C_p = Costo por fallo secundario (daños sobre otros elementos, otros equipos, sobre las estructuras alrededor)

C_s = Costo por fallo primario (daño sobre el elemento que ha fallado)

C_l = Coste por pérdida de producción

La tabla 22 muestra una escala de clasificación para las consecuencias económicas en la empresa.

Tabla 22. Consecuencias según las pérdidas económicas

CONSECUENCIAS	
NIVEL	Económicas
1	< 1.000 K \$
2	1.000 – 10.000 K \$
3	10.000 – 25.000 K \$
4	25.000 – 50.000 K \$
5	50.000 – 250.000 K \$
6	>250.000 K \$

Los costos se dan en pesos colombianos.

C.4 MODELOS PARA CÁLCULO DE CRITICIDAD

Una vez obtenida la información y elaboradas las tablas para los criterios seleccionados, se procede a determinar el nivel de criticidad de cada equipo o proceso en la respectiva planta, para obtener la lista jerarquizada o una matriz de criticidad de los equipos. En esta investigación, se estudiarán tres métodos para

análisis de criticidad, el Método de factores ponderados basados en el concepto de riesgo; El método de MONCHY FRANCOIS y el estudio de la firma DATABANK MKS LTDA. a la empresa ECOPETROL S.A. regional norte y magdalena medio.

C.4.1 Método de Factores Ponderados Basados en el Concepto del Riesgo

La metodología de análisis de criticidad basada en el concepto de Riesgo, combina la probabilidad de ocurrencia de las fallas con sus consecuencias. Como resultado se puede elaborar un programa de inspección destinado a definir, cuantificar y controlar los riesgos asociados a fallas en los equipos, fijando prioridades y frecuencias de inspección, para una mayor comprensión de este método se recomienda repasar el anexo B Riesgo en operaciones técnicas de equipos.

Recordemos que el riesgo se expresa según la ecuación (1):

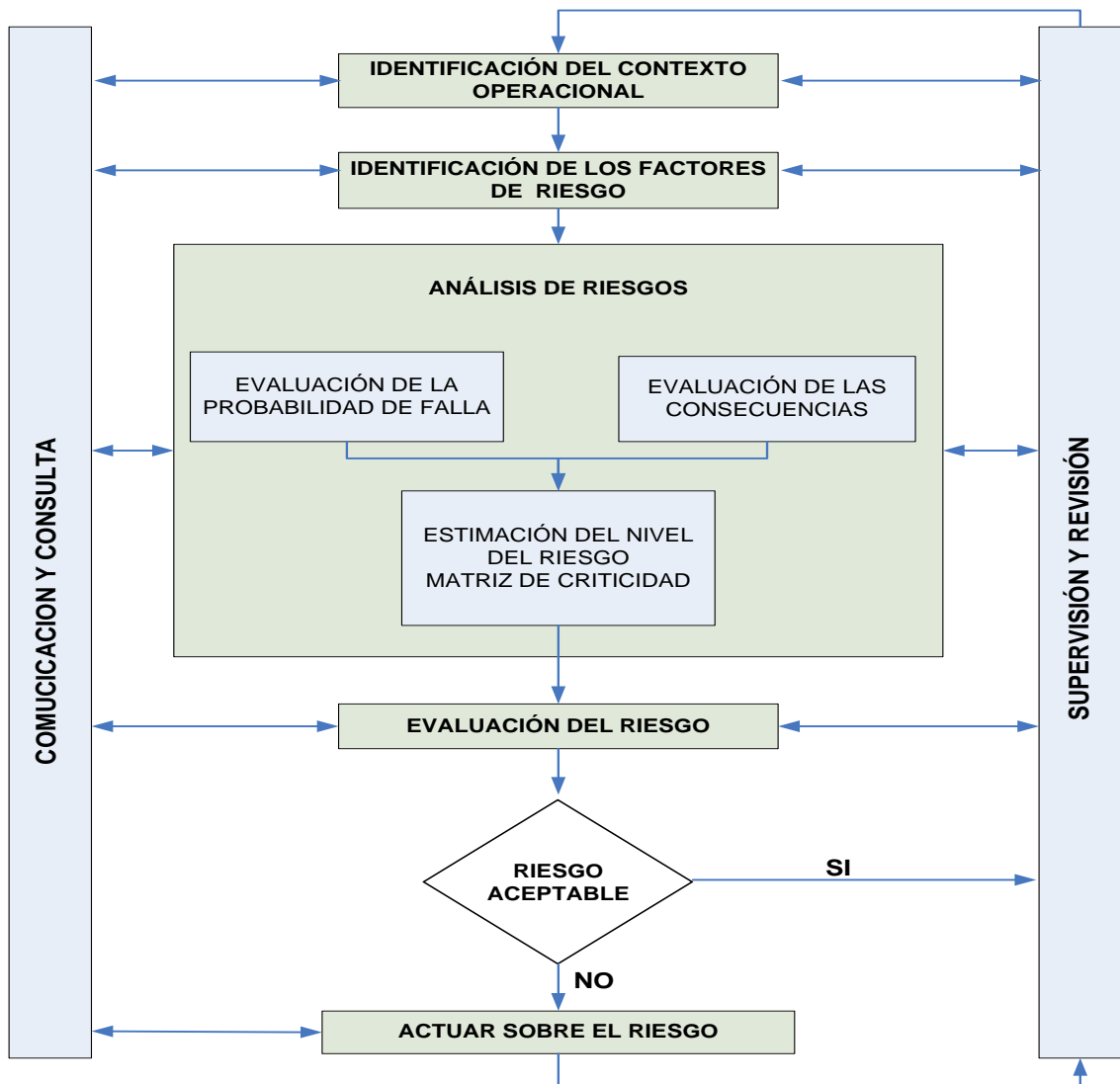
$$Riesgo(t) = Probabilidad\ de\ Falla * consecuencias\ de\ la\ falla$$

Usando esta metodología se puede hacer una estimación del riesgo causado por fallas y sus consecuencias por medio de funciones de probabilidad, en la figura 22 se muestra un modelo general para el análisis de criticidad basada en el concepto del riesgo.

La primera parte del modelo, la identificación del contexto operacional y la identificación de los factores de riesgo se desarrolló en el anexo B Riesgo en operaciones técnicas de equipos, para el estudio de criticidad basado en el concepto del riesgo se estudiarán los riesgos asociados a las fallas y se evaluará su probabilidad de falla y sus consecuencias.

En el anexo B se mostró como identificar el contexto operacional, las funciones y los factores de riesgo (modos de fallo). Una vez se hayan identificado los modos de fallo (para los componentes activos) y los mecanismos creíbles de degradación para los componentes estáticos, el primer paso en la evaluación del riesgo es determinar la probabilidad de fallo (Pdf).

Figura 22. Modelo de factores ponderados basados en el concepto del riesgo



El análisis de probabilidad de falla debe abarcar todos los mecanismos potenciales de falla a los cuales es susceptible el equipo que se está estudiando. Además, debe incluir la situación donde el equipo está susceptible a múltiples mecanismos de deterioro.

Una aplicación de este método fue desarrollada por un grupo de consultoría inglesa denominado: The Woodhouse Partnership Limited [Woodhouse Jhon. "Criticality Analysis Revisited", The Woodhouse Partnership Limited, Newbury, England 1994].

Este es un método bastante sencillo y práctico, soportado en el concepto del riesgo. A continuación se presenta de forma detallada la expresión utilizada para calcular la criticidad:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia o tasa de falla} * \text{consecuencia de la falla} \quad (24)$$

$$\text{Frecuencia} = \text{rango de fallas en un tiempo determinado} \left(\frac{\text{fallas}}{\text{año}} \right)$$

Consecuencias

$$= [(\text{impacto operacional} * \text{flexibilidad}) + \text{costos de mantenimiento} + \text{impacto seguridad, ambiente e higiene}]$$

En las tablas 23, 24, 25, 26 y 27 se presentan los factores ponderados de cada uno de los criterios a ser evaluados por la expresión del riesgo.

Tabla 23. Frecuencia de fallas

FRECUENCIA DE FALLAS	VALOR
• Pobre, mayor a 2 fallas/año.	4
• Promedio, 1 – 2 fallas/año.	3
• Buena, 0.5 – 1 fallas/año.	2
• Excelente, menos de 0.5 fallas/año.	1

Tabla 24. Impacto operacional

IMPACTO OPERACIONAL	VALOR
• Perdida de todo el despacho.	10
• Parada del sistema o subsistema y tiene repercusión en otros sistemas.	7
• Impacta en niveles de inventario calidad.	4
• No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción.	1

Tabla 25. Flexibilidad operacional

FLEXIBILIDAD OPERACIONAL	VALOR
• No existe opción de producción y no hay función de repuesto.	4
• Hay opción de repuesto compartido/almacén.	2
• Función de repuesto disponible.	1

Tabla 26 Costos de Mantenimiento

COSTOS DE MANTENIMIENTO	VALOR
• Mayor o igual a 20'000.000 \$	2
• Inferior a 20'000.000 \$	1

El valor del costo esta dado en pesos colombianos.

Tabla 27. Impacto en Seguridad, Ambiente e Higiene

IMPACTO EN SEGURIDAD, AMBIENTE E HIGIENE	VALOR
• Afecta la seguridad humana tanto externa como interna y requiere la notificación a entes externos de la organización.	8
• Afecta el ambiente/instalaciones.	7
• Afecta las instalaciones causando daños severos.	5
• Provoca daños menores (ambiente-seguridad).	3
• No provoca ningún tipo de daños a personas, instalaciones o al ambiente.	1

El máximo valor de criticidad que se puede obtener a partir de los factores ponderados evaluados es de 200.

Para obtener el nivel de criticidad de cada sistema se toman los valores totales individuales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias y se ubican en la matriz de criticidad - valor de frecuencia en el eje Y, valor de consecuencias en el eje X. La matriz de criticidad mostrada en la figura 23 permite jerarquizar los sistemas en tres áreas como se muestran a continuación.

Área de sistemas No Críticos (NC): Son los equipos que en caso de fallar no repercutirán de manera importante en el proceso productivo.

Área de sistemas de Media Criticidad (MC): Son los equipos que en caso de fallar afectan levemente el sistema productivo, ya sea en la calidad del producto o en la eficiencia del proceso, pero permite lapsos relativamente largos para reparar la avería.

Área de sistemas Críticos (C): Son los equipos que al fallar ocasionan el paro de la cadena productiva o de un subsistema y por lo tanto su reparación es de carácter urgente.

Figura 23. Matriz de criticidad

FRECUENCIA	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

El método presentado es flexible, se pueden modificar los criterios mostrados en las tablas y la ponderación dada a estos dependiendo del contexto operacional de la empresa a la cual se le realice el estudio, por lo que se debe estudiar primero si el modelo presentado para desarrollar el método se adecuada a los objetivos planteados o hay que realizarle algunas modificaciones para su utilización.

C.4.2 Método según estudio de DATANBANK MKS Ltda.

El método que se presenta fue desarrollado por la firma DATABANK MKS Ltda. ha ECOPETROL S.A. el cual se basa en la norma ISO 14224.

Se desarrollo para determinar los equipos críticos en sus plantas de Magdalena Medio y Norte.

La metodología está definida por 3 criterios que evalúan la importancia, la confiabilidad y el impacto del equipo dentro del sistema con su respectiva escala de valoración como se muestra en las tablas 28, 29 y 30.

Tabla 28. Importancia del equipo dentro del sistema

VALOR	A - Importancia del equipo dentro del sistema
1	Puede causar riesgo en seguridad, violación ambiental.
2	Puede causar impacto económico negativo significativo. Pérdida de producción
3	Puede reducir las ratas de producción, recuperación o calidad de producción.
4	Puede causar demandas incrementadas sobre el personal operativo pero ningún impacto en seguridad, medio ambiente o producción.
5	No tiene importancia con respecto a la seguridad, medio ambiente o producción y no incrementa las demandas sobre el personal operativo.

Tabla 29. Confiabilidad inherente del equipo

VALOR	B - Confiabilidad inherente del equipo
1	Extremadamente confiable. Normalmente no tiene partes en movimiento, servicio limpio.
2	Muy confiable. Pocas partes en movimiento, servicio ligeramente sucio.
3	Normalmente confiable. Más partes en movimiento / desgaste, servicio más severo.
4	De algún modo no confiable. Sistema complejo, servicio muy sucio, cargado fuertemente.
5	No confiable

Tabla 30. Impacto del equipo en el sistema

VALOR	C- Impacto del equipo en el sistema
1	Causa paro total del sistema.
2	Causa reducción a largo plazo en el desempeño de un sistema. No tiene instalado equipo de respaldo. Tiempo de reparaciones o reemplazo significativo.
3	Causa reducción a corto plazo en el desempeño del sistema. Tiene instalado equipo de respaldo. Puede ser reparado rápidamente
4	Puede operar bypassado o en manual, sin pérdida de desempeño del sistema. Se encuentra en servicio intermitente.
5	No tiene efecto de desempeño del sistema.

Una vez elaboradas las tablas donde se describen los criterios para evaluar la criticidad con sus respectivos valores se procede a realizar la consulta, es decir la recolección de información para establecer la criticidad de equipos.

Según la norma ISO 14224, se realizó el formato tabla 31 para evaluar el rating de criticidad de los equipos, ésta se debe entregar totalmente diligenciada lo que se refiere al equipo, pero se deja el espacio para que el operador o encargado del proceso evaluara el rating de criticidad. (La importancia A, confiabilidad B, impacto C fueron explicadas con anterioridad)

Tabla 31. Formato para la evaluación del rating de cada criterio

			EVALUACIÓN RATING		
			IMPORTANCIA	CONFIABILIDAD	IMPACTO
SECCIÓN	TAG EQUIPO	DESCRIPCIÓN	A	B	C

Después de recolectar las tablas por secciones se evaluó el rating con la siguiente fórmula:

$$CE = (0.275) * (11.2 - A^{1.5}) * \sqrt{(B^{1.1} + (6 - C)^{1.2})} \quad (25)$$

Donde:

- CE es la Categoría del Equipo
- A es la Importancia del Equipo en el Sistema
- B es la Confiabilidad Inherente
- C Impacto del Equipo en el Sistema

Los valores de A, B y C son obtenidos de las tablas 28, 29 y 30.

Los tipos de equipos que se presenta son según la ecuación 25, categoría del equipo son:

Equipos de propósito general. Son aquellos que en el momento de falla no repercuten en la producción de la empresa, tiene un CE

$$0 < CE < 4 \quad (26)$$

Equipos esenciales. Son aquellos que en el momento de la falla tiene poca afectación en el sistema, permitiendo un periodo prolongado para su reparación, tiene un CE

$$4 \leq CE < 6 \quad (27)$$

Equipos Críticos. Son aquellos que en el momento de la falla, tiene un gran impacto en la producción y debe ser intervenido inmediatamente, tiene un CE

$$6 \leq CE \quad (28)$$

C.4.3 Método elaborado por Monchy Francois

Con el fin de determinar el grado de importancia de los equipos empleados en el proceso de las Industrias se siguió la metodología del análisis de criticidad mediante el método elaborado por MONCHY FRANCOIS³⁸. El cálculo de este índice, consiste en elaborar una tabla en la cual se establecen un conjunto de criterios, a los que se les asigna un valor y un coeficiente de ponderación establecidos por la empresa. La mayor prioridad estará determinada por el mayor valor obtenido de sumar los puntos, multiplicados por el coeficiente de ponderación.

Los criterios para realizar el análisis de criticidad en cada uno de los equipos se basa en los siguientes aspectos: Intrínseco del Material, Explotación, Mantenimiento y Económico, en las tablas 32, 33, 34, 35, 36 y 37 se muestran la calificación por niveles, la descripción de cada calificación y su valor ponderado, en la tabla 38 se muestra los valores del coeficiente de ponderación y su descripción.

³⁸ MONCHY, Francois. Teoría y Práctica del mantenimiento Industrial. Barcelona: Masson, S.A., 1990.

- INTRÍNSECO DEL MATERIAL

Tabla 32. Complejidad tecnológica CT

NIVEL	COMPLEJIDAD TECNOLÓGICA CT	VALOR
Simple	Componentes mecánicos	0
Compleja	Componentes Hidráulicos, Neumáticos y Eléctricos	1
Muy compleja	Equipos Térmicos, Electrónicos y Mecatrónicos	2

- EXPLOTACIÓN

Tabla 33. Importancia del equipo en el proceso IM

NIVEL	IMPORTANCIA DEL EQUIPO IM	VALOR
Secundario	Equipo prescindible	0
Principal	Puede sustituirse por otro	1
Vital	Ningún Equipo lo puede reemplazar	3

Tabla 34. Funcionamiento FM

NIVEL	FUNCIONAMIENTO FM	VALOR
Esporádica	Tiempo de funcionamiento 30% de la producción.	0
Intermitente	Tiempo de funcionamiento más del 60% de producción.	1
Continua	Tiempo de funcionamiento superior al 90% de la producción	2

- MANTENIMIENTO

Tabla 35. Costo de mantenimiento CM

NIVEL	COSTO DE MANTENIMIENTO CM	VALOR
Bajos	Hasta \$5'000.000 en el año	0
Medios	De \$5'000.000 hasta \$20'000.000 en el año.	1
Elevados	Superior a \$20'000.000 en el año	2

- **ECONÓMICO**

Tabla 36. Valor de reemplazo por uno idéntico RE

NIVEL	VALOR DE REEMPLAZO POR UNO IDÉNTICO RE	VALOR
Poco costoso	Menor a \$ 20'000.000	0
Costoso	Entre \$ 20'000.000 y \$ 100'000.000	1
Muy Costoso	Superior a \$ 100'000.000	2

Tabla 37. Costos indirectos CI

NIVEL	COSTOS INDIRECTOS CI	VALOR
Bajos	Capacitación Básica.	0
Medios	Capacitación Especializada.	1
Elevados	Montaje y Adecuación de Instalaciones	2

- **COEFICIENTE DE PONDERACIÓN**

Tabla 38. Coeficiente de ponderación CP

COEFICIENTE DE PONDERACIÓN CP	VALOR
Equipo auxiliar, proceso adjunto, equipos con duplicado.	1
Equipos de Importancia Media, de apoyo a la producción, única existencia.	2
Equipos de importancia vital para el proceso, de única existencia, sin reemplazo	3

El índice de Criticidad resulta de la suma de todos los factores multiplicados por el coeficiente de Ponderación, así:

$$\text{Índice de Criticidad} = (CT + IM + FM + CM + RE + CI) * CP \quad (29)$$

La evaluación permite obtener una prioridad sobre los equipos que se deben atender y mantener con la mayor confiabilidad posible de operación

ESCALA DE CRITICIDAD SEGÚN EL MÉTODO DE MONCHY

- Equipos No críticos: equipos con criticidad menor a 11
- Equipos medianamente críticos: Equipos con criticidad entre 12 y 16.
- Equipos críticos: Equipos con criticidad mayor a 17.

ANEXO D

D. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTOS Y SU CRITICIDAD FMECA

Por sus siglas en Ingles; Failure, Modes, Effects and Criticality Analysis, FMECA Análisis de Modos de Falla, Efectos y su Criticidad es una herramienta metódica avanzada para identificar y analizar todos los modos potenciales y reales de falla de las diferentes partes de un sistema, los efectos que estas fallas pueden tener sobre el sistema, y las acciones correctivas, preventivas, modificativas capaces de eliminar y/o controlar las consecuencias de éstas sobre el sistema³⁹. Esto como resultado de dos procesos principales: el Análisis cualitativo De Modos y Efectos de Falla (FMEA) y el Análisis cualitativo o cuantitativo de Criticidad (CA)

FMECA es una de esas herramientas prácticas que surgieron producto de la nueva exigencia de mantenimiento, y aunque sus inicios datan de 1949, la masificación de su uso en la gestión del mantenimiento y la estandarización de esta metodología se debe propiamente al enfoque integral de mantenimiento hacia la gestión de activos.

D.1 ANTECEDENTES

FMECA, fue una de las primeras técnicas sistemáticas para análisis de falla. Desarrollada por el ejército de U.S.A. durante la segunda guerra mundial para evaluar la confiabilidad y para determinar el efecto de los modos de falla de los sistemas y/o equipos en el éxito de la misión y la operación segura para el personal y los equipos. La primera pauta fue el procedimiento militar MIL-P-1629.

³⁹ MORA GUTIÉRREZ, Alberto; Mantenimiento Estratégico Para Empresas Industriales o de Servicios. 2007 AMG, Colombia (212)

Con fecha del 9 de noviembre de 1949 titulado "Procedimiento para la Ejecución de un Modo de Falla, Efectos y Análisis de criticidad"⁴⁰.

Superando de lejos las expectativas del procedimiento, y convirtiéndose en una herramienta de gran valor para la toma de decisiones en las fuerzas armadas estadounidenses, en 1988 la industria automotriz; en su afán de ceñirse a los parámetros establecidos por la Organización Internacional para la Estandarización en la serie ISO 9000 para la gestión y aseguramiento de la calidad, desarrolla la norma para el sistema de gestión de la calidad QS 9000, el cual plantea que los proveedores automotrices deben emplear Planeación de la Calidad del Producto Avanzada (APQP), para lo cual debe ejecutarse FMECA de diseño y de proceso, así como también un plan de control⁴¹, esto los lleva a desarrollar en 1993 la norma FMECA para su implementación.

En la actualidad es la técnica más ampliamente utilizada para el análisis de confiabilidad en diversas áreas de una gran variedad de empresas a nivel mundial, tanto para procesos como para diseño, ya sea para la etapa conceptual de éste o durante su desarrollo.

D.2 OBJETIVOS AL APLICAR FMECA

En primera medida el objetivo general al aplicar FMECA es evitar, reducir, eliminar y/o controlar las consecuencias de los diferentes modos de falla, para lograr preservar un equipo en un estado tal que pueda realizar una función requerida en un tiempo determinado bajo unas condiciones establecidas, lográndose de esta manera grandes ahorros en mantenimiento, lo cual se consigue al plantearse los siguientes objetivos específicos:

⁴⁰ HIDALGO MASCORRO, Armando; Manual de AMEF

⁴¹ KRASICH, Milena, Bose Corporation; Can Failure Modes and Effects Analysis Assure a Reliable Product?

- Ayudar a seleccionar alternativas del diseño con alta confiabilidad y alto potencial de seguridad durante la fase inicial del diseño.
- Asegurar que todos los modos de falla concebibles y sus efectos en la operación del sistema han sido considerados.
- Permitir jerarquizar las fallas potenciales e identificar la severidad de sus efectos.
- Proporcionar la documentación histórica para la referencia de estudios futuros
- Proporcionar una base para el planeamiento del mantenimiento
- Proporcionar una base para el análisis cuantitativo de confiabilidad y disponibilidad.

D.3 ¿CUÁNDO APLICAR FMECA?

El mejor momento para aplicar FMECA es en el proceso de diseño de sistemas, productos y procesos, cuando se es capaz de tener un impacto más grande sobre la confiabilidad del equipo, pero su uso no está restringido sólo a esta etapa, también es apropiado aplicar esta metodología; siempre y cuando se conozca la causa de todos los modos de falla reales y/o potenciales y sus efectos, en los siguientes casos específicos:

- Al cambiar los diseños o procesos existentes o que serán usados para realizar funciones diferentes o en un contexto operacional diferente.
- Después de completar la Solución de Problemas (con el fin de evitar la incidencia de los mismos).
- Durante la fase de mortalidad infantil de un equipo, para erradicar fallas sucesivas recurrentes debidas a defectos de diseño o montaje, calidad del material o métodos inadecuados de mantenimiento.
- Durante la fase de tasa de falla constante o aleatoria, para eliminar fallas de origen de procedimiento técnico.

- Cuando se ha optado por convivir con la falla y se requiere ampliar el tiempo medio entre mantenimientos planeados⁴².

D.4 TIPOS DE FMECA

- FMECA de Diseño: se lleva a cabo para eliminar fallas durante la etapa de diseño del equipo, considerando todos los tipos de fallas durante toda la vida útil del equipo.
- FMECA de Proceso: se centra en los problemas derivados de cómo fue la fabricación del equipo, cómo éste es operado y cómo éste es mantenido.
- FMECA de Sistema: busca problemas y embotellamientos potenciales en procesos más grandes, tales como líneas de montaje enteras.

D.5 NORMAS PARA FMECA

- MIL-STD 1629 "Procedimientos Para La Ejecución De Un Análisis De Modo De Falla Y De Sus Efectos " publicado por el departamento de defensa de Los Estados Unidos de América. La norma establece los requerimientos y procedimientos para la ejecución de un modo de falla, sus efectos y análisis de criticidad. Se presenta FMECA para evaluar sistemáticamente y documentar el impacto de cada falla funcional en el éxito de las misiones, la operación segura para el personal y los equipos, desempeño del sistema, mantenibilidad y requerimientos de mantenimiento⁴³.
- IEC 60812 "Procedimientos para el análisis de modos de fallos y los efectos (FMEA)". Publicada por la Comisión Internacional Electrotécnica. Describe un análisis de modos de falla y sus efectos incluyendo o no análisis de criticidad. Este estándar da una guía de cómo se pueden alcanzar los objetivos del

⁴² MORA GUTIÉRREZ, Alberto; Mantenimiento Estratégico Para Empresas Industriales o de Servicios. 2007 AMG, Colombia

⁴³ MIL-STD-1629, Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis; Department of Defense, 1998.

análisis cuando se utiliza FMEA o FMECA como una herramienta de análisis de riesgo. Incluye información como:

- El procedimiento paso a paso para llevar a cabo un análisis.
 - Definición e identificación de los términos apropiados.
 - Determinación de los principios básicos.
 - La matriz de criticidad para evaluar los efectos de cada modo de falla⁴⁴
- SAE J1739 "Análisis de modo potencial de falla y sus efectos en el diseño (FMEA de Diseño), Análisis de modo potencial de falla y sus efectos en el procesos de fabricación y montaje (FMEA de Proceso) Análisis de modo potencial de falla y sus efectos en sistemas (FMEA de Sistema)". Esta norma da una guía en la aplicación de la técnica de análisis de modos de falla y sus efectos, se enfoca en el desempeño del producto, proceso y planta de máquinas FMEA. El estándar perfila los conceptos de producto y proceso para desarrollar FMEA en la planta de maquinaria y equipos y provee un formato para documentar el estudio. El documento contiene la siguiente información.
- Implementación de FMEA
 - ¿Qué es FMEA?
 - El formato para documentar el FMEA de proceso o de producto en el sistema
 - El desarrollo de un FMEA de proceso o de producto
 - El criterio de evaluación para la severidad, frecuencia y detección de la falla⁴⁵.
- BS 5760-5 "Guía de análisis de criticidad, modos de falla y sus efectos (FMEA y FMECA) "
- SAE ARP 5580 "Recomendaciones para análisis de modos de fallo y efectos (FMEA) para aplicaciones no automotrices"

⁴⁴ KRASICH, Milena, Bose Corporation; Can Failure Modes and Effects Analysis Assure a Reliable Product?

⁴⁵ HAAPANEN Pentti, HELMINEN Atte; Failure Mode and effects Analysis of Software-Based automation Systems STUK-YTO-TR 190 / Agosto 2002

- SEMATECH (1992) “Análisis de modos de fallos y los efectos (FMEA): Una guía para la mejora continua de la Industria de equipos de semiconductores.

D.6 REQUISITOS PREVIOS FMECA

FMECA como herramienta metódica de análisis a partir de información específica de los equipos y la experiencia de los operadores y mantenedores, busca determinar las tareas de mantenimiento que eliminen, reduzcan, minimicen o controlen la consecuencia de los modos de falla, mejorando así la confiabilidad de los sistemas, para lo cual se debe contar con unos requisitos previos como son:

- Conformar grupo de trabajo
- Recolección de información del equipo
- Recolección de información anterior

D.6.1 Conformar grupo de trabajo

El análisis debe ser realizado por un grupo de trabajo multidisciplinario, con participación de operadores, técnicos, ingenieros, seguridad y ambiente, especialistas (cuando sea necesario), así como representantes de las áreas de diseño, manufactura, ensamble, calidad, confiabilidad, servicio, compras, pruebas, proveedores y otros expertos en la materia que se considere conveniente, dirigidos por un facilitador experto en FMECA. Este grupo de análisis define y clasifica los objetivos y el alcance del análisis y los requerimientos.

D.6.2 Recolección de información del equipo

Recoger la información disponible que describe el sistema a ser analizado:

- Planos, esquemas o dibujos del sistema.
- Especificaciones técnicas.
- Listas de los componentes

- Diagramas de bloques en los que se muestre el funcionamiento y las relaciones existentes entre los componentes del sistema.
- Información del interfaz, etc.

Cuando no se cuente con un sistema de información es indispensable elaborar uno, la norma ISO 14224 provee una guía de cómo hacerlo.

D.6.3 Recolección de información anterior

Recoger la información sobre diseños anteriores y similares de fuentes internas y externas; incluyendo datos históricos del sistema de reporte de fallas, acciones y análisis de criticidad, entrevistas con personal de diseño, personal de operaciones y mantenimiento, proveedores de componentes, etc.

D.6.4 Formato FMECA

Es necesario diseñar previamente el formato para el análisis, éste puede ser en papel o en medio electrónico, y debe ser socializado ante todo el grupo de trabajo para evitar ambigüedad en los términos. Es indispensable que este formato cuente con al menos una columna para cada paso del procedimiento. La figura 24. Muestra un formato típico para el procedimiento FMECA

Figura 24. Formato de procedimiento FMECA

ANÁLISIS DE CRITICIDAD, MODOS DE FALLA Y SUS EFECTOS									
SISTEMA: SUBSISTEMA: DIAGRAMA: HOJA:					DE				
					FECHA DE REALIZACIÓN: FECHA DE ACTUALIZACIÓN: REALIZADO POR: APROBADO POR:				
DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO FUNCIONAL				COD. F.F		DESCRIPCIÓN DE LOS EFECTOS			
COD. ITEM	ITEM	COD. FUNC.	DESCRIPCIÓN DE LA FUNCION	COD. F.F	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL	COD.M.F.	DESCRIPCIÓN MODO DE FALLA	DESCRIPCIÓN DEL EFECTO	CONSECUENCIA

D.7 PASOS PRINCIPALES PARA APLICAR FMECA

Al definir aplicar FMECA se debe seguir un algoritmo o procedimiento lógico que permita conseguir los objetivos del análisis, lo cual implica resolver las siguientes preguntas sobre el equipo seleccionado:

- ¿Cuáles son las funciones y los estándares de funcionamiento asociados a su contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer tales funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿Cuál es la consecuencia de cada de falla?⁴⁶

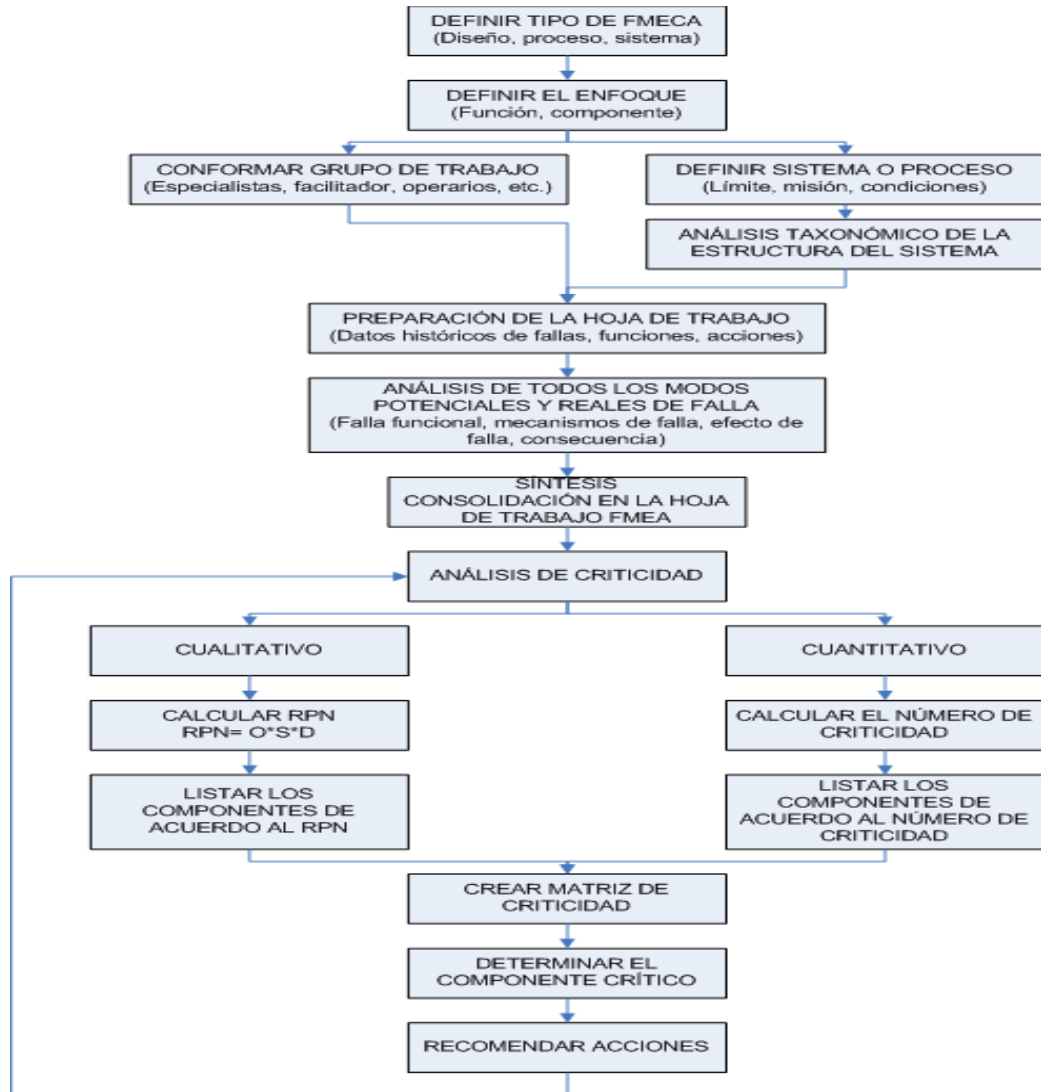
Los pasos principales para aplicar un procedimiento FMECA son:

- Determinar y definir el sistema a analizar
- Identificar y definir las funciones del sistema
- Identificar y definir las fallas funcionales
- Identificar los modos y/o mecanismos de falla
- Identificar los efectos de las fallas
- Determinar las consecuencias de las fallas

A continuación se presenta el procedimiento que nos permite desarrollar un FMECA desde la selección del equipo hasta la jerarquización de la falla, al tiempo que se resuelven las cinco preguntas anteriores y se definen algunos términos. La figura 25. Muestra el diagrama de proceso de aplicación de FMECA.

⁴⁶ MOUBRAY Jhon. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM II. Edición en español 2004. Publicado por Aladon ltd. Traducido por Ellmann, Sueiro y Asociados. Buenos Aires, Argentina – Madrid, España.

Figura 25. Diagrama de proceso de un FMECA



D.7.1 Determinar y definir el sistema a analizar

Consiste en seleccionar el sistema para el cual es costo-eficaz realizar un análisis de este tipo; es decir para los equipos y/o sistemas de mediana o alta criticidad, definir el alcance del análisis y la meta de éste. Para lo cual se debe establecer:

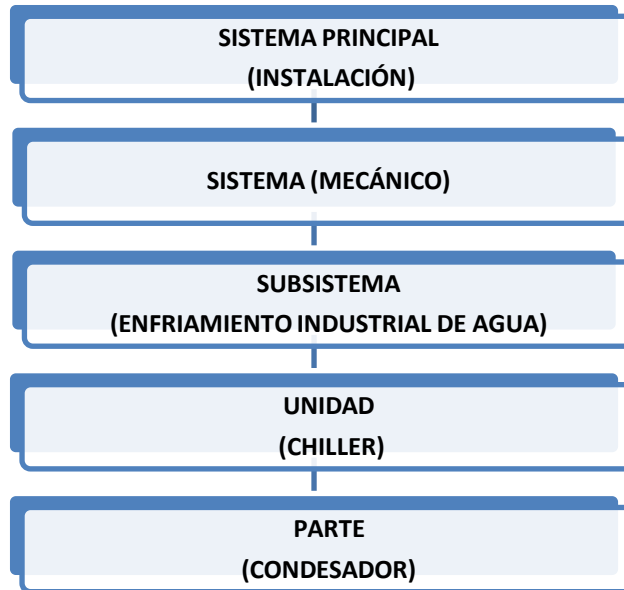
- Límites del sistema; qué parte debe ser incluido y qué no
- Lista de las unidades que componen el sistema y a su vez los componentes que componen dichas unidades.

- Condiciones ambientales (temperatura, humedad, intemperie, etc.) y operacionales que se considerarán. Es importante tener en cuenta los factores claves que determinan el contexto operacional, como son:
 - Proceso de producción por lotes o continuo
 - Redundancia de equipo
 - Estándares de calidad
 - Estándares medioambientales
 - Riesgos para la seguridad
 - Turnos de trabajo
 - Productos en proceso
 - Tiempo de reparación
 - Repuestos
 - Demanda del mercado
 - Abastecimiento de las materias primas
 - Documentación del contexto operacional⁴⁷

Para llevar a cabo este primer paso es conveniente dividir el sistema en unidades manejables, típicamente elementos funcionales. El nivel de detalle al que se debe llegar dependerá del objetivo del análisis. A menudo es deseable ilustrar la estructura por un diagrama de árbol jerárquico. La figura 26. Describe la estructura taxonómica típica de un sistema dando un ejemplo ilustrativo de un sistema de enfriamiento industrial de agua.

⁴⁷ MOUBRAY Jhon. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM II. Edición en español 2004. Publicado por Aladon ltd. Traducido por Ellmann, Sueiro y Asociados. Buenos Aires, Argentina – Madrid, España.

Figura 26. Estructura taxonómica típica de un sistema.



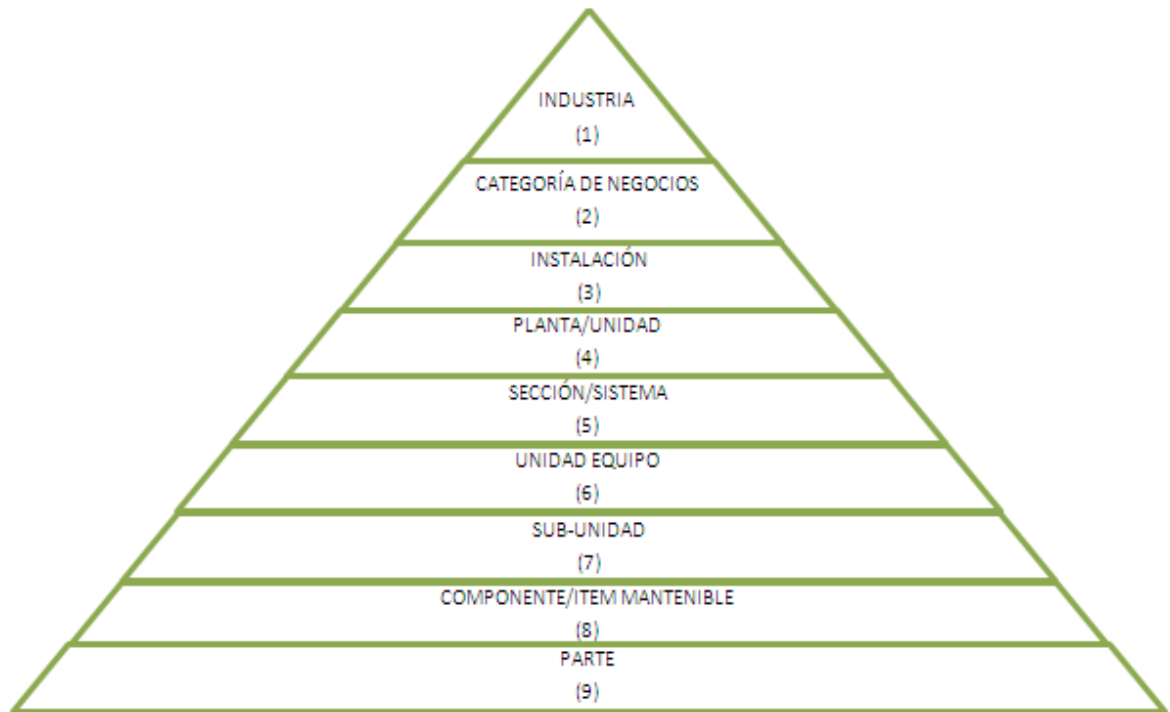
En la figura 27. Se puede ver el registro de este paso del procedimiento en la hoja de trabajo FMECA.

Figura27. Definición del sistema

SISTEMA: SISTEMAS MECANICOS					
SUBSISTEMA: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO					
DIAGRAMA: C20005-B					
HOJA: 1			DE 3		
DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO FUNCIONAL				DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL	
COD. ITEM	ITEM	COD. FUNC.	DESCRIPCIÓN DE LA FUNCION	COD. F.F	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL
100	TORRE DE ENFRIAMIENTO				

La norma ISO 14224 provee un modelo de jerarquización taxonómica que se muestra en la figura 28.

**Figura 28. Modelo de jerarquización taxonómica de la norma
ISO 14224⁴⁸**



D.7.2 Identificar y definir las funciones del sistema

Se debe identificar y describir la función principal del sistema o equipo analizado; es decir, la razón de ser de éste dentro del proceso productivo, y las funciones secundarias o de apoyo logístico, que son las que ayudan al sistema a realizar la función primaria de acuerdo a los estándares de funcionamiento establecidos. Por lo general la definición de la función primaria consta de un verbo y un sustantivo, por ejemplo: enfriar agua, comprimir aire, retirar calor, etc. Y los estándares de funcionamiento determinan la magnitud de la función requerida; o sea la asocia a un parámetro medible como: velocidad, volumen de producción, tiempo de inicio de un proceso, tiempo de finalización de un proceso, calidad, servicio al cliente,

⁴⁸ INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS 14224 Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment 2004

características técnicas, entre otros, que permiten determinar el estado de falla o no del sistema; éstos pueden ser de varios tipos:

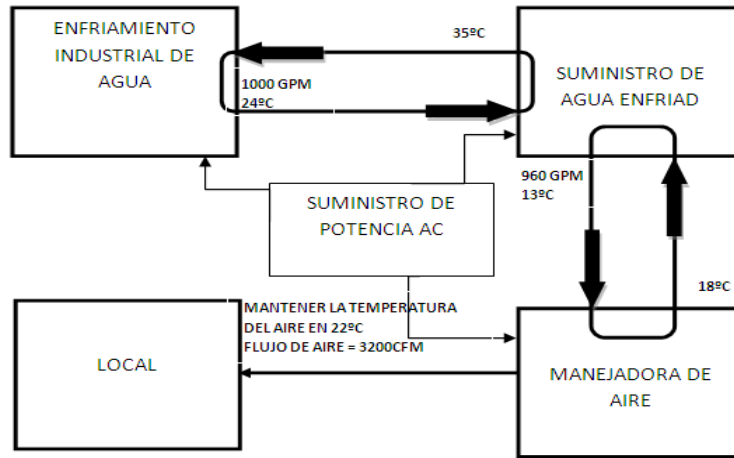
- Múltiples: valores simultáneos como en un sistema eléctrico: voltaje, amperaje, potencia, etc.
- Cuantitativos: valores medibles numéricamente como temperatura, tiempo, presión, etc.
- Cualitativos :estándar no cuantificable como sería el caso de color azul o turbio, como también que el agua no presente oleaje
- Absolutos: cuando se establece para el estándar un único valor fijo, que no permite un intervalo y que no debe cambiar ni en el tiempo, ni en el espacio.
- Variables: cuando se establece el valor de un estándar como un intervalo de valores que puede depender del tiempo o de otro parámetro, como en el caso de un rango de presiones para determinadas horas del día.
- Con rango de tolerancia: Cuando el estándar establecido permite cierta desviación de un valor fijo, como en el caso de la temperatura máxima de un local $21^{\circ}\pm 0,5^{\circ}$.

En la hoja de trabajo, las funciones se denominan con un número entero, para facilitar su identificación.

En este paso es bastante útil construir un diagrama de bloques funcional confiable que represente la operación, la interrelación y la interdependencia entre las

entidades funcionales del sistema. La figura 29. Muestra un diagrama funcional de bloques de un sistema de enfriamiento industrial de agua⁴⁹.

Figura 29. Diagrama funcional de bloques



En la figura 30. Se observa el registro de la definición de funciones en el formato FMECA

Figura 30. Definición de funciones del sistema

SISTEMA: SISTEMAS MECANICOS					
SUBSISTEMA: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO					
DIAGRAMA: C20005-B					
HOJA: 1			DE 3		
DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO FUNCIONAL				DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL	
COD. ITEM	ITEM	COD. FUNC.	DESCRIPCIÓN DE LA FUNCION	COD. F.F	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL
100	TORRE DE ENFRIAMIENTO	1	SUMINISTRAR AGUA AL CONDENSADOR A UNA TEMPERATURA DE 24°C A UNA RATA DE 1000 GPM		

⁴⁹ Headquarters, Department of the Army; Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) For Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4isr) Facilities 29 September 2006

D.7.3 Identificar y definir las fallas funcionales

Este paso consiste en identificar y describir para cada función primaria o secundaria, descrita anteriormente, las fallas funcionales reales y/o potenciales, lo que implica que un estándar de funcionamiento no está siendo cumplido a cabalidad. Para lo cual es indispensable conocer con profundidad todas las circunstancias que llevan a una falla funcional, las causas inmediatas, básicas y raíces, los efectos y como pueden ser observadas o detectada por los usuarios.

Entiéndase por falla el estado tal de un equipo que se caracteriza por su incapacidad para cumplir una función requerida, excepto cuando esto ocurra durante el mantenimiento preventivo u otras acciones previstas, o debido a la falta de recursos externos. Se considera que una pieza, máquina ó equipo ha fallado cuando ocurre una de las siguientes condiciones:

- Cuando se vuelve completamente inoperable.
- Cuando el componente no es capaz de realizar la función para la cual fue concebido, diseñado y manufacturado.
- Cuando el deterioro del componente ha llegado a una condición que lo hace inconfiable ó inseguro para continuar su utilización.

Las fallas funcionales se denotan con letras mayúsculas. Se recomienda entre 3 y 15 fallas funcionales por cada función enunciada, en el evento en que se requieran más fallas funcionales se sugiere más bien especificar más la función y abrirla en dos⁵⁰. En la figura 31. Se muestra la definición de fallas funcionales en el formato FMECA

⁵⁰ MORA GUTIÉRREZ, Alberto; Mantenimiento Estratégico Para Empresas Industriales o de Servicios. 2007 AMG, Colombia

Figura 31. Definición de fallas funcionales

SISTEMA: SISTEMAS MECANICOS					
SUBSISTEMA: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO					
DIAGRAMA: C20005-B					
HOJA: 1			DE 3		
DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO FUNCIONAL				DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL	
COD. ITEM	ITEM	COD. FUNC.	DESCRIPCIÓN DE LA FUNCION	COD. F.F	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL
100	TORRE DE ENFRIAMIENTO	1	SUMINISTRAR AGUA AL CONDENSADOR A UNA TEMPERATURA DE 24°C A UNA RATA DE 1000 GPM	A	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA SUPERIOR A 24 °c
				B	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA INFERIOR A 24 °c
				C	PROPORCIONA AGUA A UNA RATA SUPERIOR A 1000 GPM
				D	PROPORCIONA AGUA A UNA RATA INFERIOR A 1000 GPM

D.7.4 Identificar los modos y/o mecanismos de falla

Entiéndase por modo y/o mecanismo de falla a todo evento que causa una falla funcional; sin hacer distinción entre el modo en que la falla es observada y el proceso físico y/o químico que causa la falla funcional.

En este escalón del análisis deben ser identificados todos los modos de falla asociados a cada falla funcional listada anteriormente. Es importante identificar y listar la causa raíz de la falla, ya que ayuda a generar decisiones precisas de las acciones de mantenimiento a realizar.

Las fuentes fundamentales de falla se han identificado a través del tiempo y son principalmente las siguientes:

- Diseño
- Selección inadecuada de material
- Tratamiento térmico defectuoso
- Manufactura defectuosa
- Mecanizado defectuoso
- Montaje defectuoso, operación y mantenimiento deficiente

La figura 32. Muestra las fuentes fundamentales de falla y la causa directa que puede producir los diferentes modos de falla.

La nomenclatura de los modos de fallas se hace con números enteros. Igual que para las fallas funcionales, para los modos de falla se sugiere entre 3 y 15 por cada falla funcional, como también en el caso de necesitar más modos de falla es preferible abrir la falla funcional en dos. Es aconsejable recurrir a listas de modos de falla o FMECA desarrollados para verificar que se tuvieron en cuenta todos los modos de falla posibles. Algunos modos y/o mecanismos pueden asociarse con los siguientes calificativos:

- Roto
- Flojo
- Fracturado
- Equivocado
- Deformado
- Agrietado
- Mal ensamblado
- Fugas
- Mal dimensionado
- Fatigado
- Corroído
- Pandeo
- No prende
- Se apaga
- No apaga
- Obstruido, etc.

Figura 32. Fuentes fundamentales de falla



La norma ISO 14224 provee una guía de los diferentes modos de falla que se pueden presentar en una gran diversidad de equipos asociados a cada falla funcional de éstos. La figura 33. Muestra la identificación de modos de falla en la hoja de trabajo FMECA.

Figura 33. Identificación de modos de falla.

COD. F.F		DESCRIPCIÓN DE LOS EFECTOS			
COD. F.F	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL	COD. M.F.	DESCRIPCIÓN MODO DE FALLA	DESCRIPCIÓN DEL EFECTO	CONSECUENCIA
A	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA SUPERIOR A 24 ºc	1	BOMBA DEGRADADA		
		2	VENTILADOR NO ENCIENDE		
		3	OBSTRUCCIÓN DE LOS CONDUCTOS		
B	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA INFERIOR A 24 ºc	1	VENTILADOR NO APAGA		
C	PROPORCIONA AGUA A UNA RATA SUPERIOR A 1000 GPM				

D.7.5 Identificar los efectos de las fallas.

Consiste en indicar los efectos de falla asociados a cada modo potencial o real de falla. Ésta es una breve descripción de qué pasa cuando la falla ocurre, indicando aspectos técnicos de ésta como especificación del estándar de funcionamiento comprometido, tiempo requerido para detectar y reparar, existencia de alarmas, reducción del volumen de producción, existencia de repuesto en almacén, etc. En la figura 34. Se puede ver la identificación de efectos en el formato FMECA.

Figura 34. Identificación de efectos

COD. F.F		DESCRIPCIÓN DE LOS EFECTOS			
COD. F.F	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL	COD. M.F.	DESCRIPCIÓN MODO DE FALLA	DESCRIPCIÓN DEL EFECTO	CONSECUENCIA
A	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA SUPERIOR A 24 ºc	1	BOMBA DEGRADADA	LA CANTIDAD DE CALOR REQUERIDA NO ES REMOVIDA DEL AGUA. LA EFICIENCIA DEL CONDESADOR DISMINUYE LA TEMPERATURA DEL AIRE PUEDE SUBIR PERO NO SIGNIFICATIVAMENTE.	
		2	VENTILADOR NO ENCIENDE		
		3	OBSTRUCCIÓN DE LOS CONDUCTOS		
B	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA INFERIOR A 24 ºc	1	VENTILADOR NO ABRAGA		
C	PROPORCIONA AGUA A UNA RATA SUPERIOR A 1000 GPM				

D.7.6 Determinación de las consecuencias de falla

Reside en describir lo que sucedería dada la ocurrencia de un modo específico de falla. Estas consecuencias de falla se miden teniendo en cuenta el nivel de impacto de ellas sobre la organización, sistemas, máquinas o sus componentes, pueden ser clasificadas según su efecto en ocultas o evidentes y cada una de estas a su vez, dependiendo de la forma en que afectan a los usuarios se categorizan y evalúan en el siguiente orden:

- Consecuencias para la seguridad
- Consecuencia sobre el medio ambiente
- Consecuencias operacionales
- Consecuencias no operacionales

La figura 35. Muestra el registro de las consecuencias de un modo de falla en el formato FMECA.

Figura 35. Determinación de consecuencias.

COD. F.F		DESCRIPCIÓN DE LOS EFECTOS			
COD. F.F	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL	COD. M.F.	DESCRIPCIÓN MODO DE FALLA	DESCRIPCIÓN DEL EFECTO	CONSECUENCIA
A	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA SUPERIOR A 24 ºc	1	BOMBA DEGRADADA	LA CANTIDAD DE CALOR REQUERIDA NO ES REMOVIDA DEL AGUA.	MAYOR CONSUMO DE ENERGÍA = \$\$.
		2	VENTILADOR NO ENCIENDE	LA EFICIENCIA DEL CONDESADOR DISMINUYE	
		3	OBSTRUCCIÓN DE LOS CONDUCTOS	LA TEMPERATURA DEL AIRE PUEDE SUBIR PERO NO SIGNIFICATIVAMENTE.	
B	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA INFERIOR A 24 ºc	1	VENTILADOR NO APAGA		
C	PROPORCIONA AGUA A UNA RATA SUPERIOR A 1000 GPM				

D.8 CONSOLIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La consolidación de la información se debe realizar en la hoja de trabajo FMECA, de fácil manejo, actualizable, accesible para posibles consultas, en papel o en medio electrónico, la cual debe contener; como ya se dijo, mínimo una columna para registrar cada uno de los pasos anteriores. La figura 36. Muestra una hoja de trabajo FMECA característica.

Para cada elemento del sistema (subsistema, componente) el analista debe considerar todas las funciones de los elementos en todo sus modos operativos y preguntar si una falla del elemento puede resultar en cualquier efecto inaceptable del sistema. Si la respuesta es no, entonces no es necesario otro análisis de ese elemento Si la respuesta es sí, entonces el elemento se debe examinar más a fondo.

Figura 36. Hoja de trabajo FMECA típica

SISTEMA: SISTEMAS MECÁNICOS				FECHA DE REALIZACIÓN:									
SUBSISTEMA : SISTEMA DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO				FECHA DE ACTUALIZACIÓN:									
DIAGRAMA: C20005-B				REALIZADO POR:									
HOJA: 1 DE 3				APROBADO POR:									
DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO FUNCIONAL				COD. F.F		DESCRIPCIÓN DE LOS EFECTOS				ANÁLISIS DE CRITICIDAD			
COD. ITEM	ITEM	COD. FUNC	DESCRIPCIÓN DE LA FUNCION	COD. F.F	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA FUNCIONAL	COD. M.F.	DESCRIPCIÓN MODO DE FALLA	DESCRIPCIÓN DEL EFECTO	CONSECUENCIA	FRECUENCIA	SEVERIDAD	DETECCIÓN	RPN
100	TORRE DE ENFRIAMIENTO	1	SUMINISTRAR AGUA AL CONDENSADOR A UNA TEMPERATURA DE 24°C A UNA RATA DE 1000 GPM	A	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA SUPERIOR A 24 °c	1	BOMBA DEGRADADA	LA CANTIDAD DE CALOR REQUERIDA NO ES REMOVIDA DEL AGUA.	MAYOR CONSUMO DE ENERGÍA = \$\$.				
						2	VENTILADOR NO ENCIENDE	LA EFICIENCIA DEL CONDENSADOR					
						3	OBSTRUCCIÓN DE LOS CONDUCTOS	DISMINUYE					
								LA TEMPERATURA DEL AIRE PUEDE SUBIR PERO NO SIGNIFICATIVAMENTE.					
				B	PROPORCIONA AGUA A UNA TEMPERATURA INFERIOR A 24 °c	1	VENTILADOR NO APAGA						
				C	PROPORCIONA AGUA A UNA RATA SUPERIOR A 1000 GPM								
				D	PROPORCIONA AGUA A UNA RATA INFERIOR A 1000 GPM								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

1. En la primera columna se da una referencia única a un elemento (subsistema o componente). Puede ser una referencia a una identificación en un dibujo específico, un número de etiqueta supuesto.
 2. Nombre del elemento o sistema a analizar según se indica en el primer paso.
 3. Se lista el código de las funciones del elemento.
 4. Se numeran todas las funciones según se establece en el segundo paso. Puede ser útil una lista de comprobación para asegurar que se cubren todas las funciones.
 5. Código de la falla funcional
 6. Descripción de la falla funcional como se indica en el tercer paso.
 7. Código de los diferentes modos de falla
 8. Descripción de los modos de falla potenciales y/o reales para cada falla como se menciona en el cuarto paso del análisis.
 9. Como se indica en el quinto paso del análisis se describen los efectos de la falla funcional.
 10. Esta columna está destinada para las consecuencias que se mencionan en el sexto paso de proceso de ejecución de un FMEA
- Las cuatro columnas restantes se destinan para la frecuencia, severidad, detección y el número de prioridad de riesgo que corresponde al análisis de criticidad.

D.9 ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE MODOS DE FALLA

El análisis de criticidad de los modos de falla, es una herramienta que permite listar por orden de prioridad de riesgo o nivel de criticidad las fallas potenciales y/o reales de cada elemento del sistema, basado en la frecuencia de falla, la severidad y la detección del modo de falla. Esta herramienta se usa para priorizar y minimizar las consecuencias de las fallas críticas.

El nivel de criticidad del modo de falla está determinado por el número de prioridad del riesgo RPN. El modo de falla con un mayor valor del RPN será el modo de falla más crítico, y se ordena en forma descendiente.

$$RPN = S * O * D \quad (30)$$

Donde:

RPN: Es el número de prioridad del riesgo

S: Es la severidad del modo de falla

O: Es la ocurrencia del modo de falla

D: Es la detectabilidad del modo de falla

D.9.1 Número de prioridad de RIESGO (RPN)

Este número de prioridad de riesgo es el producto de la frecuencia por la severidad y por la detectabilidad, siendo tales factores traducibles a un código numérico adimensional que permite priorizar la urgencia de la intervención, así como el orden de las acciones correctoras. Por tanto debe ser calculado para todos los modos de falla.

D.9.2 Severidad (S)

Mide el daño normalmente esperado que provoca el fallo en cuestión, según la percepción del cliente - usuario. También cabe considerar el daño máximo esperado, el cual iría asociado también a su probabilidad de generación. La tabla 39. Muestra los valores para la asignación de severidad de un efecto dada la ocurrencia de un modo de falla

Tabla 39. Severidad del efecto FMECA

EFEECTO	CRITERIOS: SEVERIDAD DEL EFECTO PARA FMECA	VALOR
Alerta peligrosa	El incidente afecta la operación segura del equipo o implica la no conformidad con la regulación del gobierno sin alarma.	10
peligroso; con alarma	El incidente afecta la operación segura del equipo o implica la no conformidad con la regulación del gobierno con la alarma.	9
Muy Alto	El equipo es inoperable con pérdida de función primaria.	8
Alto	El equipo es operable, pero en el nivel reducido del funcionamiento.	7
Moderado	El equipo es operable, pero el ítem(s) de la comodidad o de la conveniencia es inoperable.	6
Bajo	El equipo es operable a un nivel reducido de funcionamiento.	5
Muy Bajo	La mayoría de los clientes notan los defectos.	4
De menor importancia	Los clientes medios notan los defectos.	3
Muy De menor importancia	El ajuste y el final o el chirrido y el ítem del traqueteo no se conforma. Los clientes exigentes notan los defectos.	2
Ninguno	Ningún efecto	1

D.9.3 Frecuencia de ocurrencia (O)

Mide la repetitividad potencial u ocurrencia de una determinada falla, es lo que en términos de confiabilidad o de prevención llamamos la probabilidad de aparición de la falla. La tabla 40. Muestra los valores asignables a la probabilidad de ocurrencia de un modo de falla de acuerdo al número de fallas

Tabla 40. Valor de la frecuencia de falla

PROBABILIDAD DEL INCIDENTE	PORCENTAJES DE AVERÍAS	VALOR
Muy alta: El incidente es casi inevitable	1 en 2	10
	1 en 3	9
Alta: Incidentes repetitivos	1 en 8	8
	1 en 20	7
Moderada: Incidentes ocasionales	1 en 80	6
	1 en 400	5
	1 de 2000	4
Baja: Relativamente pocos incidentes	1 en 15.000	3
	1 en 150.000	2
Telecontrol: El incidente es inverosímil	1 en 1.500.000 ≤	1

D.9.4 Detectabilidad (D)

Si durante el proceso se produce un fallo o cualquier salida defectuosa, se trata de averiguar cuan probable es que no lo "detectemos", pasando a etapas posteriores, generando los consiguientes problemas y llegando en último término a afectar al cliente - usuario final. Cuanto más difícil sea detectar el fallo existente y más se tarde en detectarlo más importantes pueden ser las consecuencias del mismo. La tabla 41. Muestra el valor que se puede asignar a la probabilidad de detección de un modo de falla dado.

Tabla 41. Valor de la probabilidad de detección de un modo de falla

DETECCIÓN	CRITERIOS: PROBABILIDAD DE LA DETECCIÓN	VALOR
Incertidumbre Absoluta	El control del diseño no detecta una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente; o no hay control del diseño	10
Muy Alejada	La probabilidad muy alejada de que el control del diseño detecte una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente	9
Alejada	La probabilidad alejada de que el control del diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente	8
Muy Baja	La probabilidad muy baja el control del diseño detectará un potencial Causa del incidente o del modo de fallo subsecuente	7
Baja	La probabilidad baja el control del diseño detectará un potencial Causa del incidente o del modo de fallo subsecuente	6
Moderada	La probabilidad moderada de que el control del diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente	5
Moderadamente Alta	La probabilidad moderado alta de que el control del diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente	4
Alta	La alta probabilidad de que el control del diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente	3
Muy Alta	La probabilidad muy alta de que el control del diseño detectará una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente	2
Casi Segura	El control del diseño detectará casi ciertamente una causa potencial del incidente o del modo de fallo subsecuente	1

D.10 RECOMENDACIÓN DE ACCIONES DE MANTENIMIENTO

En este apartado se describen las acciones de mantenimiento propuestas para reducir y/o controlar el nivel de criticidad de un componente. Generalmente el tipo de acción correctora que se elija seguirá los siguientes criterios, de ser posible:

- Cambio en el diseño del producto, servicio o proceso general.
- Cambio en el proceso de fabricación.
- Incremento del control o la inspección.

Siempre hay que mirar por la eficiencia del proceso y la minimización de costos de todo tipo, generalmente es más económico reducir la probabilidad de ocurrencia de fallo que dedicar recursos a la detección de fallos. No obstante, la gravedad de las consecuencias del modo de fallo debería ser el factor determinante del número de prioridad del riesgo. O sea, si se llegara al caso de dos situaciones que tuvieran el mismo número la gravedad sería el factor diferencial que marcaría la prioridad.

ANEXO E

E. ANÁLISIS CAUSA RAÍZ - RCA

E.1 GENERALIDADES DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ “RCA”

El Análisis Causa Raíz (RCA) es un método de análisis de fallas que utiliza la lógica sistemática para identificar las causas responsables de las fallas. También permite identificar la mejor solución para corregir la causa identificada y como realizar su seguimiento.

El RCA se basa en el árbol lógico de fallas, la deducción y verificación de los hechos para encontrar el origen real de una falla. Este método de análisis de fallas permite aprender de las fallas y eliminar las causas, en lugar de corregir los síntomas.

Por su estructura, el RCA es un proceso que consume tiempo y recursos por lo tanto se debe establecer desde un principio si el problema requiere realizar ó no un estudio de RCA. (La matriz de evaluación de riesgo permite identificar cuando un análisis RCA debe realizarse).

Con el fin de saber si una falla requiere de un RCA, se debe evaluar basado en sus consecuencias, por ejemplo: fallas que involucren la integridad de las personas, las inversiones o infraestructura, el medio ambiente, la reputación de la empresa ó la combinación de varias o todas las anteriores.

El objetivo del RCA es determinar el origen de las causas físicas, humanas y latentes de una falla, la frecuencia con que aparece y el impacto que genera, por medio de un estudio minucioso de los factores, circunstancias, elementos y afines que podrían mitigarla o eliminarla por completo una vez tomadas las acciones correctivas que sugiera el análisis mejorando la seguridad y la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad de los equipos de la organización.

Para hacer un buen Análisis de Causa Raíz , se debe ir más allá de los componentes físicos de la falla o raíces físicas y analizar las acciones humanas o

raíces humanas que desataron la cadena causa-efecto que llevó a la causa física, lo cual implica analizar ¿por qué hicieron eso?, si debido a procedimientos incorrectos, a especificaciones equivocadas o a falta de capacitación, lo cual puede sacar a la luz raíces latentes, es decir deficiencias en el gerenciamiento, que de no corregirse, pueden hacer que la falla se repita nuevamente. El análisis de Causa Raíz permite graficar las relaciones causa-efecto que nos conducen a descubrir el evento indeseable o causa raíz, mediante preguntas como:

- ¿Cómo es el modo que puede ocurrir una falla?
- ¿Por qué o cuáles son las causas de la misma?

Las fallas son desviaciones del comportamiento teórico o ideal, las fallas se clasifican de dos tipos las esporádicas y las crónicas:

- Problemas esporádicos: Son una desviación del estándar operacional causando una cantidad considerable de caos cuando aparecen, tienen ciertas características que son importantes, por ejemplo, por la naturaleza del problema capturan la atención de todos (incendios, explosiones, virus en las computadoras, huelgas...) pero una vez que desaparecen todo retorna a la normalidad.
- Problemas crónicos: Son desviaciones del estándar operacional altamente frecuentes, difíciles de controlar o erradicar. Los problemas crónicos generalmente son resueltos en periodos de tiempo cortos. Cada evento de falla crónico tiene un impacto relativamente bajo en los objetivos y costos operacionales de la organización, pero cuando la frecuencia del evento se multiplica por los costos se encuentra que la pérdida total es significativa. Los problemas crónicos ocurren dentro de situaciones muy normales de operación. Estas desviaciones son origen de frases en el personal de operaciones como: “siempre ha funcionado así”, “es imposible de resolver” y en general estas desviaciones son aceptadas como “el costo de hacer negocios” por todos los niveles de la organización.

El equipo de trabajo para desarrollar esta metodología de análisis de fallas se hace de manera convencional mediante la asignación de un grupo de personal,

que deben ser expertos y tener conocimientos relacionados directamente con los problemas a analizar. El RCA debe ser dirigido por un especialista, quien tenga entrenamiento específico en la metodología RCA. El resto de equipo lo conforma un grupo multifuncional que varía entre un problema y otro. Los equipos de este tipo se forman en base a reacción espontánea a un problema.

El equipo de RCA debe estar conformado por (recomendación):

- El especialista que dirige el proceso.
- Un operador familiarizado con el proceso operativo.
- Un técnico de mantenimiento en equipos mecánicos, eléctricos o de instrumentación.
- Un supervisor de planta.
- Un ingeniero de acuerdo a la especialidad en estudio.

El especialista no debe estar familiarizado con el personal de la organización, ni estar a cargo del sistema, subsistema, equipo o elemento donde se esté realizando el RCA, pero si debe estar familiarizado con el evento que se está analizando, debe ser experto en análisis de fallas.

Algunas tareas del equipo de trabajo son:

- Procesos de registro.
- Recolección y cuidado de evidencias.
- Los análisis de fallas.
- La implementación y la vigilancia de los controles establecidos como también las demás acciones propias del método.

E.2 BENEFICIOS DEL RCA

- Determina cuales son las verdaderas causas raíces de falla.
- Se puede predecir la ocurrencia de eventos no deseados, e identificar acciones concretas para minimizar su ocurrencia.

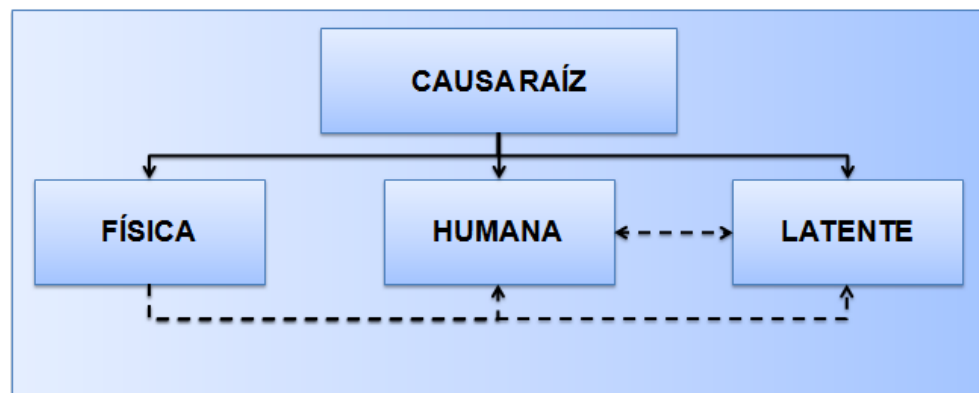
- Facilita la capacidad para examinar un modelo de fallas e impide la repetición de las mismas.
- Una vez aplicada la gestión sugerida aumenta la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad de los equipos.
- Disminuye el número de fallas o incidentes, reduce los impactos operacionales y los accidentes manifestándose en una disminución de los costos de mantenimiento.
- Motiva la sinergia del personal de mantenimiento y operaciones.
- Optimiza los costos aumentando la eficiencia y productividad.

E.3 TIPOS DE CAUSA RAÍZ

Existen tres tipos de causa raíz: Física, Humana y Latente. En la figura 37. Se muestran los tres tipos de causas que deben ser identificadas en un RCA⁵¹.

La Causa Raíz es el origen del cual procede el efecto o problema visible. La causa raíz es el desencadenante de los problemas que presentan los sistemas, subsistemas, componente y componentes de detalle. Cuando se localiza la causa raíz y se procede a eliminarla o mitigarla el resultado de esta acción es la eliminación o mitigación de los problemas o efectos de falla.

Figura 37. Clasificación de la causa Raíz



⁵¹ GARCÍA PALENCIA, Oliverio El análisis causa raíz, estrategia de confiabilidad operacional, UPTC, 2006.

Causa Raíz Física:

Es el origen tangible de la falla, estas causas son las que responden a la pregunta ¿Por qué está fallando el sistema, subsistema o ítem mantenible? Cuando se halla una causa raíz física lo que se ha identificado es el componente que fallo. Generalmente procede de una causa raíz humana o latente que se desvía de sus estándares operacionales.

Causa Raíz Humana:

Se denomina causa raíz humana cuando el desencadenante de una avería en una máquina o instalación industrial, así como el origen de un accidente laboral, se debe a que la persona(s) que está(n) al frente de ese (o esos) elemento(s) ha(n) cometido alguna distracción o imprudencia en el desempeño de las funciones que tiene asignadas para hacer funcionar correctamente los equipos o máquinas que tiene a su cuidado. Aquí la causa raíz humana es originada por un error humano (ver tabal 42.) que está relacionado con la conducta individual (o grupal) inapropiada de quien opera (u operan) el equipo que presenta la falla.

Los errores humanos en este tipo de causas son **errores activos**, que son aquellos que cambian el estado del equipo, del sistema o de la planta, disparando inmediatamente efectos indeseables, esto es por ejemplo, la equivocación de un operador al accionar equivocadamente un equipo, produciendo la salida de servicio de la planta.

Causa Raíz latente:

Son causa que existen pero que no se manifiestan, se presentan por prácticas de liderazgo y administración incompetentes, como también por debilidades organizacionales.

Las causas latentes son aquellas de las debilidades no detectables relacionadas con la organización o con equipos defectuosos, o por causa de información incompleta o errada, falta de comunicación.

Los errores humanos que originan un fallo pueden ser varios, entre los que cabe destacar los siguientes:

Tabla 42. Errores Humanos

Causa Raíz	Error humano
Causa Raíz Física	<p style="text-align: center;">DISEÑO</p> <p>Criterios de Diseño: Selección inadecuada.</p> <p>Hipótesis físicas de funcionamiento: Erróneamente asumida.</p> <p>Mecanismos y componentes: Selección Inadecuada.</p> <p>Idea Conceptual del Sistema: Errónea.</p> <p>Capacidad de diseño: Inferior a la requerida, ineficiente.</p>
	<p style="text-align: center;">MATERIAL</p> <p>Errores en la selección del material y recubrimiento adecuado que produce: Corrosión, fragilización, deformación, Crip, pandeo.</p>
	<p style="text-align: center;">TRATAMIENTOS TÉRMICOS DEFECTUOSOS</p> <p>Los tratamientos térmicos deficientes pueden generar micro-grietas y fracturas después del tratamiento o al poco tiempo de servicio.</p>
	<p style="text-align: center;">MANUFACTURA</p> <p>Mecanizado: Marcas de mecanizado</p> <p>Soldadura: Inclusiones, Micro-grietas.</p> <p>Acabado: Inadecuado.</p> <p>Tolerancias: Inapropiadas.</p> <p style="text-align: center;">MANTENIMIENTO Y MONTAJE</p> <p>Procedimiento técnico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erróneo • Incorrecto • Ineficiente <p>Selección inapropiada de estrategias de mantenimiento.</p> <p>Inadecuados tiempos de inspección.</p> <p>Tiempos de recambio inapropiados.</p> <p>Capacitación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inexistente. • Deficiente.
	<p style="text-align: center;">OPERACIÓN DE EQUIPOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incorrecta • Fuera de especificaciones de operación • Fuera de especificaciones de diseño.

Tabla 42. Errores Humanos (Continuación)

Causa Raíz Humana	Estar bajo los efectos del alcohol, estupefacientes o medicamentos sicotrópicos.
	Vulnerar las medidas de seguridad requeridas.
	Distracciones varias por considerar rutinaria la tarea.
	Realizar las acciones con un tiempo menor al establecido para las mismas (Prisa).
	Somnolencia.
	Carecer de experiencia, formación y entrenamiento adecuado.
Causa Raíz Latente	No tener un protocolo con todas las medidas de seguridad requeridas para desempeñar las labores dentro de la organización.
	Programación de tareas a realizar con un tiempo menor al requerido para poder realizarlas con la seguridad, la precisión y el cuidado que se requieren.
	Que la Administración de la organización carezca de experiencia, formación y entrenamiento adecuado, para administrar y programar la organización.

E.4 CUANDO SE APLICA EL RCA

- El RCA se aplica generalmente a equipos críticos, cuando existe la presencia de fallas repetitivas con una elevada repercusión en los costos de operación y/o mantenimiento o cuando se han presentado fallas esporádicas que hayan generado un gran caos en la organización.
- Cuándo se requiera el análisis de fallas crónicas que se presentan continuamente, tales como las fallas de equipos comunes.
- Cuándo se presentan fallas esporádicas, en procesos críticos, tales como paradas de emergencia, incendios. Explosiones, muertes, lesiones importantes, o fallas graves poco frecuentes en los equipos.

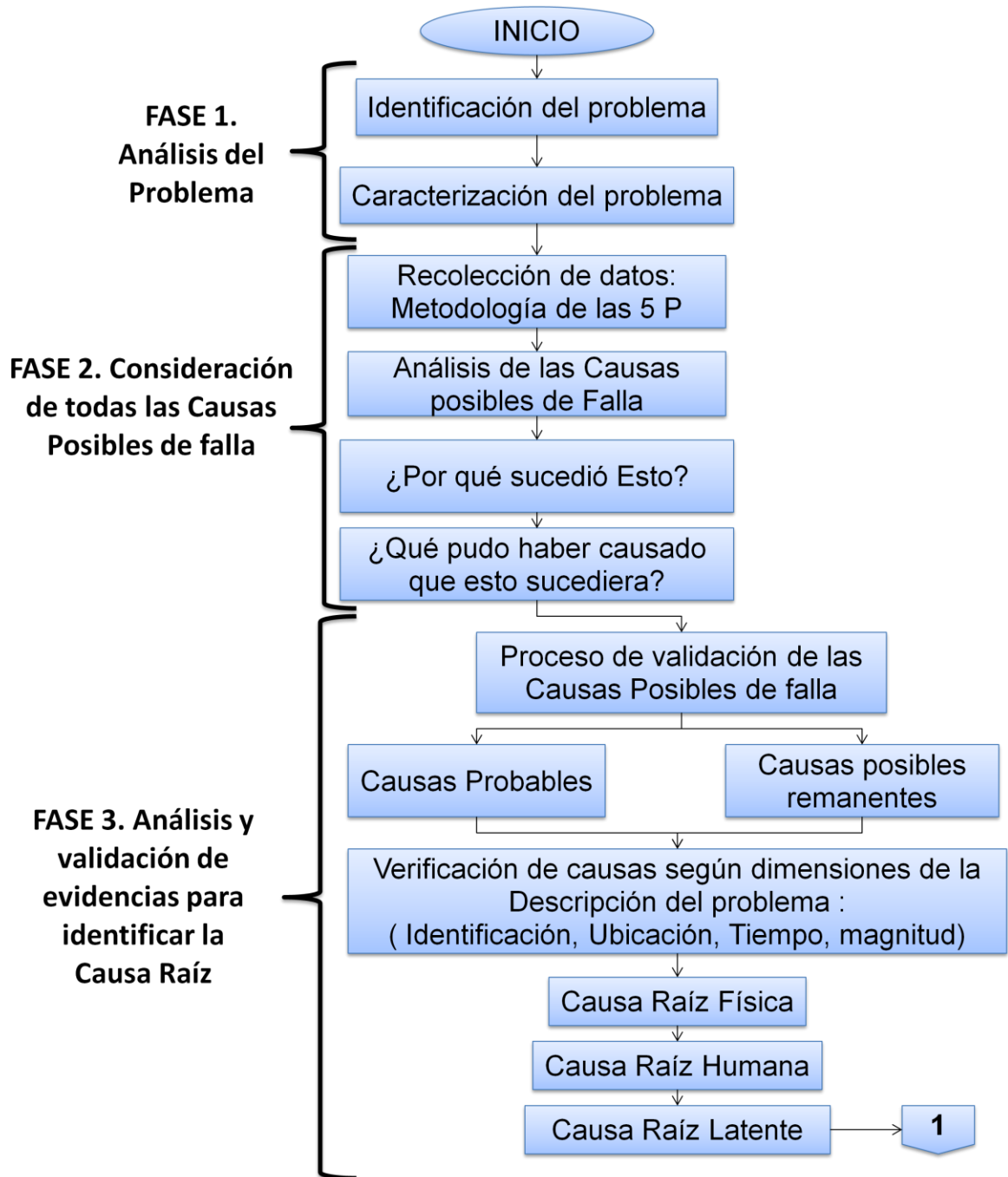
- Para mejorar la eficiencia en aspectos de Mantenimiento: Reducción de costos e inventarios.
- Cuando se tengan aspectos operativos de congestión, interrupción de las operaciones, aumento del consumo de energía, defectos de calidad e incidentes ambientales.
- Cuando sea necesario identificar las deficiencias en los programas de entrenamiento y procedimientos operativos.
- Para evitar fallos con impacto en la seguridad de las personas o en la protección al medio ambiente.

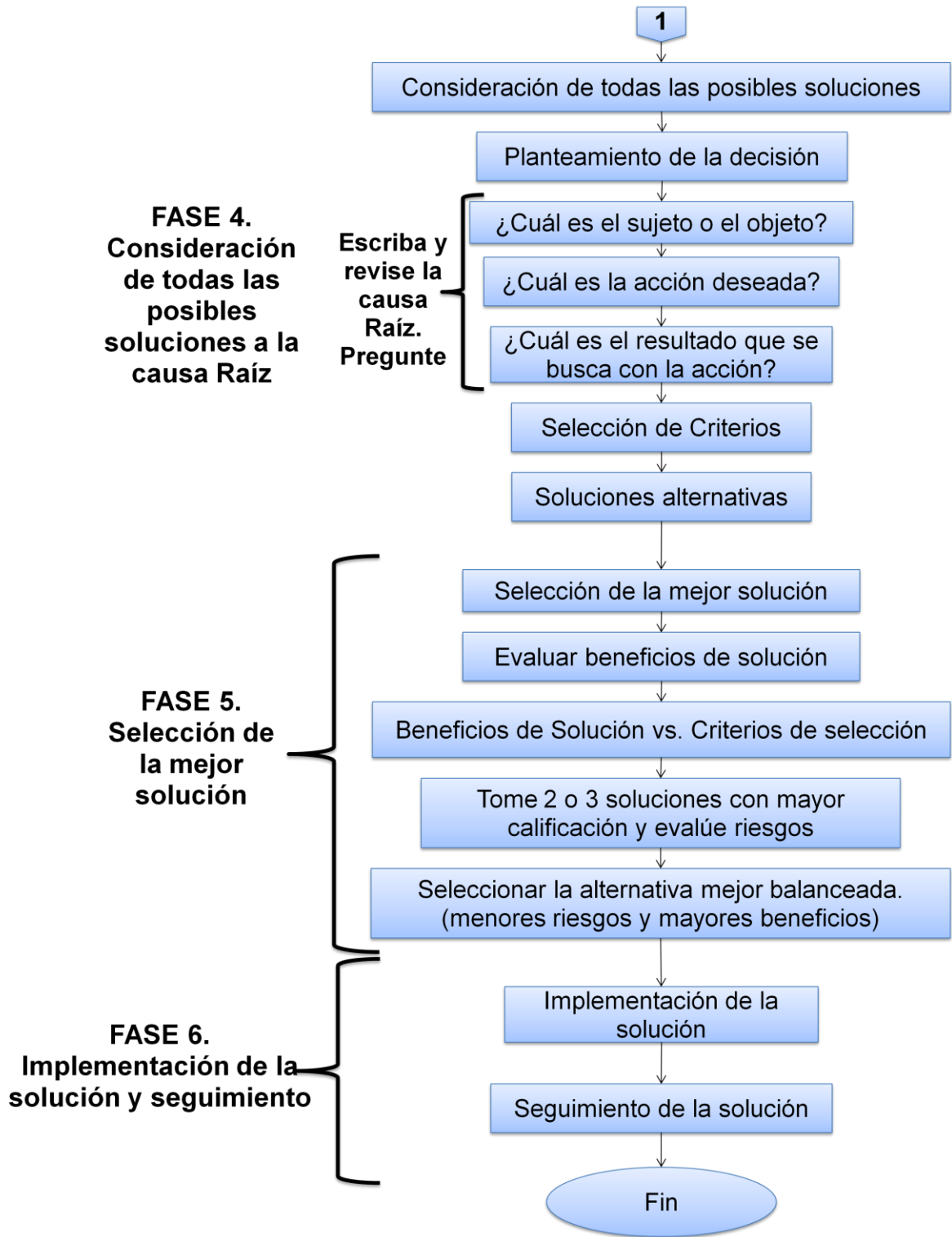
E.5 METODOLOGÍA DEL RCA

Cuando se aplica RCA se debe tener una definición clara del sistema, para comprender la interrelación existente entre las diversas etapas y componentes de un proceso, lo que permite al momento de realizar un estudio, considerar todos los factores, aspectos y circunstancias que están presentes en un evento, ya que cualquiera de ellos puede generar una falla.

En la figura 38. Se muestra la metodología para aplicar RCA la cual está definida por un procedimiento de trabajo de seis fases las cuales se tratarán a continuación. (En la presentación de PowerPoint que corresponde a la relatoría de este documento se encuentra un ejemplo desarrollado con cada una de las fases que se presentan).

Figura 38. Diagrama para la aplicación de un Análisis Causa Raíz





E.5.1 Fase 1: análisis del problema

El objetivo de esta etapa es la captura inmediata de las circunstancias que rodearon el incidente por aquellas personas que estuvieron directamente involucradas.

Lo primero que se debe hacer es identificar las fallas específicas relativas al evento en cuestión. Determinar si se trata de fallas esporádicas y crónicas.

El Análisis del Problema es esencial para el éxito de la eliminación del problema. Esta fase está enfocada a la identificación y definición del problema. La primera etapa del proceso está enfocada a una identificación clara y rigurosa del problema (la diferencia entre algo imaginado ó deseado y lo que realmente está sucediendo). Posteriormente, la definición del problema está enfocada a establecer los síntomas de la falla, el equipo que falló, la ubicación y el tipo de la falla.

I. Identificación del Problema.

El identificar el problema algunas veces no es tan evidente, principalmente porque existen muchos problemas, que dificultan el saber por dónde se debe empezar. El proceso que se muestra a continuación ayuda a determinar por dónde empezar.

Pasos a tener en cuenta para la identificación del problema:

1. Revisar la historia del incidente, Describa y liste los problemas que tiene el equipo.
2. Por cada problema, fije con claridad y exactitud, ¿Qué lo inicio?
3. Agrupe los resultados dentro de problemas tipo ó áreas de problemas
4. Priorizar los problemas basado en el impacto (identificar el más importante). (Hacer una lista).
5. Trabaje el establecimiento del problema fijándose en cómo está funcionando y como debería funcionar.
6. Fórmese un cuadro general de la situación, ¿Qué se observa en lo que se ve?
7. Identifique elementos cuyo comportamiento puedan producir los errores que presenta el equipo, obsérvelos y describa su estado.

En este proceso es importante:

- Seguir detalladamente las evidencias del Reporte del Incidente.
- Definir los límites del problema.
- No tratar el problema aisladamente.
- Observar el problema desde diferentes ángulos.

II. Caracterización del problema

En la tabla 43 se presentan una serie de cuestiones que nos llevan a describir el problema (falla) en el Análisis Causa Raíz.

Tabla 43. Pasos para la caracterización del problema

PREGUNTA A FORMULAR		COMENTARIO
1.	¿Afecta o afectará a los objetivos estratégicos de la organización?	Si un problema afecta a los objetivos estratégicos de la organización, es relevante que se resuelva. Indique a qué objetivos afecta o afectará. (Localizar el problema con más costos). Inicialmente se Recolecta información (de diversas fuentes), registros históricos de la organización sobre el problema a tratar y se analiza la información. Replantee la lista sobre priorización de problemas hecha en la (definición del problema) según la respuesta a esta pregunta.
2.	¿A quién afecta o afectará?	Indique a quién o quienes afecta o afectará el problema. Hablar con la gente de la organización y contarles el problema, dejar registro de lo que estas personas nos dicen sobre el grado de incidencia del problema detectado en su sitio de trabajo u operación, observar y concluir.
3.	¿Cuál es el problema específico?	Después de localizar a que personal de la organización afecta el problema detectado. Pregúnteles cual es el problema en su sitio de trabajo u operación. El equipo RCA debe observar cual es el problema, comparar respuestas y concluir
4.	¿Cuándo ocurre u ocurrirá?	Pregunte al personal involucrado en qué momento ocurre u ocurrirá el problema, tome registro de esta respuesta. Después El equipo RCA debe observar en qué momento ocurre, comparar sus respuestas con las del personal involucrado y concluir en qué momento se presenta el problema

Tabla 43. Pasos para la caracterización del problema (Continuación)

PREGUNTA A FORMULAR		COMENTARIO
5.	¿Dónde ocurre u ocurrirá?	Indique donde ocurre u ocurrirá el problema. Se encuesta al personal involucrado y se les pregunta: ¿donde ellos operan se presenta la causa del problema?, o ¿donde están es un efecto?, ¿Dónde ocurre el problema?, ¿De dónde viene la falla? Se toma registro de lo que responden, se observa, se da una conclusión a la pregunta y se define de donde viene la falla.
6.	¿Con qué frecuencia ocurre u ocurrirá?	Preguntar que tantas veces aparece el problema, concluir si este es esporádico o crónico e identificar su frecuencia de aparición para localizar qué efectos tienen más ocurrencia para atacarlos.
7.	¿Cuál es o será la magnitud del impacto del problema?	Indique cual es o será la magnitud del impacto del problema.
8.	¿La solución del problema está dentro del alcance de influencia y capacidad del grupo?	Indique si la solución del problema está dentro del alcance de influencia del grupo de trabajo, si la respuesta es sí continúe con el análisis, pero si la respuesta es no entonces redefina el grupo de trabajo y vincule el personal necesario (a juicio del grupo RCA) y continúe con el análisis.

En este proceso es importante:

- Esté seguro de la calidad de la información, considere “únicamente evidencias”
- Busque la información en varias fuentes: Reporte del incidente, registro, mantenimiento, historia del equipo, operaciones, ingeniería, fabricante, y compras.
- Utilice varias formas de recoger la información: entrevistas, reportes escritos, gráficos, procesos de computación, visitas a campo y observaciones.
- Manténgase dentro del proceso. No se salte las etapas, no avance al análisis de la causa raíz ó al desarrollo de la solución.
- Responda a las preguntas:
 - ¿Qué es exactamente lo que el equipo hace y no hace con frecuencia?
 - ¿Qué de estas acciones representan fallas por acción u omisión?
 - ¿Qué es exactamente lo que idealmente debería hacer el equipo siempre?

En la tabla 44 se muestra el formato para la caracterización del problema.

Tabla 44. Formato para la caracterización del problema

PREGUNTA A FORMULAR		COMENTARIO
1.	¿Afecta o afectará a los objetivos estratégicos de la organización?	
2.	¿A quién afecta o afectará?	
3.	¿Cuál es el problema específico?	
4.	¿Cuándo ocurre u ocurrirá?	
5.	¿Dónde ocurre u ocurrirá?	¿Dónde ellos operan se presenta la causa del problema?
		¿Dónde están es un efecto?
		¿De dónde viene la falla?
		¿Dónde ocurre el problema?
6.	¿Con qué frecuencia ocurre u ocurrirá?	
7.	¿Cuál es o será la magnitud del impacto del problema?	
8.	¿La solución del problema está dentro del alcance de influencia y capacidad del grupo?	

E.5.2 Fase 2: consideración de todas las causas posibles de la falla

Para que el proceso de RCA sea exitoso, una vez establecido el problema en la etapa anterior, se debe ser estricto en continuar detalladamente con el proceso y el manejo de fuentes de información confiables. No se debe establecer conclusiones en esta fase, ya que siguiendo estrictamente el proceso, se pueden identificar causas raíz ocultas. Además, a través de la Fase 3 se proveen los detalles de cómo estas causas identificadas explican o soportan los efectos establecidos en la fase anterior.

Para considerar todas las causas posibles se siguen las siguientes estrategias:

1. La metodología de las 5 P (partes, posición, personas, papel y paradigmas)⁵²: se ha desarrollado como un medio de ayudar al analista a recolectar los diferentes tipos de datos necesarios para aplicar un RCA.

Partes: Equipo o componente que fallo. Rodamientos, tuberías, sellos, instrumentos, cables, motores, bombas, herramientas, etc.

Posición: Ubicación física del equipo o componente que fallo. Posición física de máquinas, equipos, instrumentos, elementos, personal en la hora de la ocurrencia, circunstancias (modo, tiempo, lugar y condición).

Personal: Entrevistas al personal involucrado en la falla, personal de mantenimiento, operaciones, administración, manejo, calidad, etc.

Papel: Historial de fallas, todos los reportes escritos relacionados con la falla, reportes de mantenimiento, políticas, planos, cuarto de control, procedimientos, especificaciones, entrenamientos, documentación del fabricante, etc.

Paradigmas: Frases comunes del personal de operaciones para evitar investigaciones o desarrollar alguna actividad de mejora. “no tenemos tiempo para un RCA”, “hemos tratado de resolverlo desde hace muchos años”, “es un equipo

⁵² Sojo Luis, El proceso de Análisis Causa Raíz PROACT “Metodología & Software”, 1^{er} Congreso Mexicano de Confiabilidad y Mantenimiento, 2003.

viejo y por supuesto falla”, “siempre ha funcionado así”, “esto es imposible de resolver”, etc.

2. Análisis de los Modos de falla o Causas Posibles del evento de falla

El objetivo de esta estrategia es determinar tantas causas como sea posible del problema. El producto final de esta etapa es un listado de **Causas Posibles**: *causas que pueden resultar en un efecto igual al problema. Un origen de falla es posible si no viola las leyes que conocemos, es decir, que una causa raíz sea origen de una falla es consistente con todas las restricciones que impone la información disponible. Una causa puede ser posible aun cuando sea improbable que sea el origen del efecto que se estudia. Cuando la probabilidad es cero entonces podemos anticipar que la causa jamás será origen de la falla en estudio. Una causa posible solo tiene dos opciones en un estudio de RCA, o es posible o es imposible.* En la figura 39. Se muestra un diagrama con las preguntas a resolver para el análisis de las posibles causas.

En esta parte de la estrategia, estamos dispuestos para preguntar y comenzar a responder los siguientes interrogantes:

- a) Por qué sucedió esto
- b) Que pudo haber causado que esto sucediera

El proceso de Análisis de Causas Posibles está definido a continuación:

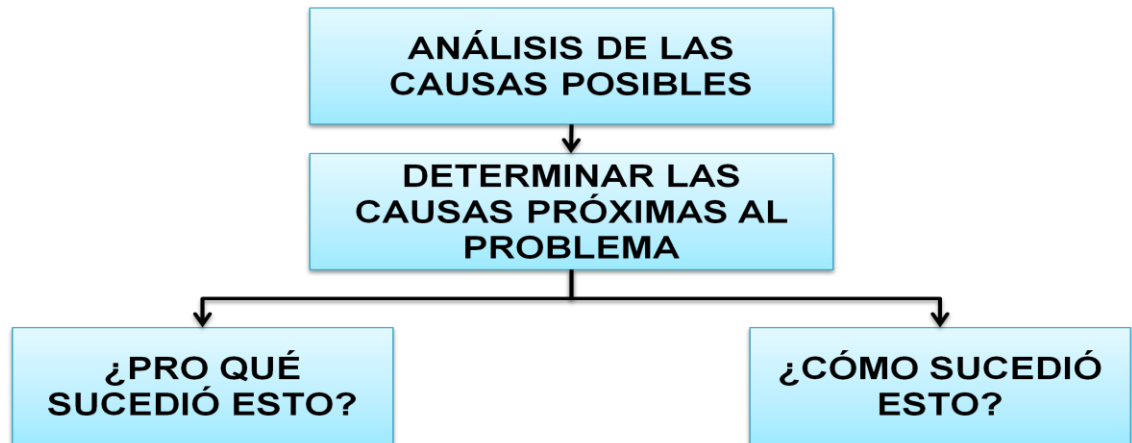
- Determine las Causas Próximas del problema: Hechos conocidos directamente relacionados con el problema antes de pasar a las asunciones.

Pregunté: Porqué sucedió esto

- A través de una Lluvia de Ideas determine las Causas Posibles de cada Causa Próxima.

Pregunté: Qué pudo haber causado aquello

Figura 39. Análisis de Posibles Causas



Para que el proceso sea productivo tenga en cuenta:

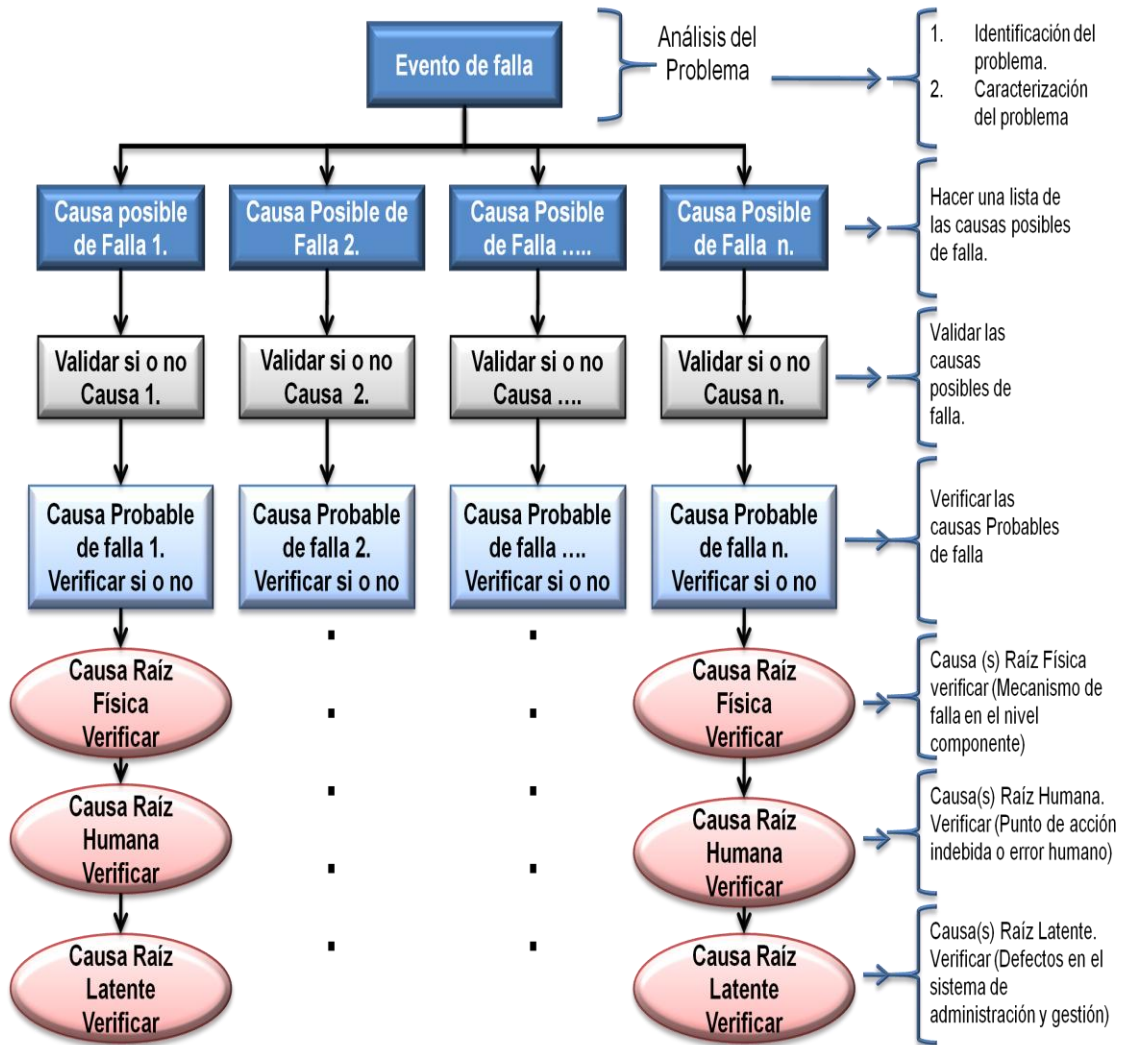
- Esté prevenido de los problemas que parecen tener una única causa, pueden existir otras causas probables que deben ser tenidas en cuenta.
- Evite la tendencia a saltar a conclusiones y acortar el proceso.

E.5.3 Fase 3: análisis y validación de evidencias para identificar la causa raíz

El análisis para identificar la causa raíz asociada a determinado modo de falla se realiza mediante el **árbol lógico de fallas** como el que se muestra en la figura 40. La construcción del árbol lógico de fallas se subdivide en niveles de causa y efecto. El árbol lógico trata estrictamente con datos reales y utiliza la lógica deductiva para trabajar sistemáticamente a través del problema, para llegar a la causa raíz real.

Se recomienda realizar una lluvia de Ideas sobre las causas de la falla: detectar y verificar las causas posibles de fallas.

Figura 40. Árbol lógico de Fallas



Los pasos para construir un árbol lógico de fallas en la aplicación de un proceso RCA son:

1. Describir el evento de la falla: Es la declaración del evento, la razón por la que se está analizando el problema.
2. Describir los modos o causas posibles de falla: Estos son los modos potenciales y los que históricamente han ocurrido en el pasado. Se pueden analizar los modos de falla como las causas posibles del evento.

3. Validar si la causa es posible: Una causa de falla es posible si no viola las leyes que conocemos, es decir, que una causa raíz sea origen de una falla es consistente con todas las restricciones que impone la información disponible.
4. Se hace una lista con las causas posibles de falla que cumplen con la información del problema y se proceden a verificar.
5. Determinar y verificar la causa raíz física
6. Determinar y verificar las causa raíz humana
7. Determinar y verificar las causa raíz latente.

En el tercer nivel se procede a establecer la hipótesis de “como” pudo haber ocurrido. La clave es ser amplio e incluir todo lo posible en las hipótesis. La idea es agrupar las causas en categorías generales. En esencia, el árbol lógico debe ir de lo general a lo específico, aplicar la lógica deductiva.

En la verificación de las causas se debe verificar cada causa para saber cuáles son verdaderas y cuáles no. La verificación de las causas da la confianza necesaria para llegar a la causa raíz correcta. Este proceso de lógica deductiva y verificación se reitera una y otra vez hasta que todas las raíces se determinan acertadamente.

En el desarrollo del árbol lógico de fallas después de haber listado los modos de falla se procede a hacer hipótesis de las causas así como de su verificación, debido a que es de suma importancia acertar en la verificación de hipótesis se hace necesario tener un cuidado especial, ***a continuación se presenta una manera para validar y verificar las causas:***

Validación de las causas.

El propósito de la Validación es determinar cuál de las Causas Posibles determinadas en la Fase 2 tienen evidencias ó hechos que la soportan (ver tabla 45). El objetivo es eliminar información no verificable ó no lógicamente soportada. Lo que se busca es asegurar que el Proceso de Solución del Problema esté basado en hechos; de forma tal que se garantice que las recomendaciones son las apropiadas a la causa del problema.

Causa probable: Es una creencia razonable (basada en hechos e información recolectada) que una causa raíz física, humana o latente sea responsable de un efecto de falla, cuando se habla de causa probable de falla se refiere a un grado (o porcentaje) de certeza entre cero y uno que una causa de falla sea el origen de un efecto de falla. Cuando hablamos de causa probable nos referimos a la relación entre las veces que podría ser una causa origen de una falla o no.

Tabla 45. Proceso de Validación.

PREGUNTA	SI LA RESPUESTA ES SI	SI LA RESPUESTA ES NO
1. Revise cada causa posible y pregunte, ¿tengo las evidencias que soportan esta causa?	Entonces se convierte en causa probable.	Pase a la pregunta 2.
2. Luego pregunte, ¿tengo todas las evidencias para eliminar esta causa?	Elimine la causa del listado.	Pase a la pregunta 3.
3. Luego pregunte, ¿existe más información disponible para confirmar o rechazar esta causa?	Busque más información o evidencias.	Mantenga la causa en el listado remanente.

Verificación de la Causa

El objetivo, es identificar y confirmar cual de las Causas Probables y de las remanentes Causas Posibles concuerdan con cada dimensión de la Descripción del Problema: *Identificación, ubicación, tiempo y Magnitud*, ver tabal 4.

Identificación: ¿Qué es lo que estamos tratando de identificar?, aquí se responde: ¿Cuál es el equipo (o el grupo de equipos) cuyo comportamiento nos preocupa? Y ¿Cuál específicamente, es ese comportamiento?, (incluir acciones que realiza el equipo y comentarios del operario)

Ubicación: ¿Dónde se observa el comportamiento?

Tiempo: ¿Cuándo ocurre?, aquí es necesario responder: ¿Cuándo se hizo aparente por primera vez este comportamiento?, ¿Cuándo se observó dicho comportamiento desde esa fecha? (Tomar nota si existe una pauta concebible en el tiempo de ocurrencia de tal comportamiento.)

Magnitud: ¿Qué tan grave o extenso es?, es decir ¿Cuál es la extensión del comportamiento? (Por ejemplo: ¿Cuántas quejas?, ¿Cuánto afecta a la operación?, ¿Hasta dónde se extiende el efecto de ese comportamiento?)

El propósito de la verificación, es mantener un enfoque basado en hechos y asegurar que las causas remanentes estén conectadas con el problema. Aquellas causas que concuerdan con la Descripción del Problema y verifican el problema se convierten en Causa Raíz. Las causas que coinciden con las cuatro dimensiones, pero que no pueden ser verificadas, permanecen como Causas Posibles.

La tabla 46. Describe el proceso de Verificación de las Causas:

- Si la causa no concuerda con las cuatro dimensiones, entonces no es causa viable al problema.
- Una verificación del 100% no es siempre posible. Algunos elementos requieren de una parada de planta para poder realizar una inspección interna.
- No recorte el camino con la “Opinión de un Experto”

Tabla 46. Verificación de las Causas

PREGUNTA	SI LA RESPUESTA ES SI	SI LA RESPUESTA ES NO
1. Tome cada Causa validada y pregunte: <i>“¿Cumple con todas las cuatro dimensiones?”: Identificación, ubicación, tiempo y magnitud.</i>	Pase a la pregunta 2	Remuévela del Listado de Causas
2. Luego pregunte <i>“¿Conozco a través de una evidencia que esta puede causar el problema?”</i>	Esta es una Causa Raíz	Pase a la pregunta 3
3. Pregunta <i>“¿Es el problema repetible por la causa que lo inició?”</i>	Se convierte en una Causa Raíz	Pase a la pregunta 4
4. Finalmente pregunte <i>“¿Si no hubiere ocurrido la causa, no hubiere existido el problema?”</i>	Esta se convierte en Causa Raíz.	Manténgala como Causa Posible

E.5.4 Fase 4: consideración de todas las posibles soluciones a la causa raíz

En esta fase del análisis se generan diversas soluciones al problema con el fin de garantizar que se está analizando ampliamente la solución al problema por el cual se hace el análisis. Las posibles soluciones se formulan teniendo en cuenta.

- ¿Qué es lo que se desea hacer? y ¿Qué se busca con lo que se va ha hacer?
- Los requerimientos mínimos y los deseables que debe alcanzar cada solución planteada.

1. Planteamiento de la Decisión.

El Planteamiento de la Decisión provee el foco para las otras etapas a desarrollar, y permite asegurar que existe un entendimiento general de que es lo que se quiere lograr y evita que se esté trabajando en el problema equivocado. El Planteamiento de la Decisión debe estar conectado exclusivamente con la causa del problema.

El proceso para definir el Planteamiento de la Solución es como se describe a continuación:

- Escriba y revise la causa raíz y pregunte
- ¿Cuál es el sujeto ó el objeto?
- ¿Cuál es la acción deseada?
- ¿Cuál es el resultado que se busca con la acción?
- Tome las respuestas a las preguntas anteriores y elabore 1 ó 2 frases de Planteamiento de la Decisión que incluya el objeto, la acción y el resultado deseado. El objeto permite definir los límites de la solución.

2. Selección de Criterios

El objetivo de la Selección de Criterios es definir los factores específicos que deben ser satisfechos por la solución. Provee las definiciones y acuerdos comunes con respecto a que es lo que se necesita y su grado de aceptación. Esto permite identificar objetivamente diferentes soluciones, ya que se han definido los requerimientos mínimos y los deseables que deben cumplir.

El proceso de establecer la Selección de Criterios está basado en definir los requerimientos mínimos a cumplir y los deseables.

a. Defina los *requerimientos mínimos* preguntando:

- ¿Qué se busca alcanzar con la solución?
- ¿Qué debe evitar la solución?
- ¿Qué debe mantener la solución?

b. Defina los requerimientos deseables preguntando:

- ¿Qué se lograría alcanzar con una solución ideal?

- ¿Qué evitaría una solución ideal?
- ¿Qué mantendría una solución ideal?

c. Soluciones Alternativas

El propósito de generar Soluciones Alternativas es asegurarse que se está analizando más ampliamente la solución al problema. Esta etapa se enfoca en buscar soluciones desde otros puntos de vista por ejemplo; “mejoramiento del equipo existente” ó “equipo de nueva tecnología”.

Por ejemplo, algunas veces, una solución ideal está por fuera del alcance desde el punto de vista económico. Sin embargo, una solución que cumpla con todos los requerimientos mínimo necesarios debe ser justificada económicamente.

Para que esta etapa de Soluciones Alternativas funcione:

- No empiece con ella hasta que no tenga definidos los Criterios de Selección
- Sea innovador, piense en soluciones que no sean convencionales
- Este es un buen momento para hablar con los expertos, para identificar que es lo que ellos recomiendan.

E.5.5 Fase 5: selección de la mejor solución

La fase final en el proceso de solución de problemas operacionales es el desarrollo de la solución. El proceso de seleccionar la mejor solución involucra: especificar que es lo que se desea alcanzar, especificar los mínimos requisitos de la solución, evaluar y comparar los resultados y entender los riesgos y beneficios asociados con cada solución. Siguiendo esta metodología no solo se logra que la solución esté direccionada a corregir la causa del problema, sino también asegura que las soluciones no son causas de otros problemas en el futuro.

I. Análisis de la Decisión

El propósito del Análisis de la Decisión es proveer los medios para determinar la Alternativa más balanceada. Esto significa, la alternativa que cumpla con todas los requisitos mínimos y genere los menores riesgos de crear otros problemas.

Recomendaciones que permitirán tomar una decisión basada en el cumplimiento de requerimientos y hechos en lugar de opiniones:

1. Compare los beneficios de cada alternativa versus los Criterios de Selección. Deseche las alternativas que no cumplan con los **requisitos mínimos**.
2. Tome las dos ó tres alternativas con la mayor calificación ó peso y evalúe el riesgo asociado con la implementación (realice este paso mediante una matriz de riesgo).
3. Use la calificación y la matriz de riesgo, y seleccione la Alternativa mejor Balanceada.

Parte de la responsabilidad que asume el facilitador del sistema, es analizar la implantación de las recomendaciones y realizar el seguimiento de su ejecución. Los resultados pueden ser comparados y medidos mediante la reducción en los costos de mantenimiento, el mejoramiento en las tasas de producción, la reducción de las tasas de falla, etc.

El RCA sería una actividad sin valor agregado si no se actúa sobre las recomendaciones y las soluciones no son implementadas en el tiempo establecido. Después de todo, es demasiado frustrante dar recomendaciones para la solución de problemas, asignar responsabilidades para la implementación, y establecer un plan de actividades para su realización, y aun así no ver el fruto de los esfuerzos.

Por lo tanto es primordial que se tome el control de las operaciones en vez de permitir que las operaciones tomen el control de la organización. Para poder obtener los recursos hasta las causas raíz y actuar de acuerdo con sus resultados.

II. Comunicar los resultados

El análisis de fallas y la verificación de las causas raíces, determinan las causas raíz físicas, humanas y latentes, para cualquier tipo de falla. Comunicar los

resultados es el paso esencial para documentar los hallazgos en las investigaciones de RCA y las recomendaciones asociadas. Estos hallazgos se deben analizar con el personal apropiado y pueden requerir de reuniones con la alta gerencia.

Un informe formal por lo general ayuda a obtener el compromiso de la gerencia para resolver las fallas centrándose en la causa raíz determinadas en la investigación. El costo de implementar los resultados se debe comparar con el costo de las fallas. Se debe tener en cuenta que las causas raíz identificadas no son negociables. Sin embargo, las recomendaciones pueden ser diseñadas para cumplir los criterios de aceptación preestablecidos.

Se debe tener en cuenta que una de las metas principales de la confiabilidad operacional es incorporar el RCA como una parte de la cultura organizacional. Esto facilitaría el análisis y la deducción lógica del porque de los problemas. Para lograr el apoyo masivo de la organización en el proceso, se requiere que participe tanta gente como sea posible y que sean reconocidas ampliamente sus contribuciones.

E.5.6 Fase 6: implementación de la solución y seguimiento

Una implementación disciplinada, documentada y una evaluación de las soluciones recomendadas proveen la base de un proceso de aprendizaje continuo y de mejoramiento.

Un seguimiento de la solución implementada permite identificar la efectividad de la solución misma.

Se deben documentar las soluciones efectivas y las lecciones aprendidas, y diseminarla dentro de la organización con el fin de evitar que el problema se repita en otro lugar distinto a su sitio de trabajo. En otros casos, el resultado de un RCA puede llevar a la implementación de una mejor práctica operativa, la generación de normas internas de obligatorio cumplimiento, ó manuales guía de consulta.

Seguimiento a la puesta en práctica de las medidas de control.

Esto se hace con el propósito de velar para que las acciones tomadas se cumplan. También significa preocuparse que las acciones no tengan efectos adversos inesperados e indeseados. Después del revuelo inicial que causa un accidente, es común dejar que las cosas pasen al olvido al surgir otros problemas contingentes. Es necesario, por lo tanto, proseguir con las acciones tomadas para que la investigación sea realmente efectiva.

E.6 EJEMPLO DEL RCA: FALLA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL DE PRESIÓN PV-5

A continuación se muestra con un ejemplo como se desarrollan las fases en la metodología RCA para encontrar la causa raíz de falla a un problema crónico.

I. Fase 1: análisis del problema

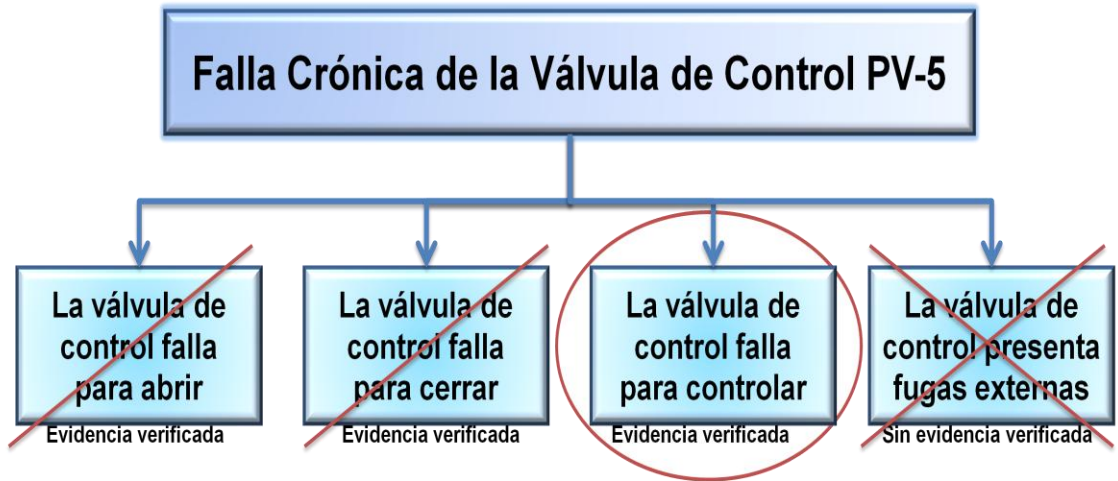
La información inicial es que el operador de un panel, se queja de que la válvula de control PV-5 está en un sitio remoto y no está respondiendo a una acción que él intenta en el control de presión. Además, esto ya sucedió una vez hace 2 meses en este año según reportes de mantenimiento.

El efecto que se presenta es el funcionamiento errático e impredecible del sistema hidráulico de transporte y almacenamiento de cajas en contenedores de la sección 3, retrasando el envío de mercancía.

II. Fase 2: consideración de todas las causas posibles de la falla

En la figura 41. Se muestra como Mediante una tormenta de ideas, el equipo determina los aspectos fundamentales que pueden presentarse para que la válvula de control de presión PV-5 falle.

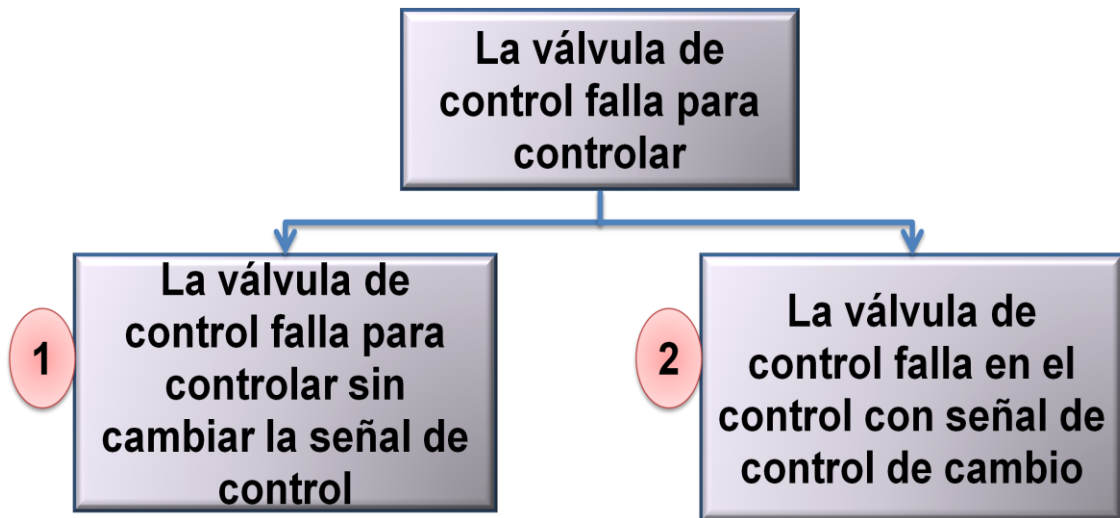
Figura 41. Modos o causas posibles de Fallas



III. Fase 3: Análisis y validación de evidencias para identificar la causa raíz.

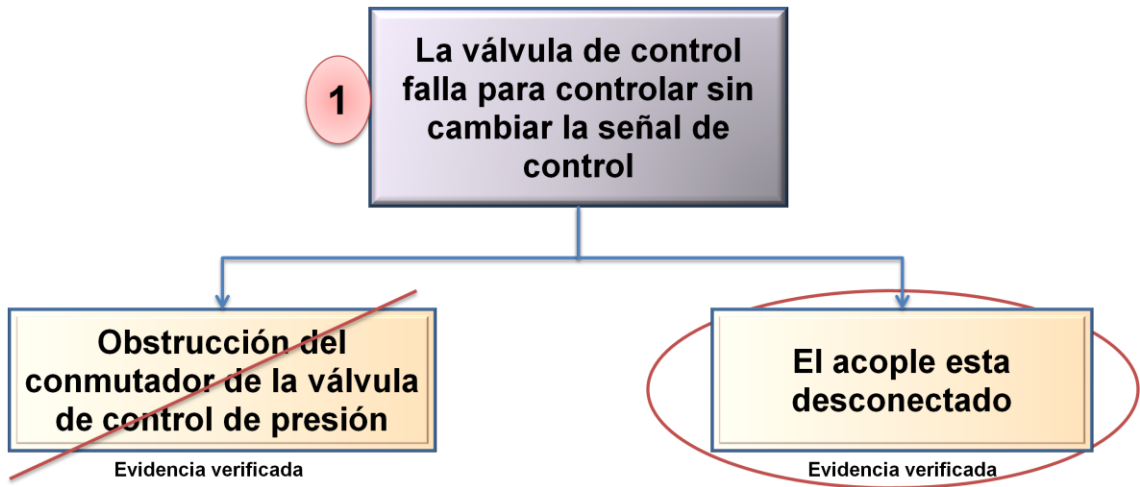
En la figura 42. Se presenta la descripción de la causa verificada.

Figura 42. Descripción del modo de falla verificado



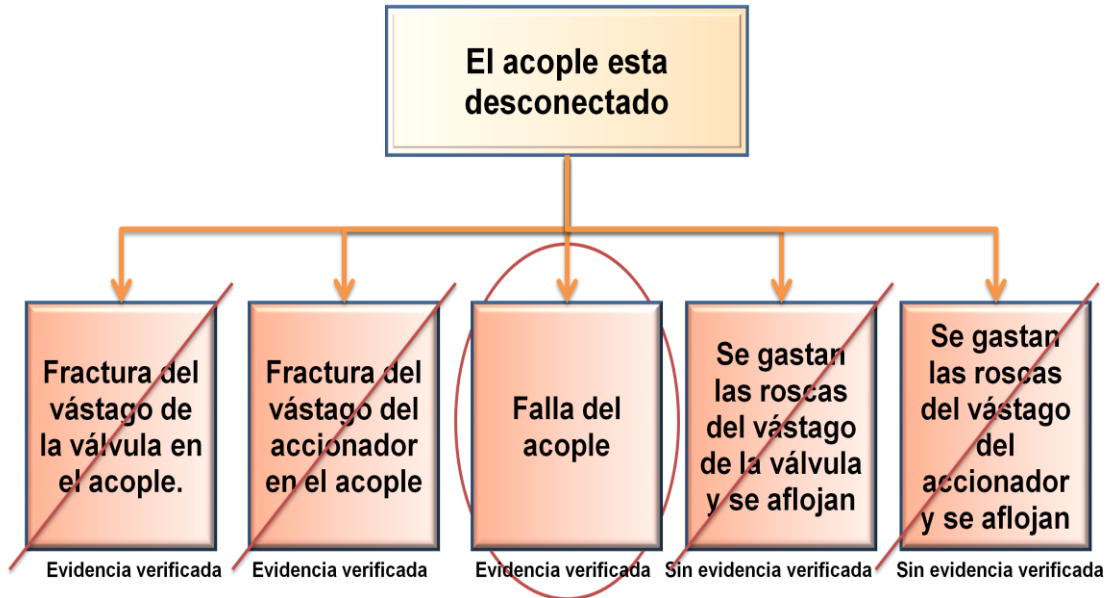
En la figura 43 se listan las causas posibles de falla del modo de falla verificado.

Figura 43. Causas posibles de falla



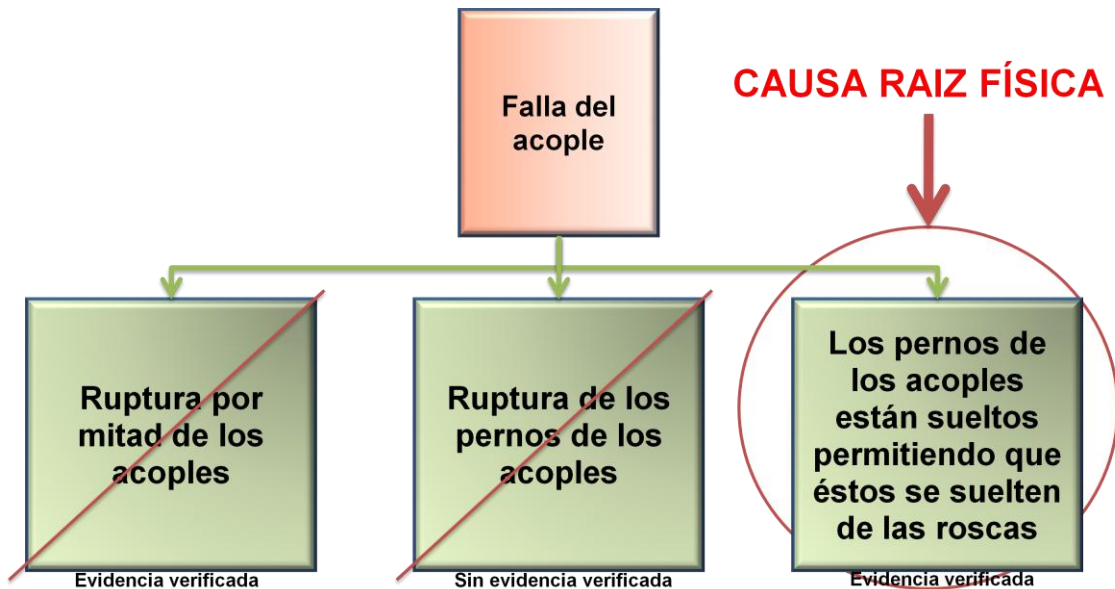
En la figura 44. Se listan las causas probables de falla de la causa posible verificada.

Figura 44. Causas probables de falla.



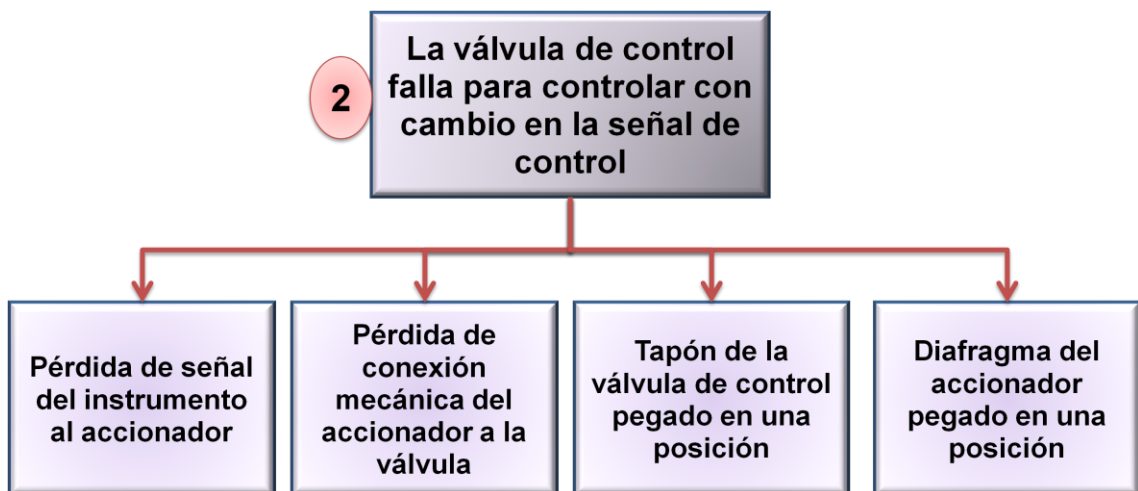
En la figura 45. Se listan y verifican las causas de falla de la causa probable verificada.

Figura 45. Causas raíz física del modo de falla 1.



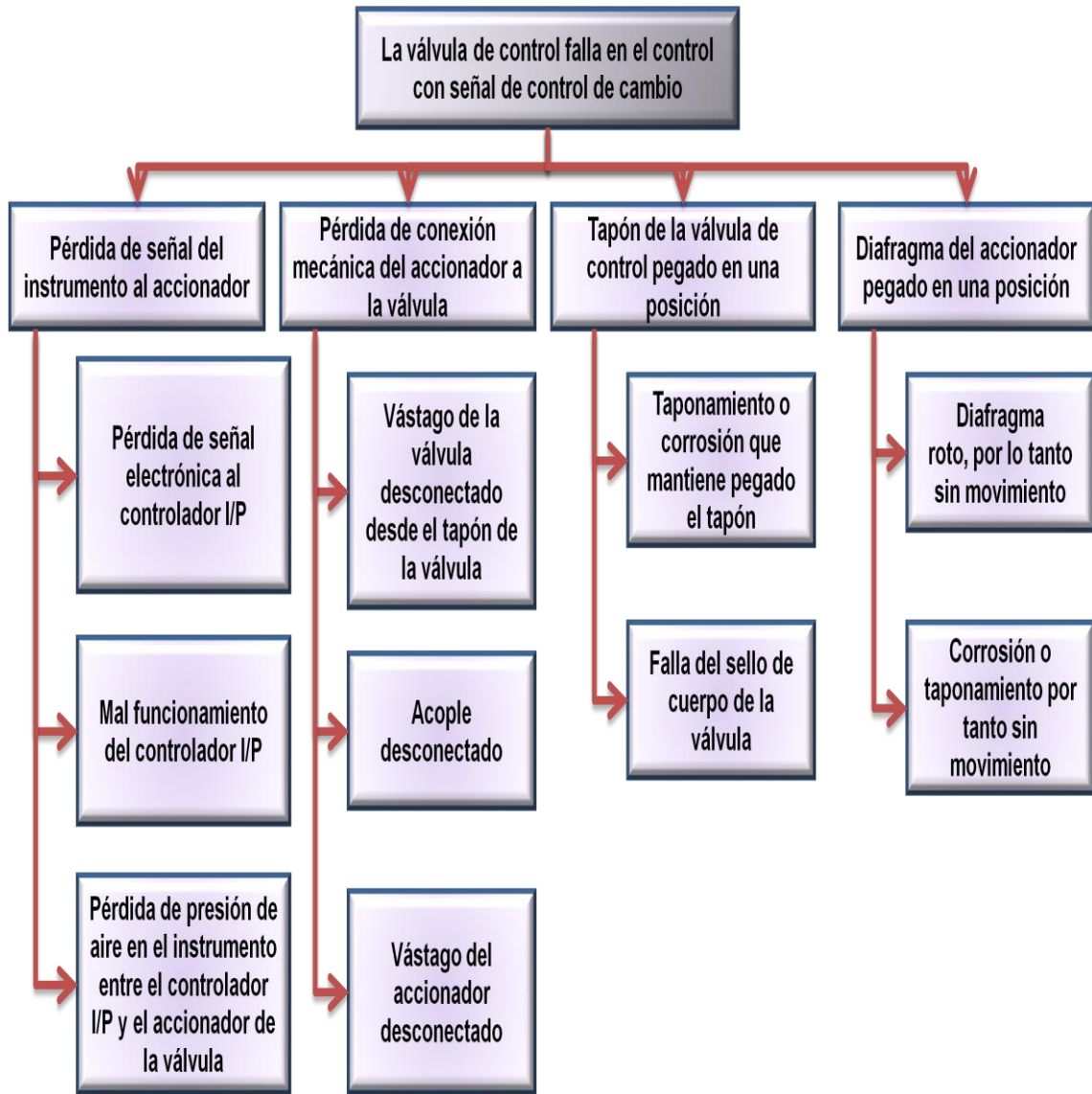
A continuación se procede a encontrar la causa raíz de falla de la segunda causa verificada. En la figura 46. Se listan las causas posibles de falla de la segunda causa que describe el modo de falla verificado.

Figura 46. Descripción de las causas posibles de falla.



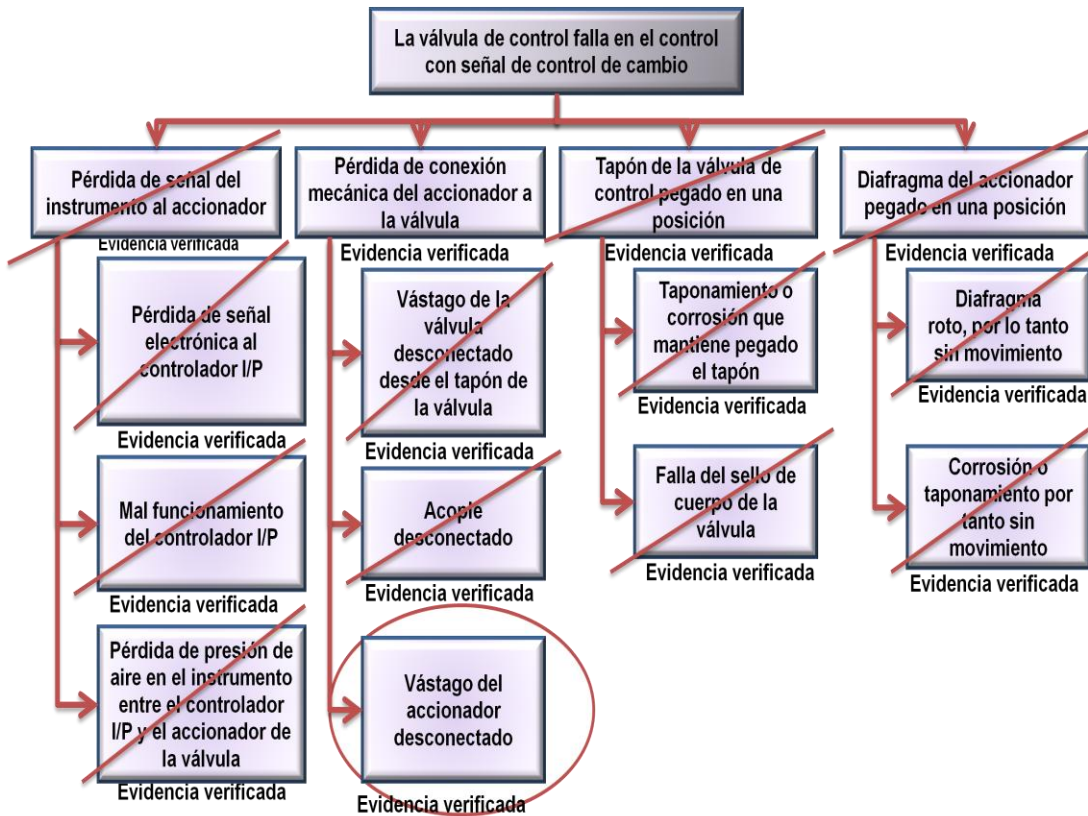
En la figura 47. Se listan las causas que pueden ser el origen de cada una de las causas posibles en la figura anterior.

Figura 47. Lista de las causas posibles de falla.



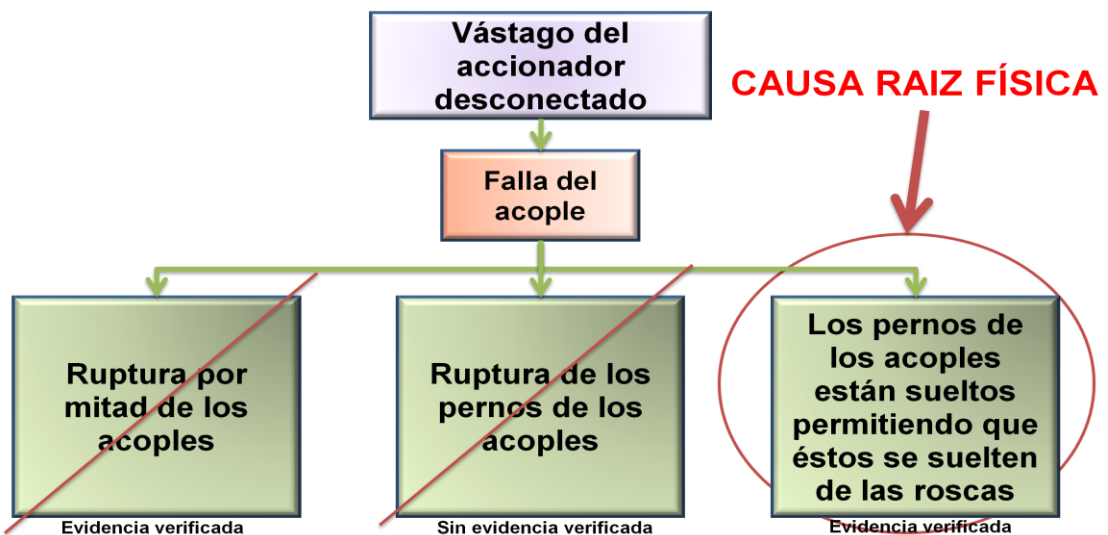
En la figura 48. Se muestra la causa verificada del listado de causas posibles de falla.

Figura 48. Causa de falla verificada.



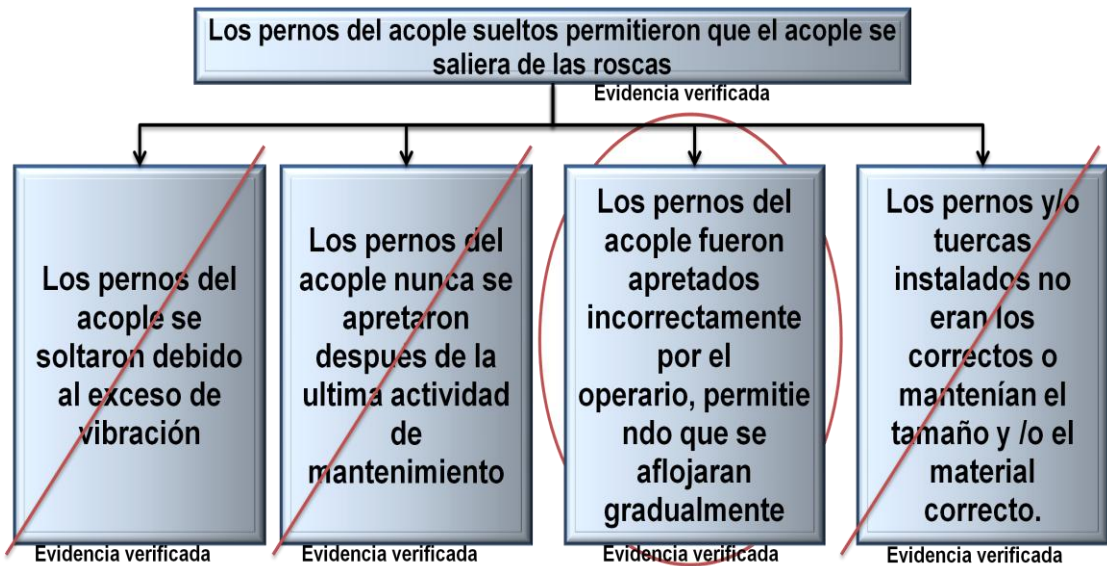
En la figura 49. Se listan las causas probables de falla de la causa posible verificada.

Figura 49. Causa raíz física del modo de falla 1.



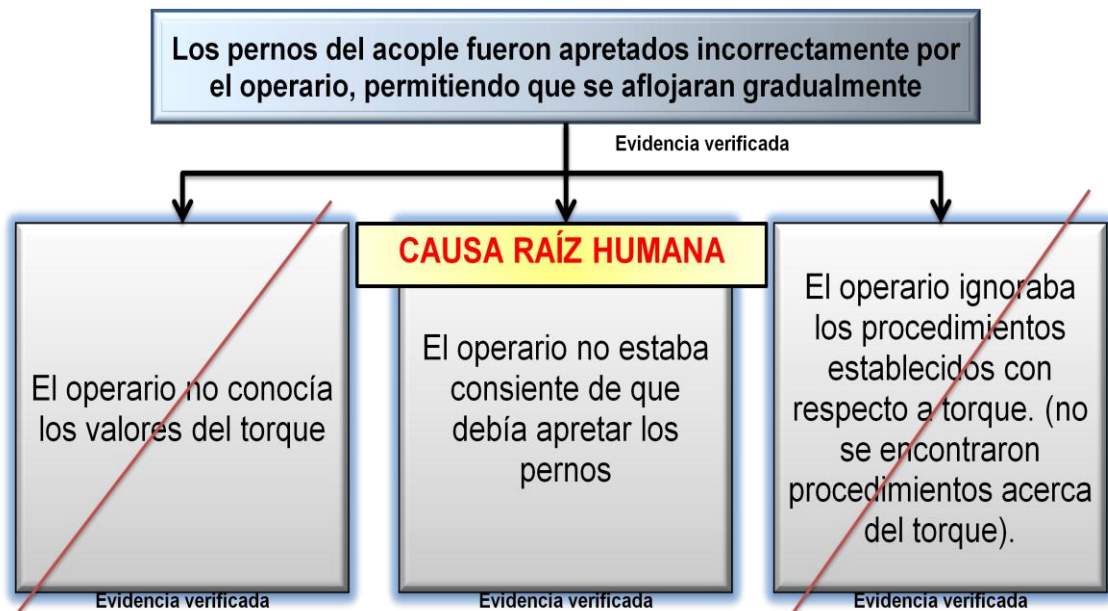
Después de hallar la causa raíz física del modo de falla verificado se busca la causa raíz humana. En la figura 50. Se hace una descripción de la causa raíz física y se listan las causas posibles de falla con el fin de encontrar la causa raíz humana.

Figura 50. Determinación de la causa raíz humana.



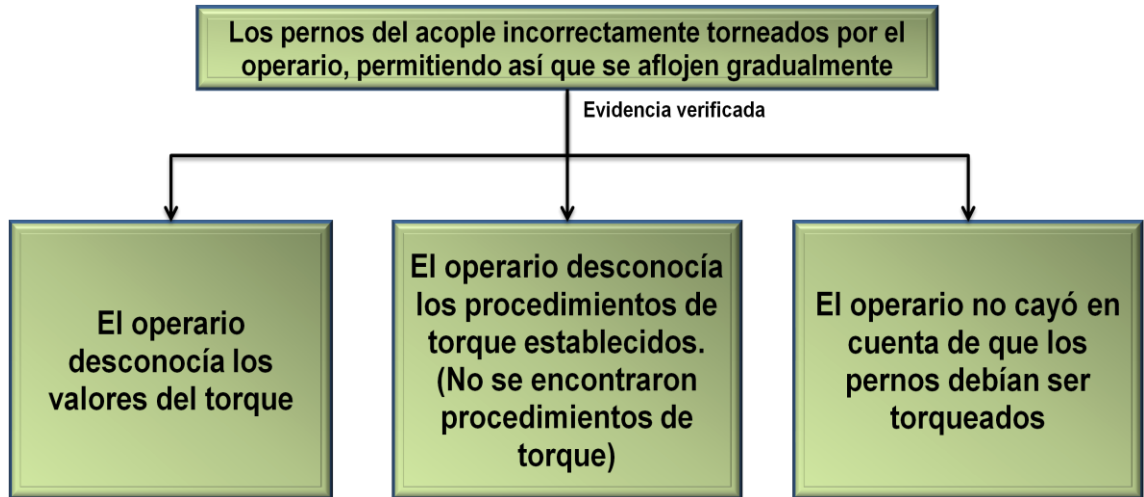
En la figura 51. Se listan las causas probables de falla de la causa posible verificada.

Figura 51. Causa raíz humana.



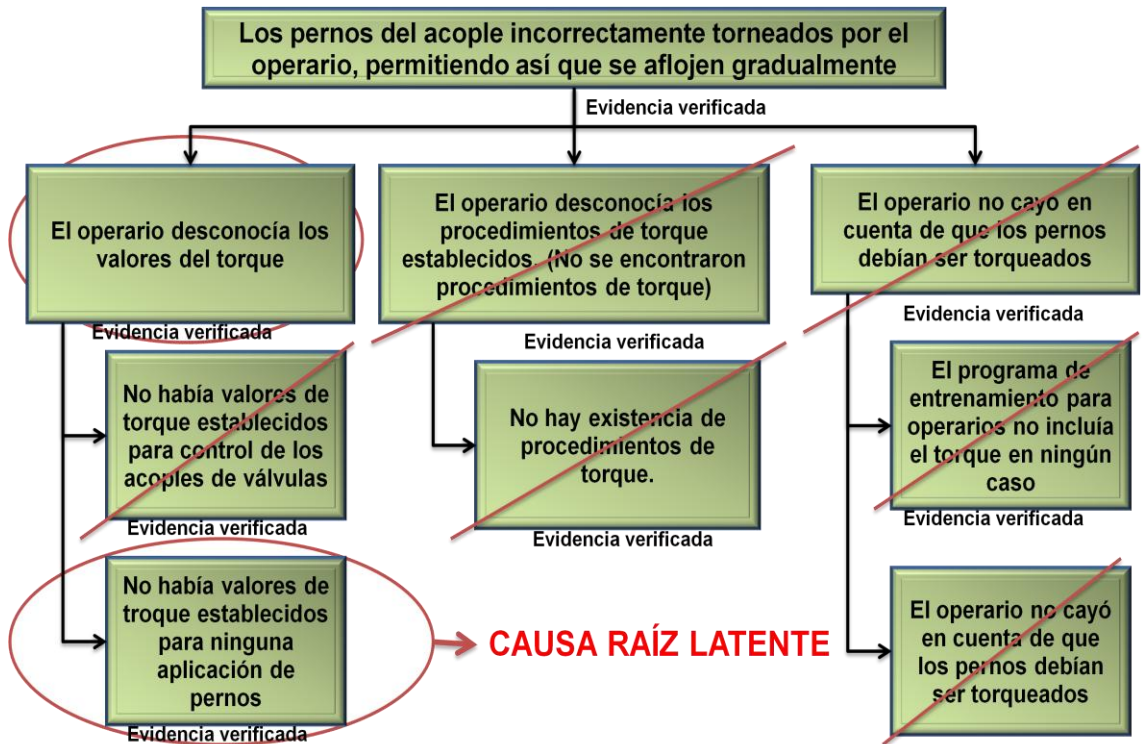
Después de encontrar la causa raíz humana del efecto de falla, se procede a buscar la causa raíz latente que origino el efecto de falla. En la figura 52. Se listan las causas posibles de falla de la causa verificada.

Figura 52. Causa posibles de falla.



En la figura 53. Se muestra la verificación de las causas posibles.

Figura 53. Verificación de las Causas posibles de falla.



IV. Fase 4: consideración de todas las posibles soluciones a la causa raíz.

Objetivos de la solución:

- El funcionamiento de la válvula de control de presión dentro de los parámetros de operación establecidos como óptimos.
- La eliminación del efecto de falla establecido como crónico en el sistema hidráulico.
- La preparación del personal de la organización para reducir la probabilidad de repetición de la falla producto de un error de procedimiento por parte del personal de operación o mantenimiento.

Acciones a llevar a cabo:

- Ajustar pernos de los acoples con el torque adecuado.
- Mostrar al personal de mantenimiento y operación la importancia del ajuste correcto de todas las piezas de un dispositivo mecánico.
- Establecer un protocolo con los valores de torque para ajuste de pernos.

Requerimientos:

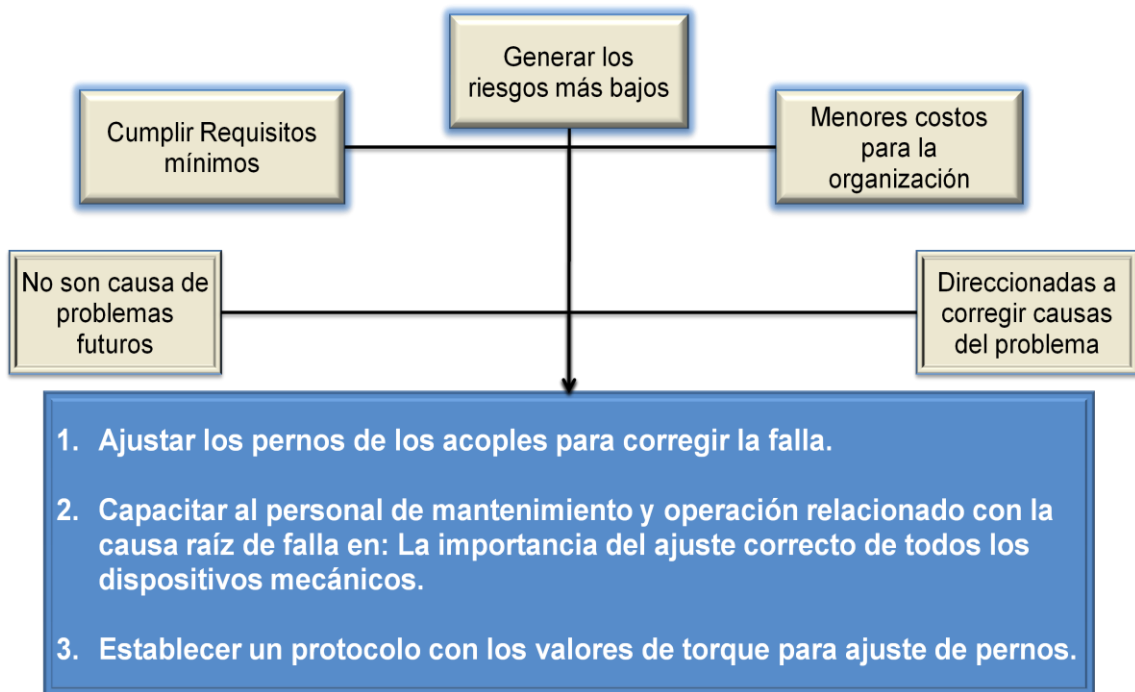
- La solución a implantar debe mantener el funcionamiento óptimo de la válvula de control de presión.
- La solución debe disminuir la probabilidad de descuido por parte del personal de mantenimiento y operación.

- Lo que se busca con la solución es eliminar la falla crónica de la válvula de control de presión.

V. Fase 5. Selección de la mejor solución

En la figura 54. Se listan los factores que hay que tener en cuenta para la selección de la mejor solución y la solución que se tomo para las causas raíz física, humana y latente.

Figura 54. Selección de la mejor solución.



VI. Fase 6: implementación de la solución y seguimiento

La implementación y seguimiento de la solución se lleva a cabo por parte del equipo RCA, él cual busca cumplir los requisitos y objetivos de la solución, además de la correcta implementación de la misma.

ANEXO F

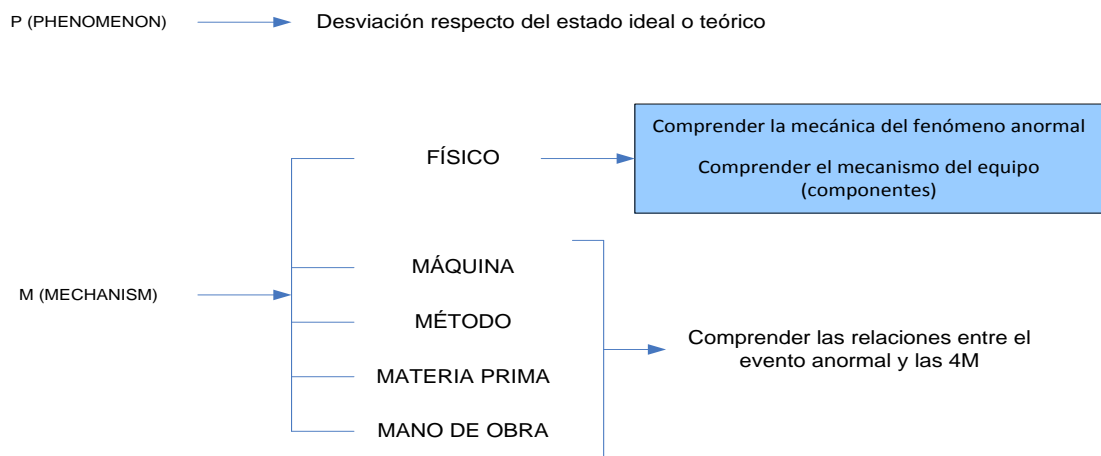
F. ANÁLISIS P-M

En análisis PM consiste en analizar las fallas en base a sus principios y mecanismos físicos respecto al equipo, materiales, mano de obra y método clarificando las condiciones que deben ser controladas en un determinado suceso, buscando todos los posibles factores causales y de esta manera eliminar los problemas.

La letra P del análisis P-M se refiere a fenómeno (Phenomenon) y la M se refiere a mecanismo (Mechanism).

Se aplica también la estructura de las 4Ms⁵³ (Máquina, Método, Materiales, Mano de obra) su estructura se resume como se ve en la figura 55.

Figura 55. Análisis PM



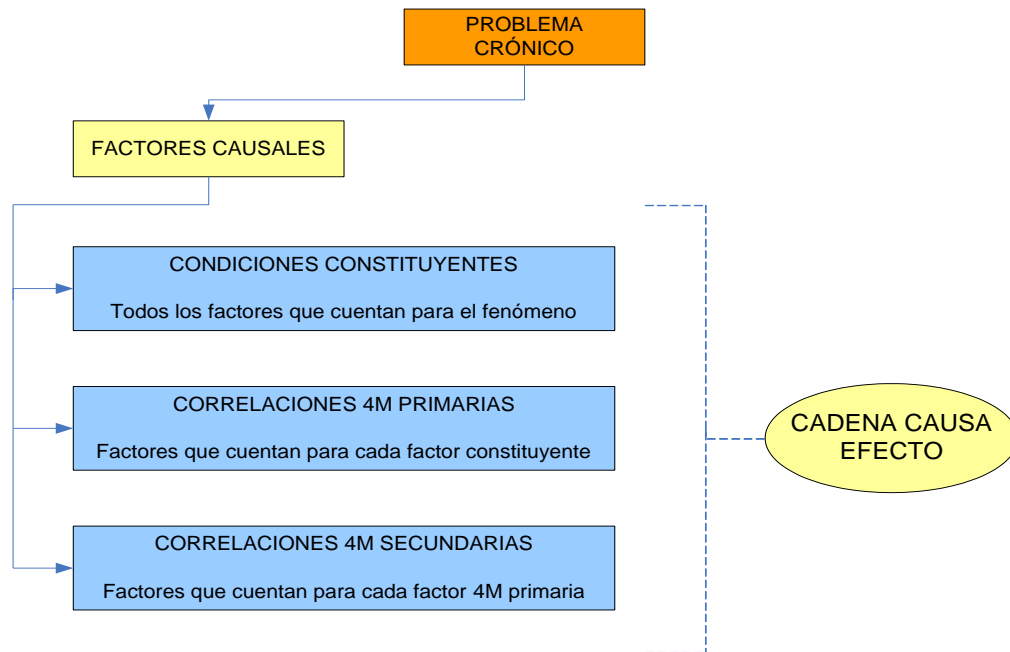
Los problemas o fallas son desviaciones del comportamiento teórico o ideal de un sistema o equipo, estas fallas se clasifican de dos tipos, esporádicas y crónicas, esto se puede ver en el ANEXO E 1 de RCA

El tratamiento que el análisis PM le da a la solución de problemas crónicos es:

⁵³ 4M's de manufactura: mano de obra, máquinas, materiales y método.

Reconocer lógicamente todos los factores causales que puedan tener un efecto sobre el problema crónico para buscar dentro de cada factor todas las anomalías no importa la magnitud de estas, la figura 56 muestra el tratamiento para la solución de un problema crónico.

Figura 56. Solución a un problema crónico



Pautas para realizar el análisis P-M

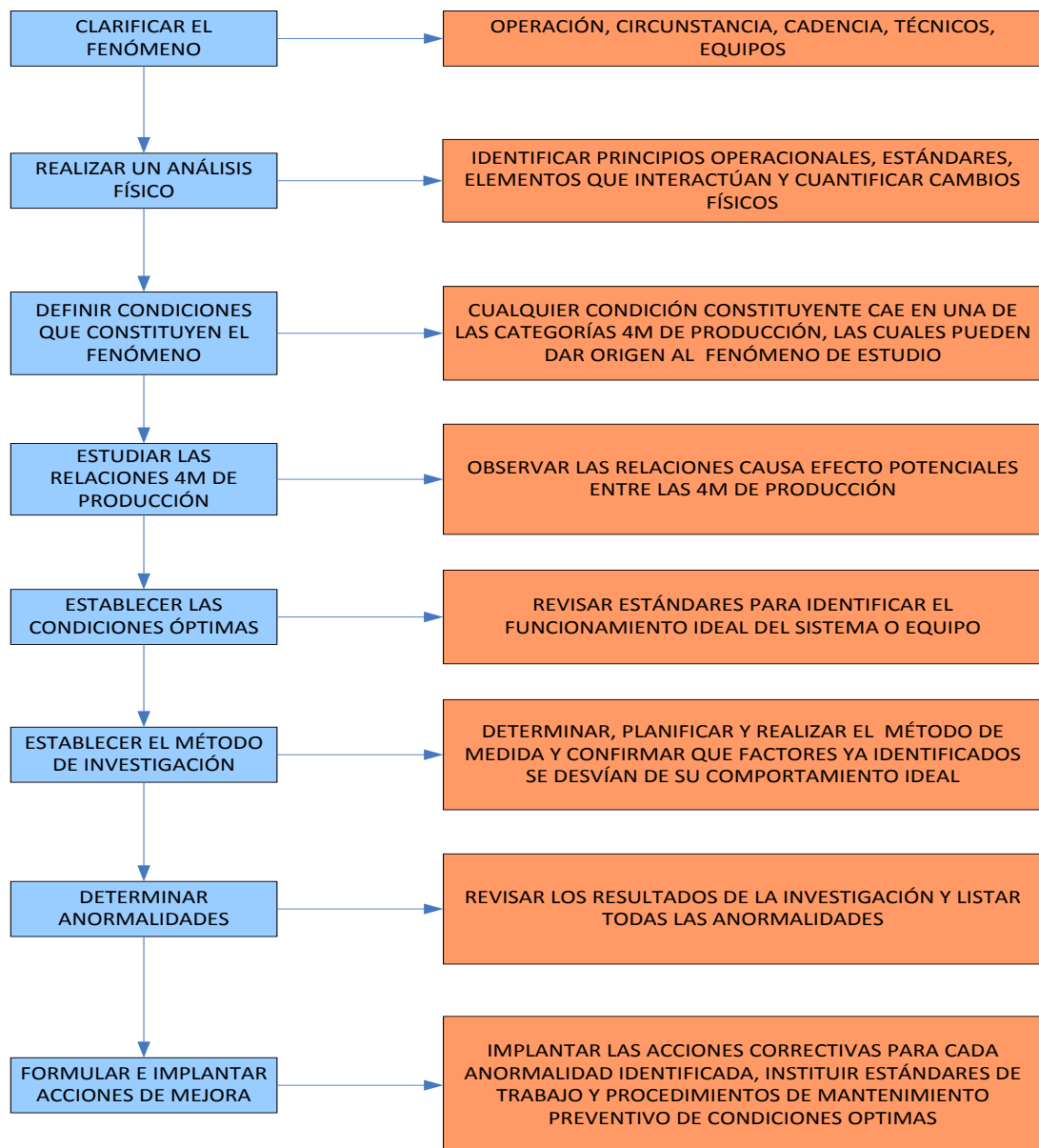
- El equipo de análisis P-M lo integra mínimo cuatro personas: preferentemente un operario, un supervisor, un técnico de mantenimiento y un ingeniero de mantenimiento, esto depende de cada organización así como del tipo de análisis.
- Dar importancia a dibujos de máquina simples y croquis del sistema o equipo.
- Listar todos los factores causales, sin importar la magnitud o impacto aparente.
- Si los valores estándar para un factor causal no están definidos ó claros, usar valores provisionales y establecer los estándares definitivos después de revisar los resultados.
- Preguntar continuamente ¿Por qué? Sobre cada anomalía y perseguir causas potenciales entre todas las 4M.

- Después de completar un análisis P-M, revisarlo para clarificar y completar.

F.1 PROCESO PARA EL ANÁLISIS P-M

El proceso que sigue la metodología para el análisis P-M se muestra en la figura 57:

Figura 57. Proceso para el análisis P-M

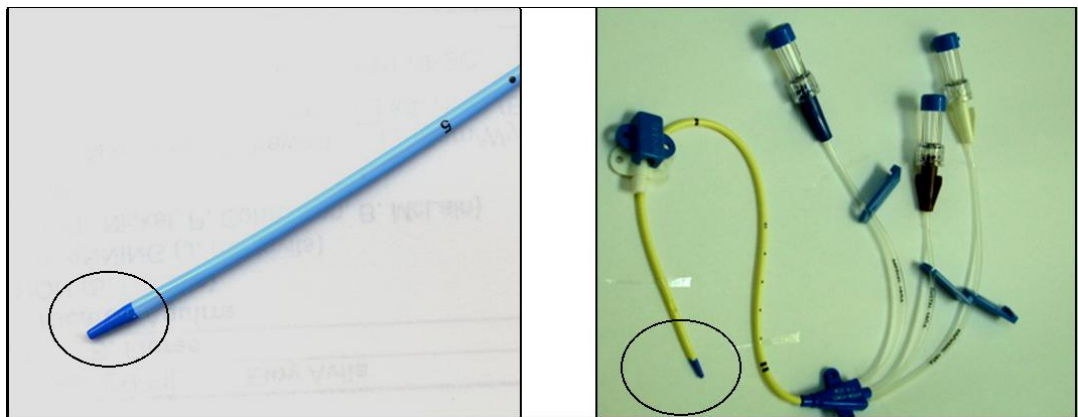


Para desarrollar la metodología etapa por etapa se mostrará con un ejemplo de aplicación: Análisis de falla aplicando la metodología PM a una empresa que fabrica productos médicos. En el Instituto Tecnológico de Chiguagua, división de estudio de postgrado e investigación realizado por el ingeniero Bardo Eugenio Flórez como tesis de maestría.

Una empresa que manufactura productos médicos, en su mayoría catéteres y dilatadores usan máquinas punteadoras para realizar un proceso de formado en la punta como se muestra en la figura 58.

La empresa estableció una meta de reducir los defectos de fabricación en esta operación de punteado, la efectividad total del equipo para máquinas punteadoras era de 0.25 y la meta era aumentarlo al menos en un 15 % y mantenerlo por más de un año

Figura 58. Productos punteados



F.2 PRIMERA ETAPA: CLARIFICAR EL FENÓMENO.

Observar el fenómeno directamente en la planta, los supuestos y presunciones no definen el fenómeno, solo bloquean las soluciones, siempre verificarlo con los propios ojos ayuda a comprender mejor el problema así como para la resolución del mismo.

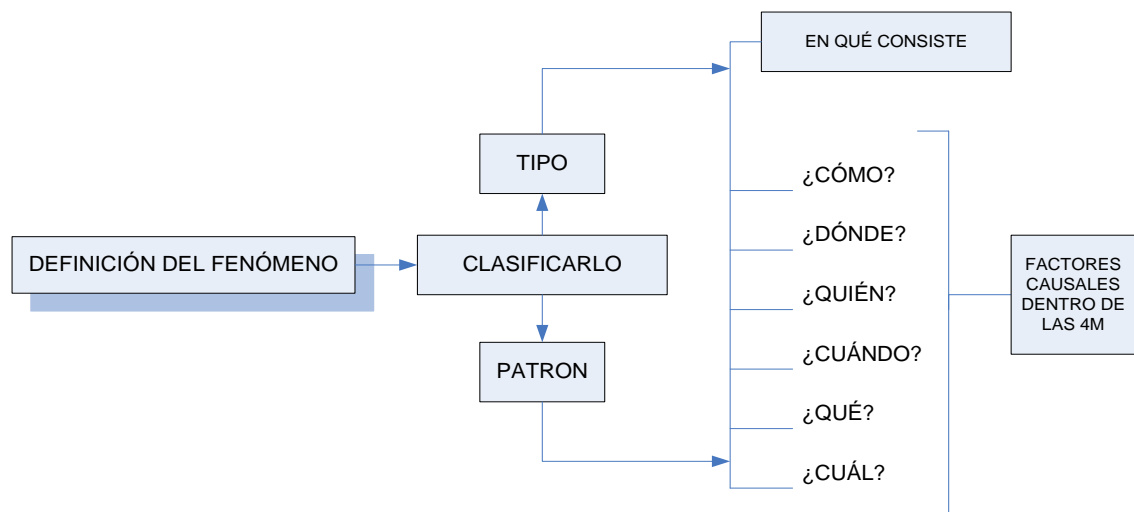
Las principales cuestiones que deben plantearse cuando se percibe un fenómeno son las siguientes:

1. ¿Durante que fase de operación de la máquina ocurre el fenómeno ó evento?
El evento ocurre al inicio, durante ó al final de la operación.
2. ¿Ocurre siempre en las mismas circunstancias: modo, tiempo, lugar, ambiente ó condición?
3. ¿Cadencia del fenómeno respecto a velocidad, carga, temperatura, etc.?
4. ¿Mejora o empeora con la edad?
5. ¿Ocurre en más de una máquina? Evaluación de equipos para ver la ocurrencia del fenómeno en diferentes máquinas de la planta.
6. ¿Ocurre solo con ciertos operarios? Revisar los recursos humanos y factores técnicos de operación.

El procedimiento para clarificar el fenómeno significa comprenderlo correctamente y clasificarlo por tipo o patrón basado en lo que consiste, como ocurre, donde ocurre, que clase de máquinas están involucradas etc.

Una técnica efectiva para definir el fenómeno es utilizar el sistema de preguntas ¿Quién?, ¿Qué?, ¿Dónde?, ¿Cuándo?, ¿Cuál? y ¿Cómo? Buscando factores causales dentro de las 4M de manufactura para estratificar los resultados de la observación. La figura 59 muestra como se define el fenómeno:

Figura 59. Definición del fenómeno



La tabla 47 muestra la relación de los respectivos cuestionamientos para realizar la definición del fenómeno:

Tabla 47. Pregunta-relación

PREGUNTA	RELACIÓN
¿QUÉ?	¿Hay variaciones debidas a los materiales de producción? (¿diferencias entre lotes?) (¿Variaciones debidas a diferentes dimensiones de piezas o formas?).
¿DÓNDE?	¿Hay variaciones debidas a equipos, accesorios, componentes? (¿En qué proceso y en cuales elementos de la máquina ocurre el problema?) (¿Alguna variación asociada con diferentes accesorios?).
¿CUÁNDO?	¿Alguna variación relacionada con el tiempo o periodo? (¿Ocurre el problema al inicio, al transcurso o al final del trabajo?)
¿CUÁL?	¿Hay tendencias características asociadas al paso del tiempo? (¿Aumentan o disminuyen los problemas?).
¿CÓMO?	¿Hay variaciones en las circunstancias de la ocurrencia? (¿Ocurre el problema con frecuencia o esporádicamente?) (¿Aparece de modo abrupto o gradualmente?) (¿Aparece en forma continua o discontinua?).
¿QUIÉN?	¿Hay alguna variación entre las personas involucradas en la operación? (¿Alguna diferencia entre los turnos de mañana, tarde y noche?) (¿Diferencias entre nuevos operarios, temporales?).

Para clarificar el fenómeno del ejemplo de aplicación se procede de la siguiente manera:

El equipo de proyecto investigo todos los procesos de punteado que llevan los diferentes productos y observo que las máquinas punteadoras en todos los casos son similares.

También el equipo selecciono un producto en el cual los índices de defectos eran mayores. Para definir claramente el fenómeno relacionado con los problemas de la línea preguntamos porque una y otra vez.

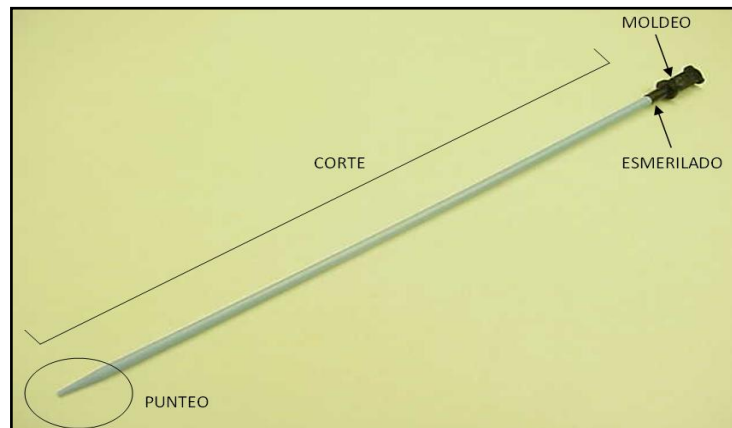
¿Por qué se producen defectos de calidad en este producto?

Para contestar esta pregunta se categorizaron los procesos.

- 1.-Corte
- 2.-Esmerilado
- 3.-Moldeado
- 4.-Punteado
- 5.-Inspección

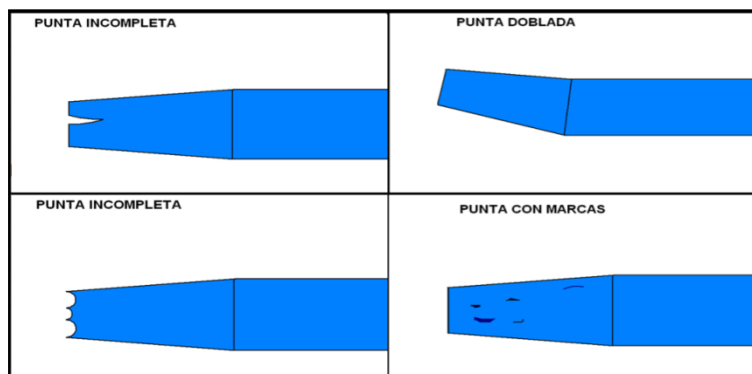
En la figura 60 se muestra el producto terminado y los procesos asociados al mismo.

Figura 60. Dilatadores



El equipo encontró que el 90 % de los defectos que se producían en la elaboración de este producto, eran en el proceso de punteado. Los defectos más comunes se muestran a continuación en la figura 61.

Figura 61. Defectos de punteado



¿Por qué se producen defectos en el proceso de punteado?

Para contestar esta pregunta el equipo realizó el siguiente cuestionario.

Puntas defectuosas.

¿Quién?

¿Hay alguna variación entre las personas involucradas en la operación?

No hay una diferencia marcada entre las personas que realizan esta operación, hay una rotación de personal muy baja y las personas ya tienen mucha experiencia en esta operación.

¿Alguna diferencia entre los turnos de la mañana, tarde y noche?

No hay una diferencia significativa entre los turnos

¿Qué?

¿Hay variaciones debidas a la materia prima, de lote a lote?

Si hay, Como el material que se usa es extruido, es muy difícil tener material que este al 100% dentro de especificación, sin embargo estas diferencias en algunos casos se pueden ajustar con el proceso y en ocasiones se rechaza el material.

¿Dónde?

¿Hay variaciones debidas al equipo, accesorios, componentes?

1. El movimiento del pistón, (el que mueve el material extruido a los bloques de calentamiento) no se mueve consistentemente en todas las piezas, es decir en algunos casos se mueve más lento que en otros.
2. Los bloques de calentamiento se tienen que ajustar a diferentes temperaturas, cuando empiezan a salir defectos, el técnico ajusta los parámetros de temperatura.

¿En qué elementos de la máquina existe el problema?

El sistema de recolección de partículas no funciona bien, ya que no absorbe los excesos eficientemente.

¿Cuándo?

¿Alguna variación relacionada con el tiempo o periodo? ¿Ocurre el problema al inicio, a la mitad o al final del trabajo?

Se tienen que hacer mínimo 3 ajustes en cada turno, pero no hay una variación justificada con tiempo o periodo, ya que se puede requerir ajuste a cualquier hora del día.

Se adopto que a la hora de empezar cada nuevo turno, el técnico va y realiza ajustes a la máquina (los requiera o no) es decir el operador pide que se revise su máquina antes de empezar cada turno.

¿Ocurre el problema después del cambio de modelo?

Después del set up la máquina puede trabajar bien por un tiempo y después puede necesitar ajustes, el tiempo en el que requerirá ajuste varía mucho, no hay un patrón determinado.

¿Cómo?

¿Hay variaciones en las circunstancias de la ocurrencia?

¿Ocurre el problema con frecuencia o raramente?

El técnico ajusta varias veces la máquina, sin embargo aunque no está permitido teóricamente que los operadores le muevan a las máquinas, se sabe que ellos ajustan temperaturas o presiones a lo largo del turno, estos ajustes no se documentan.

¿Aparece de modo abrupto o gradualmente?

Se da de los dos casos, hay veces que de repente existen defectos y luego se quitan, pero también sucede que poco a poco va empeorando un problema hasta que se le habla al técnico.

Contestando al cuestionario anterior el equipo aprendió que los problemas eran generados por combinaciones difíciles de identificar durante el proceso de termoformado en la máquina punteadora, y que al preguntar el por qué de la inconsistencia de la máquina, tanto técnicos como operadores no sabían realmente cual era la causa, ya que las respuestas fueron muy variadas.

Fenómeno:

Variación en los mecanismos de la máquina.

F.3 SEGUNDA ETAPA: REALIZAR UN ANÁLISIS FÍSICO

El Procedimiento del análisis físico para un sistema o equipo determinado se fundamenta en identificar: principios operacionales, estándares operacionales, elementos que interactúan, cambios físicos. En la figura 62 se muestra como realizar el análisis físico:

Figura 62. Análisis físico



F.3.1 Identificar principios operacionales

Estudiar los principios físicos o mecánicos asociados a la operación en cuestión. Identificar y registrar esos principios directamente relacionados con el fenómeno. Una ayuda consiste en diagramar la estructura de los mecanismos relevantes y mostrar cómo funcionan.

F.3.2 Identificar estándares operacionales

Relacione los principios operacionales con los mecanismos ó elementos del equipo para identificar los estándares que rigen las condiciones normales. ¿Cómo funcionan los mecanismos cuando no ocurre el fenómeno anormal?, cuando se encuentran en condición ideal o teórica.

F.3.3 Identificar elementos que interactúan

Se analiza el fenómeno que ocurre en relación a causas-efecto entre equipo y productos, así como los elementos o condiciones del equipo que interactúan para

producir el fenómeno anormal. Diagramas de contacto o despiece son herramientas efectivas para identificar los elementos que interactúan.

F.3.4 Cuantificar cambios físicos

Se debe aplicar métodos o herramientas para determinar cómo medir las relaciones entre elementos en unidades físicas (distancia, temperatura, velocidad, etc.).

De esta manera cuantificar los cambios que se relacionan al fenómeno anormal, así mismo se debe realizar un registro de estos para poder determinar o ayudar a la búsqueda de condiciones constituyentes.

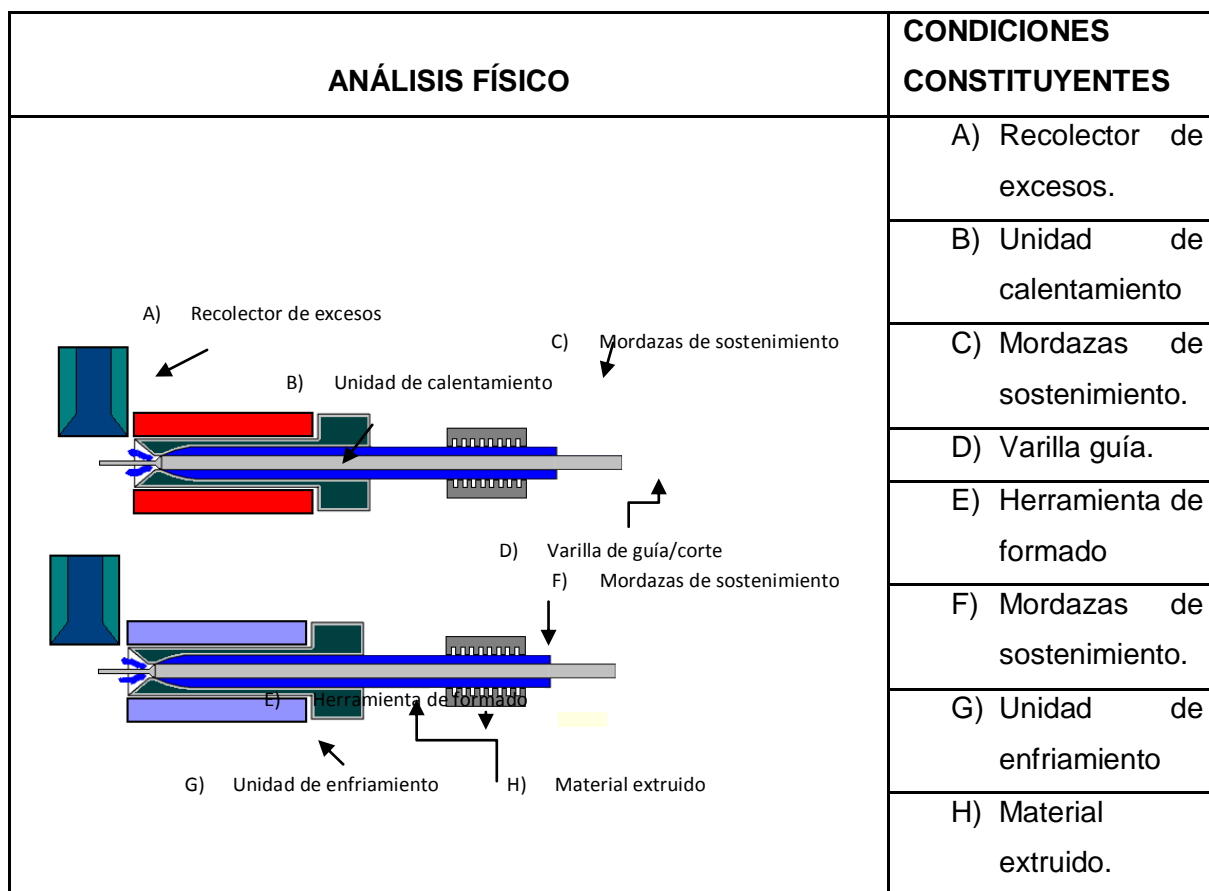
Realización del análisis físico para el ejemplo de aplicación:

Analizar el fenómeno en términos físicos implica utilizar principios para definir la intersección de los puntos de contacto entre el equipo y el producto (principios operacionales). En este caso el fenómeno fue variación de los mecanismos de la máquina. Análisis físico ilustra la iteración entre el equipo y el producto.

Se preparo un diagrama de contacto (ver figura 63) El punto de contacto en el cual la extrusión de resina se funde por una transferencia de calor producida por las resistencias a través de una herramienta y por una presión del material extruido y la varilla hacia la herramienta, lo que produce que la extrusión se molde a la forma deseada.

El equipo de proyectos definió los elementos inter-actuales como se ilustra a continuación.

Figura 63. Diagrama de contacto



Se Define el fenómeno en términos de principios operacionales:

Variación de la temperatura y de la presión durante los procesos de formado y de curado.

F.4 TERCERA ETAPA: DEFINIR LAS CONDICIONES QUE CONSTITUYEN EL FENÓMENO

Revisar todas las condiciones que fundamentalmente dan origen al problema, estas condiciones abarcan todos los factores causales.

Cualquier condición constituyente cae en una de las categorías 4M de producción:

- Máquinas: función y precisión del equipo

- Mano de obra-Personal: nivel de capacidades humanas
- Materiales: calidad de piezas, materiales recibidos del proceso anterior con calidad deficiente
- Métodos: adecuación de procedimientos y estándares

Comprender los mecanismos y estructura del equipo es de vital importancia. El conocimiento íntimo de las 4M ayuda a clarificar lo que sucede para producir problemas particulares.

Estas categorías son útiles en el análisis P-M porque el fenómeno del problema puede siempre derivarse de factores causales de, como mínimo, una de las cuatro áreas. La tabla 48 muestra la relación de las 4M con las condiciones constituyentes:

Tabla 48. Relación de las 4m con las condiciones constituyentes

CATEGORÍAS 4M	CONDICIONES CONSTITUYENTES
MÁQUINA Precisión y funcionalidad	Cuando cualquier mecanismo, componente o parte de la máquina funcione mal, buscar vínculos con el fenómeno anormal y las condiciones que producirán dicho fenómeno
MÉTODOS Y ESTÁNDARES Procedimientos desarrollados	Examinar vínculos con el fenómeno físico defectuoso cuando los estándares o procedimientos designados sean inadecuados.
MANO DE OBRA competencias laborales	Buscar vínculos con el fenómeno anormal cuando el personal relacionado con los estándares no los cumplió: nivel de capacidades humanas.
MATERIALES Calidad del proceso anterior	Buscar vínculos con el fenómeno anormal material o piezas de procesos anteriores con calidad deficiente.

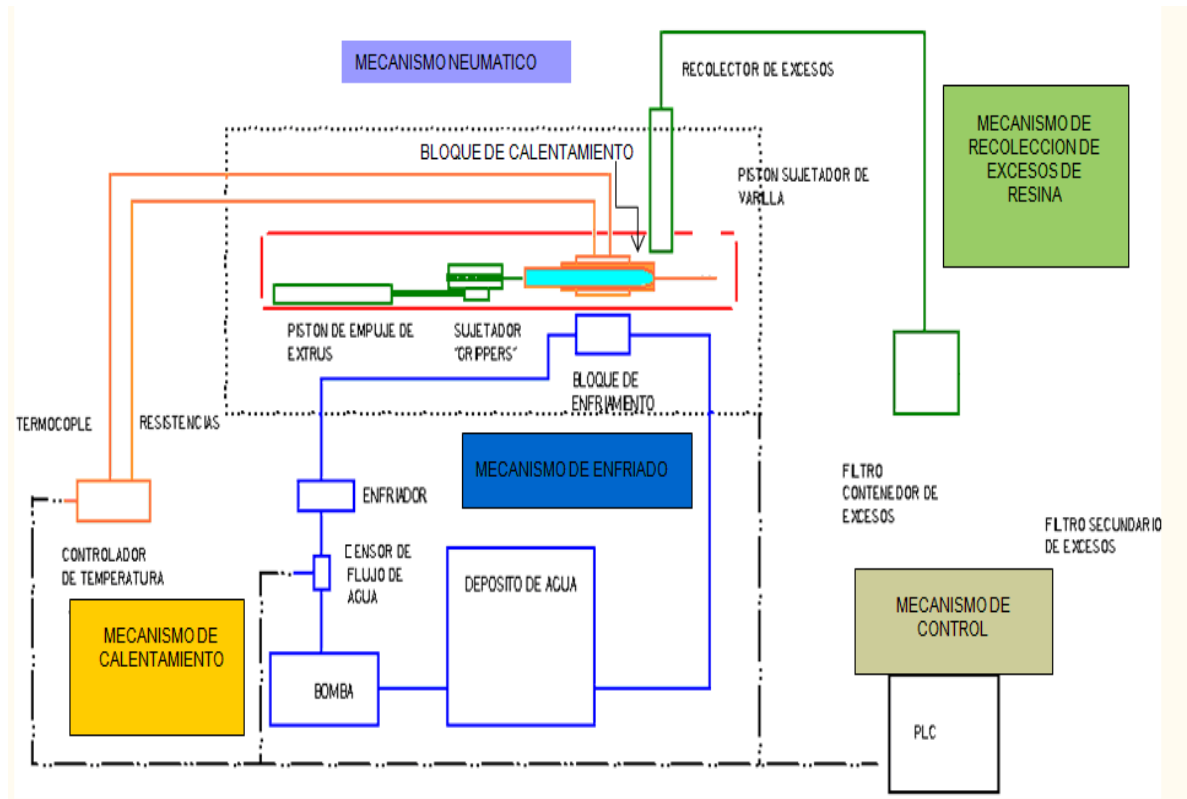
Pautas para revisar las condiciones constituyentes

- Revisar y comprender los mecanismos y estructura del equipo antes de intentar identificar las condiciones constituyentes.
- Comprender qué condiciones constituyentes se identifican revisando las correlaciones 4M (máquinas, mano de obra, materiales, métodos).
- Determinar el estado en que debe estar cada elemento funcional para generar el fenómeno anormal: observe las condiciones fuera de estándares dentro de cada elemento.
- Repasar las correlaciones 4Ms para asegurar que no se han pasado por alto ninguna condición.

Definir las condiciones constituyentes del fenómeno para el ejemplo de aplicación:

Una vez realizado el análisis físico del fenómeno, el equipo busco identificar las condiciones que consistentemente generaban el defecto. Esto implica observar el principio operacional subyacente, y preguntar que debía cambiar para crear el fenómeno. Un dibujo de los mecanismos ayudo al equipo a estudiar estas condiciones constituyentes como se muestra en la figura 64:

Figura 64. Mecanismos del sistema de formado



ESTUDIO DE LA UNIDAD DE FORMADO Y SUS MECANISMOS

Revisaremos cada uno de los mecanismos y sus respectivas funciones.

Mecanismo de enfriado.

Este mecanismo hace pasar agua por los bloques de enfriamiento, tiene un depósito de agua, una bomba, un enfriador y un sensor de flujo de agua, por medio de mangueras el agua está constantemente fluyendo por los bloques, el sensor de flujo de agua manda una señal al panel principal indicando que está fluyendo agua. Este mecanismo hace que las piezas que ya pasaron por el proceso de formado, se enfríen rápidamente y homogéneamente, para cada número de partes, el tiempo de enfriamiento varía, ya que depende del grosor de la pared del material extruido y del tipo de resina que se está formando.

Mecanismo de calentamiento.

Por medio de este mecanismo las herramientas de formado se calientan, ya que cuenta con unas pequeñas resistencias que son controladas por un traductor térmico y por un control de temperatura ubicada en el panel frontal de la máquina. El técnico de mantenimiento le da los valores de temperatura requeridos para cada tipo de extrusión que se va a puntear.

El controlador de temperatura compensa cambios en las temperaturas de los bloques, dependiendo de las pérdidas de temperatura del mismo, es decir, cuando la temperatura de bloque desciende, el control de temperatura le manda más energía hasta que llegue al valor pre-establecido por el técnico.

Mecanismo neumático/ mecánico.

Por medio de aire comprimido, los pistones, cilindros y guías neumáticas se mueven para empujar el material extruido hacia la herramienta de formado, para esto, dichos actuadores son controlados por un regulador de flujo y por un regulador de presión, los que les dará a los actuadores una velocidad y una fuerza específica dependiendo del número de partes que se está trabajando. Las guías que tienen los cilindros son mecánicas así como también las mordazas de sostenimiento, pero son accionadas neumáticamente.

Mecanismo de recolección de excesos.

El mecanismo sirve para limpiar los excesos y sobrantes del material extruido después del proceso de formación de la punta (punteo); por medio de un sistema convertidor de presión de aire a vacío, este mecanismo succiona los excesos y sobrantes y los deposita en un depósito, el cual se tiene que estar limpiando cada semana.

Mecanismo de control.

Este mecanismo está compuesto básicamente por un controlador lógico programable, y por medio de entradas tales como:

- Censores de los actuadores y cilindros.
- Señal de los controladores de temperatura que indica que ya se alcanzó la temperatura pre-establecida.
- Parámetros de la interfase que el técnico puede cambiar dependiendo del número de partes que se trabaje, como los tiempos de enfriamiento.

El controlador manda salidas como:

- Energiza las electroválvulas que hacen que se muevan los cilindros y pistones.
- Luces indicadoras de ciclo etc

PRINCIPALES MECANISMOS Y FUNCIONES

1. Mecanismo de enfriado. Enfría el material extruido ya punteado.
2. Mecanismo de calentamiento. Derrite el material a extruir para que se forme la punta.
3. Mecanismo neumático-mecánico. Empuja el material de extrusión hacia la herramienta formadora de la punta.
4. Mecanismo de recolección de excesos. Succiona las partículas, excesos y sobrantes del proceso de formado.
5. Mecanismo de control. Sincroniza la secuencia de operaciones de punteo.

Estas son las condiciones constituyentes desde la perspectiva de una de las 4M (la máquina) pero también deben considerarse las otras M's como lo son materiales, métodos y personal (mano de obra).

Los defectos relacionados con la resina con que se elaboró el material de extrusión están relacionados con defectos de calidad en el punteado, debido a métodos de trabajo inapropiados o material defectuoso en los procesos previos, y también en la preparación del proceso de punteado que se realiza por el operario, por lo que hay tres condiciones constituyentes más:

6.- Defectos de calidad en los materiales, de un proceso previo donde se hace el extruido, las variaciones que podrían tener las piezas por la calidad de la resina usada, (variación de lote a lote de resina), podría causar que con los parámetros de temperatura/presión usados (validados) en la punteadora no se puedan fundir o formar la punta.

7.- Métodos inapropiados. Variaciones en método en el cual se le aplica una solución al material de extrusión antes de termo formarlo, podrían causar variaciones en la forma que corre o se desplaza el material fundido en la herramienta de punteado durante el proceso de termo-formado.

8. Personal. Personal con un entrenamiento deficiente (en proceso de aprendizaje con poco tiempo en la operación) puede no entender los criterios de aceptación de las piezas punteadas, y no reportar a tiempo algún defecto o

F.5 CUARTA ETAPA: DETERMINAR LAS CAUSAS QUE AFECTAN CADA CONDICIÓN CONSTITUYENTE HALLANDO LAS CORRELACIONES RESPECTO A LAS 4M DE PRODUCCIÓN.

Identificar las relaciones causa-efecto entre las condiciones constituyentes y elementos específicos de las 4Ms. La condición constituyente es ahora el “efecto”, y revisamos los elementos 4M para buscar “causas” potenciales. Se identifican todos los elementos lógicamente concebibles como necesarios para generar las condiciones constituyentes.

Después de determinar las condiciones constituyentes, se relaciona con las correlaciones 4M primarias y las correlaciones 4M secundarias.

La condición constituyente es ahora el “efecto” y revisamos los elementos 4M para buscar “causas” potenciales (correlaciones 4M primarias)

Ahora cada correlación 4M primaria es el “efecto” y revisamos nuevamente los elementos para buscar “causas” potenciales (correlaciones 4M secundarias)

Las condiciones constituyentes se identifican a nivel de mecanismo. Las correlaciones primarias y secundarias descienden a niveles de subconjuntos y

componentes, respectivamente. Por supuesto, puede variar el número de niveles; por ejemplo, puede tener cuatro o cinco en el caso de máquinas complejas.

Puntos clave para derivar correlaciones 4M primarias

Considere los siguientes puntos clave cuando identifique correlaciones 4M primarias:

- Ignorar el grado de contribución del efecto. El análisis P-M deja de lado la priorización.
- Cuando evalúe correlaciones con el equipo ó herramientas, trabaje progresivamente dentro de subconjuntos, desde el inicio del movimiento así como a la base que lo apoya.
- Liste todos los elementos lógicamente concebibles para las condiciones constituyentes, también el método (incluyendo método de operación, montaje de herramientas y piezas, mediciones y equipo).
- Revise la lista de correlaciones primarias para confirmar que tienen como resultado las condiciones constituyentes.

Puntos clave para derivar correlaciones 4M secundarias

Aquí de nuevo es importante listar todos los factores cualquiera que sea su efecto o grado de contribución. Se toma cada correlación primaria y se reduce a sus elementos constituyentes (en este caso, el nivel de componente). Para cada correlación secundaria identificada, cuestione si contribuye realmente a un factor primario correspondiente. Este procedimiento es el mismo utilizado en la base 4M primaria.

El estudio de las 4M para factores causales del ejemplo de aplicación se muestra en la tabla 49.

Tabla 49. Factores causales

CONDICIONES CONSTITUYENTES	CORRELACIONES PRIMARIAS 4M	CORRELACIONES SECUNDARIAS 4M
1. Mecanismo de enfriado.	No llega suficiente agua a los bloques de enfriado	Las mangueras están obstruidas.
		La bomba se calienta y no sube el agua requerida
2. Mecanismo de calentamiento	Variación de temperatura en los bloques de calentamiento.	Las resistencias de cada bloque son de diferente capacidad.
	Variación de la temperatura por colocación de guardas de seguridad.	Los contactos entre las resistencias y los bloques no son iguales. Cuando la guarda de seguridad esta puesta y se quita o viceversa, un nuevo set up tiene que realizarse.
3. Mecanismo neumático	El avance de los pistones varía de pieza a pieza.	El suministro de aire no es constante.
		Los reguladores de flujo no regulan apropiadamente.
4. Mecanismo mecánico	Las guías mecánicas tienen mucho movimiento.	El sistema mecánico que guía a los pistones neumáticos tiene mucho desgaste.
	Los frenos mecánicos (topes) para detener los pistones neumáticos, que al mismo tiempo le dicen hasta donde llegar, son de difícil ajuste.	El tornillo de ajuste tiene una rosca de paso grande, que no permite un ajuste fino.
5. Mecanismo de recolección de excesos	El sistema no succiona las partículas y excesos.	El vacío generado no es suficiente.
		Cuando el vaso de recolección se llena, ya no succiona las partículas con fuerza.
6. Mecanismo de control	Los tiempos en las secuencias varían de un ciclo a otro.	Los tiempos programados para cada estación son diferentes.

CONDICIONES CONSTITUYENTES	CORRELACIONES PRIMARIAS 4M	CORRELACIONES SECUNDARIAS 4M
7. Defectos de calidad en los materiales (extruido)	Variación en las tolerancias del extruido (diámetro externo, ancho de pared etc.)	El extruido está fuera de especificación.
	No se alcanza a formar la punta.	El extruido hecho con material degradado.
	Variación de la temperatura por colocación de guardas de seguridad.	Cuando la guarda de seguridad esta puesta y se quita o viceversa, un nuevo set up tiene que realizarse.
8. Métodos inapropiados	El extruido se queda pegado en las herramienta	No se le aplico solución jabonosa al material extruido antes de meterlo al proceso de punteado.
		Los reguladores de flujo no regulan apropiadamente.
9. Personal/capacitación	Personal nuevo no detecta los problemas o las tendencias de material no conformante	El entrenador del área no le da la información completa y no esta durante el proceso de entrenamiento para ayudarle con los criterios de aceptación.

F.6 QUINTA ETAPA: ESTABLECER CONDICIONES ÓPTIMAS

Para establecer las condiciones óptimas debemos partir de la revisión de estándares existentes para de esta manera identificar el funcionamiento ideal del sistema, equipo o componentes, posteriormente se establece el método de medición de los parámetros operacionales que garantizan un funcionamiento ideal. Con el objetivo de realizar investigaciones comparando las condiciones constituyentes con los valores estándares.

Si los valores estándares para un factor causal no están definidos ó claros, usar valores provisionales y establecer los estándares definitivos después de revisar los resultados, o de realizar una mejora.

Revisión de estándares existentes

Se comienza por la revisión de los estándares y criterios ya establecidos. Si no existen criterios convenientes para evaluar la precisión del equipo, se desarrollan y establecen otros nuevos que reflejen los principios operacionales, la mecánica de la generación de problemas, disfunciones, estructura, función del equipo y calidad del producto.

La tabla 50 muestra fuentes de estándares relacionados con las 4M para condiciones óptimas así como criterios y normas para su desarrollo, la mayoría de los procesos ya tienen numerosos estándares criterios y normas.

Tabla 50. Estándares y criterios

4M	ESTÁNDARES Y CRITERIOS
MAQUINA Precisión del equipo	-Encontrar valores normales en diagramas de equipo, instrucciones operacionales, registro de inspección de equipos. -Encontrar valores normales de estándares de verificaciones diarias y criterios de mantenimientos periódicos. -Establecer estándares basados en correlaciones entre funciones del equipo, diseño y estándares de calidad.
MATERIALES Calidad del proceso anterior	-Usar criterios de calidad para identificar claramente las características que deben garantizarse en el proceso anterior.
MÉTODO Nivel de estándares	-Examinar y entender los estándares actuantes para arranque de equipos y operación, montaje e inspección, asegurarse que los estándares de las tareas actuales son precisos.
MANO DE OBRA Habilidades humanas	-Identificar claramente lo que corresponde al cumplimiento de dichos estándares, ejecución y protocolo de cada actividad.

F.7 SEXTA ETAPA: ESTABLECER EL MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Para determinar el método de investigación, se debe tener en cuenta:

- Determinar los modos más eficientes y fiables para medir el desfase entre la condición de los factores causales ya identificados y sus valores ideales o teóricos en la propia máquina.

- Planificar la investigación.
 - Cuando: fecha, turno, duración.
 - Quien hace que: responsabilidades asignadas a individuos y departamentos.
 - Con que: organizar la preparación de herramientas de trabajo, e instrumentos de medida.

- realizar la investigación, anotar resultados y comparar con los estándares óptimos para determinar qué factores contienen anomalías y son en consecuencia causas actuales reales del fenómeno.

- Revisar y medir las 4M primarias y secundarias solamente para las condiciones constituyentes cuyos valores medios sean diferentes a los valores estándares.

F.7.1 Selección de métodos apropiados

Ninguna persona suele estar familiarizada con todos los métodos que pueden requerirse para medir los diversos factores, se debe contar con personas calificadas que ayuden a seleccionar los métodos o herramientas apropiados de medición. La tabla 51 muestra algunas herramientas de medida.

Tabla 51. Herramientas de medida

#	LO QUE VA A MEDIR	HERRAMIENTA DE MEDIDA	#	LO QUE VA A MEDIR	HERRAMIENTA DE MEDIDA
1	Holgura axial	Calibre de dial	17	Diámetro externo	Micrómetro
2	Tensión de correa	Medidor de tensión	18	Diámetro interno	Pie de Rey
3	Vibración	Vibrometro	19	Velocidad de aire y Caudal volumétrico	Anemómetro
4	Revoluciones por minuto	Tacómetro	20	Abrasión	Calibre de dimensiones
5	Anormalidad rotación	Vibrometro	21	Rugosidad superficie	Rugosiméto
6	Frecuencia	osciloscopio	22	Distancias	Odómetro
7	Corriente eléctrica	Amperímetro	23	ajuste	Galga
8	Potencia	vatímetro	24	Magnetismo residual	Gaussometro
9	Resistencia	Medidor de aislamiento	25	Grietas, rectificado	Test de baño ácido, rayo ultravioleta
10	Temperatura	Termómetro	26	Contaminación de fluido hidráulico	Codificador rotativo, Ferrografía
11	Fuerza de apretado de perno	Llave de par de perno	27	PH	Medidor de PH análisis químico, Phi metro
12	Par	Medidor de Par	28	Limpieza de aire	Contador de partículas
13	Fuerza	Medidor de fuerza de resorte (dinamómetros)	29	Sonido	Decibelímetro
14	Presión	Manómetro	30	caudal	Rotámetro, Esclusa, Turbina
15	Ruido	Estetoscopio	31	Espesor	Espectrómetro
16	Movimiento interno	Endoscopio	32	Humedad relativa aire	Higrómetro

Etapas 5 y 6 para el ejemplo de aplicación (Establecer condiciones óptimas, Investigación de factores)

La tabla 52 muestra los resultados de las investigaciones comparando las condiciones constituyentes con los valores estándares.

Tabla 52. Valores constituyentes-valores estándares

PUNTOS DE CHEQUEO	CONDICIONES A CONTROLAR	MÉTODO DE MEDICIÓN	VALORES ESTÁNDARES	VALOR MEDIDO	EVALUACIÓN
1.-Mecanismo de enfriado	Temperatura de bloques de enfriamiento	Termómetro	85°F-87°F	85.4	No es causa
2. Mecanismo de calentamiento	temperatura de bloques de calentamiento	Termómetro	711°F-723°F	734	Requiere mejora
	Variación de temperatura en herramientas por guardas de seguridad	Termómetro	1°F	Varían entre 3 y 5°F	Requiere mejora
3. Mecanismo neumático	La velocidad constante de los pistones neumáticos	Visual	Debe mostrar una velocidad constante sin atascos durante la trayectoria	Presenta atascos durante el recorrido	Requiere mejora
	La lubricación de todo el sistema neumático	Gotas de aceite por minuto	1	1	No es causa
4. mecanismo Mecánico	Guías de deslizamiento de los pistones neumáticos	Vernier	No debe tener movimiento axial mayor de 1 mm	Movimiento axial de 2 mm	Requiere mejora
5. Mecanismo de recolección de excesos	La cantidad almacenada de partículas en el contenedor apropiado	Visual	No debe de estar más llenos de ¾ partes del contenedor	lleno	Requiere mejora
6. Mecanismo de control	Los controladores de temperatura deben de estar calibrados	Comparación con controlador de temperatura patrón	No debe de variar más de 5% de las lecturas tomadas.	Varia de entre 1 y 4 %	No es causa
7. Defectos de calidad en los materiales (extruido)	El diámetro del extruido, tanto el interno como el externo	Comparador óptico /gas	No deben varia más de lo que está establecido en el diseño.	Hay secciones en las que esta fuera de especificación.	Requiere mejora
8. Métodos inapropiados	Que se trabaje con guarda de seguridad	Visual	Siempre debe de estar trabajando con de seguridad	Se trabaja en ocasiones sin guardas de seguridad	Requiere mejora
9. Personal capacitación	Tiempo de capacitación	Visual, verificación de registros de entrenamiento	Mínimo un mes de entrenamiento (20 días hábiles)	Si cumple con el periodo de entrenamiento	No es causa

F.8 SÉPTIMA ETAPA: DETERMINAR ANORMALIDADES A TRATAR

Se revisan los resultados de la investigación (identificación de factores causales y sus condiciones), ahora se decide que desviaciones de condiciones se consideraran verdaderas anomalías y se tratarán en consecuencia. Los siguientes lineamientos han probado ser útiles.

Claves para identificar anomalías:

- Investigar profundamente todos los factores.
- Comparar las condiciones anormales con los estándares corrientes o provisionales.
- Pensar en términos de condiciones óptimas, no solo en condiciones necesarias.
- Clasificar como anormal cualquier hecho en el límite entre lo normal y lo anormal.
- Comprende los factores causales asociados con cada condición clasificada como anormal.

F.9 OCTAVA ETAPA: FORMULAR E IMPLANTAR ACCIONES DE MEJORA

A los equipos se proponen y realizan mejoras y correcciones óptimas requeridas para cada anomalía, planificando e instituyendo medidas preventivas apropiadas.

Se siguen las siguientes pautas para implantar mejoras:

- Recordar que la restauración (de las condiciones óptimas) viene antes del reemplazo o modificación del diseño.
- Después de la restauración, planificar mejoras que resuelvan problemas estructurales del equipo, actualicen tecnologías obsoletas y eviten repeticiones.
- En la restauración y mejora del equipo, agrupar tantos factores como sea posible y gestionarlos conjuntamente.
- Confirme la precisión de los resultados. Preguntar, “¿se ha dejado afuera algún factor?” y “¿son correctos los valores estándares?”
- Estandarizar mejoras y establecer medidas preventivas para evitar vueltas atrás.

Estandarizar es de importancia ya que se puede implantar medidas preventivas e incorporar o revisar estándares operacionales que sean necesarios para mantener condiciones óptimas. Solo cuando ya no sucedan anomalías o cuando pueda detectar sus primeras señales y corregirlas, podrá decir que el trabajo de eliminarlas se ha terminado.

Las Etapas 7 y 8 para el ejemplo de aplicación: Identificar anomalías, Hacer mejoras, se muestran en la tabla 53.

Tabla 53. Anormalidades y mejoras

PUNTOS DE CHEQUEO	CONDICIÓN A CONTROLAR	MÉTODO DE MEDICIÓN	VALORES ESTÁNDARES	VALOR MEDIDO	EVALUACIÓN	RESTAURAR MEJORA	RESULTADO
1. Mecanismo de enfriado	Temperatura de bloques de enfriamiento	Termómetro	83°F-93°F	85°F-88°F	No es causa		
	Diferencia de temperatura de un bloque con el otro	Termómetro	No más de 2 °F	De 2 a 5 °F	La manguera de uno de los bloques de enfriamiento estaba obstruida	-Se reemplazaron las mangueras. -Se incluyeron rutinas de mantenimiento preventivo que verificaran esta condición	Confirmados dentro de los valores establecidos.
2. Mecanismo de calentamiento	Temperatura de bloques de calentamiento. Con guarda de seguridad	Termómetro	715°F-725°F	716°F-723°F	No es causa		
	Temperatura de bloques de calentamiento. Sin guarda de seguridad	Termómetro	715°F-725°F	711°F-726°F	Requiere mejora	-Hacer set up con guarda de seguridad y no quitarla durante el turno. -Se puso un sistema con sensores en cual la máquina no opera si no está la guarda de seguridad puesta.	Confirmado con la guarda de seguridad hay menos variación de temperatura
3. Mecanismo neumático	Avance constante de los pistones neumáticos	Visual	Debe mostrar una velocidad constante sin atascos durante la trayectoria	Mostro varios atascos durante recorrido	Requiere mejora	-Se reemplazaron los reguladores de flujo convencionales por reguladores de precisión.	Confirmado, el avance se ve constante y sin atascos.
4. mecanismo Mecánico	Guías de deslizamiento de los pistones neumáticos	Vernier	0-1mm	2-3mm	Requiere mejora	-Se reemplazaron las guías anteriores por guías nuevas.	Confirmados dentro de los valores establecidos

5. Mecanismo de recolección de excesos	La cantidad almacenada de partículas en el contenedor	Visual	No debe de estar más llenos de ¾ partes del contenedor	lleno	Requiere mejora	-se puso un contenedor transparente para que se pudiera apreciar nivel de llenado del contenedor. -Se incluyo una actividad diaria verificación del contenedor en las operaciones des operador en lugar del técnico que era semanal.	Confirmados dentro de los valores establecidos
6. Mecanismo de control	Los controladores de temperatura deben de estar calibrados	Comparación con controlador de temperatura patrón	No debe de variar más de 5% de las lecturas tomadas.	entre 1 y 4 %	No es causa		
7. Defectos de calidad en los materiales (extruido)	El diámetro del extruido, tanto el interno como el externo	Comparador óptico /gas	No deben varia más de lo que está establecido en el diseñó.	Hay secciones en las que esta fuera de especificación.	Requiere mejora		
8. Métodos inapropiados	Que se trabaje con guarda de seguridad	Visual	Siempre debe de estar trabajando con de seguridad	Se trabaja en ocasiones sin guardas de seguridad	Requiere mejora	-Hacer set up con guarda de seguridad y no quitarla durante el turno. -Se puso un sistema con sensores en cual la máquina no opera si no está la guarda de seguridad puesta.	Confirmados dentro de los valores establecidos
9. Personal capacitación	Tiempo de capacitación	Visual, verificación de entrenamiento	Mínimo un mes de entrenamiento (20 días hábiles)	Si cumple con el periodo de entrenamiento	No es causa		

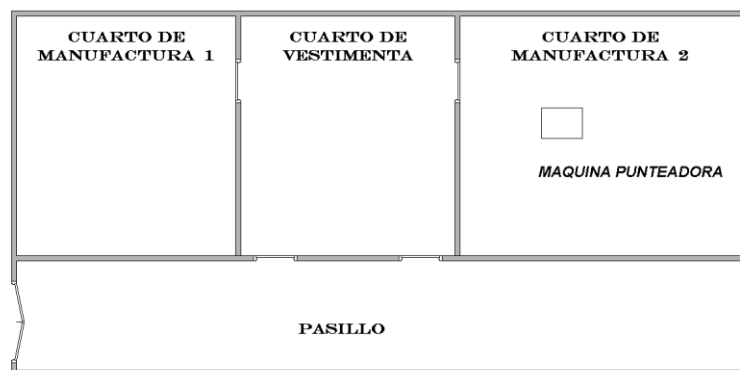
MEJORAS Y RESULTADOS.

Guarda de seguridad

El equipo aprendió que la guarda de seguridad tenía un papel muy importante en este proceso, ya que además del propósito de seguridad para evitar quemaduras en los operarios, también disminuía variaciones de temperatura en las herramientas, la explicación a esta variación se fundamenta en el ambiente donde se tiene este proceso, es decir, la manufactura de productos médicos introductores como son catéteres, jeringas, agujas etc., debe de realizarse en cuartos limpios clase 100,000 en dichos cuartos debe de haber una presión positiva respecto al exterior o a cuartos intermedios, ya que tiene que haber presiones positivas de adentro hacia afuera, de tal forma que cuando se abre una puerta al cuarto de producción, la presión positiva de éste hace que un flujo de aire salga del cuarto y así evitar que entren partículas que puedan contaminar el producto medico que se realiza.

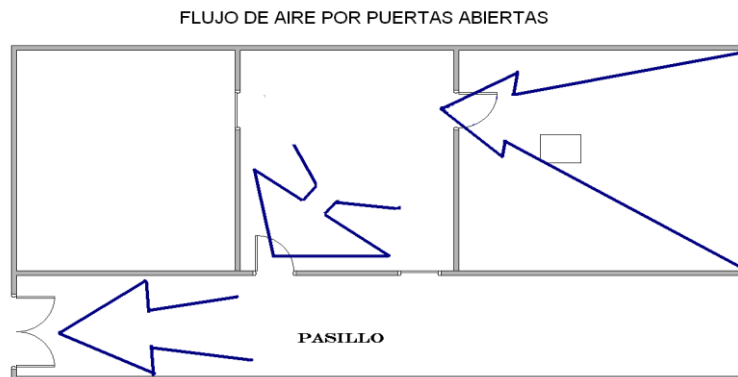
PRESIONES DIFERENCIALES

Figura 65. Presiones diferenciales



En la figura 65 y 66 de manufactura tienen una presión de aire superior al cuarto de vestimenta, y el cuarto de vestimenta tiene a su vez una presión mayor a la del pasillo.

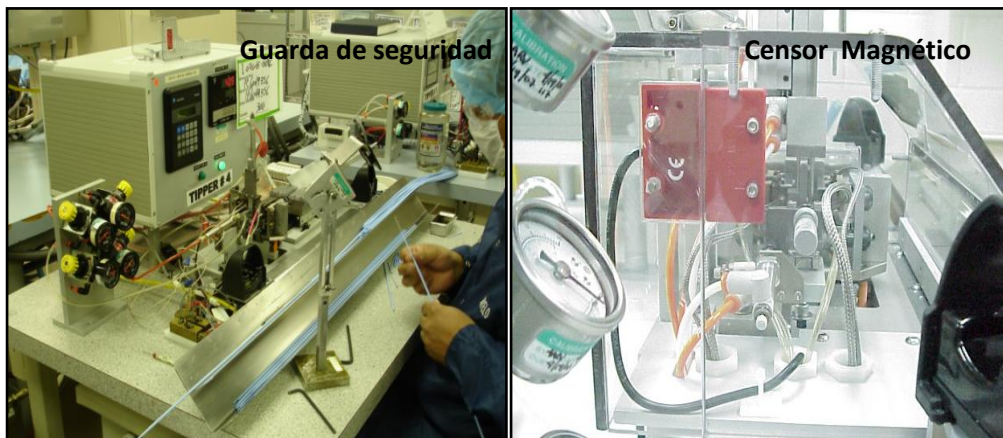
Figura 66. Flujo de aire



Cuando las guardas de seguridad son removidas de la máquina y se está operando sin ellas, y se abre la puerta del cuarto de manufactura, se genera una caída de presión, en la cual se forma un flujo de aire hacia fuera que funcionaría como enfriador de las herramientas de la máquina.

Por lo anterior mencionado se optó por un sistema de seguridad que combinara ambas cosas (figura 67), que diera protección al operador y que se asegurara que en ningún momento durante el ciclo de la máquina se pudiera quitar la guarda, por lo que se instaló un sistema con sensores magnéticos en la guarda, conectados en serie con la alimentación de la máquina, de tal forma que al quitar la guarda, la máquina se desconectaba automáticamente.

Figura 67. Guardas de seguridad



Reguladores de flujo de precisión y guías mecánicas de pistones.

Las guías mecánicas o rieles deslizantes para los pistones ya que estaban muy desgastadas por el mismo uso a través de los años fueron reemplazadas por nuevas, para el caso de los reguladores de presión, recordemos que esta máquina punteadora trabaja extruidos de diferentes diámetros desde 5 french (1 french es la tercera parte de un milímetro) hasta 11 french, para esto el equipo observó que para diámetros gruesos como el 10 y 11 french el pistón neumático debe de meter el material extruido a la herramienta de punteo muy lento ya que la cantidad de resina que se tiene que fundir es mayor y los reguladores de flujo convencionales no podían lograr este avance lento. Por lo que se optó por poner reguladores de precisión, con esto la regulación es más fina (figura 68).

Figura 68. Reguladores de flujo



Mecanismo de recolección de excesos.

Dada la naturaleza de este mecanismo de recolección de partículas y exceso el equipo de mejora observó que el contenedor de partículas era de acceso difícil y además que era totalmente cerrado, es decir que no se podía ver qué porcentaje estaba lleno y las actividades de limpieza se realizaban como acciones correctivas, es decir ya cuando el mecanismo de recolección estaba totalmente lleno y era disfuncional, ver figura 68 izquierda.

Se buscó información de tipos de contenedores recolectores de partículas y se encontró uno transparente, así que se reemplazó por el cerrado que se tenía y además se cambió de localización de tal forma que quedara de más fácil acceso. Ver figura 69 derecha.

Figura 69. Contenedor de excesos



Tomar medidas para evitar la repetición y confirmar resultados.

La etapa 8 del análisis P-M consiste en dos fases: primera, proponer y hacer mejoras para obtener condiciones óptimas y entonces verificar la efectividad de las mejoras y establecer estándares y medidas preventivas para mantener las condiciones óptimas. Cuando la acción inicial no corrige la anomalía, debe iniciarse otra ronda de mejoras hasta que una de ellas sea efectiva.

El equipo de mejora, para asegurarse que estas ganancias no fueran de corta duración, revisó y cambió los procedimientos del técnico de mantenimiento así como las instrucciones del operador, de esta forma además de actividades de limpieza del operario, también verifica que el depósito de partículas este vacío antes de empezar el turno normal de producción.

El ingeniero eléctrico cambió la instrucción del controlador lógico programable, de tal forma el sensor de flujo de agua debe de estar mandando señal de flujo para

que la máquina pueda iniciar su ciclo, es decir al igual que la guarda de seguridad, el sensor de flujo de agua deben mandar señal al controlador para iniciar ciclo, si una de estas condiciones no está presente la máquina no podrá trabajar.

Medibles.

Antes de iniciar con las actividades de mejora, se verificó la efectividad total del equipo para después de la implantación evaluar el efecto del análisis P-M sobre la máquina punteadora, en la tabla 54 se muestra esta información.

Tabla 54. Medida de la efectividad total del equipo

	Promedio hasta antes de implementación (Abril 2006)	Promedio hasta enero del 2008 después de implementación
Razón de calidad	0.92	0.96
Utilización (Disponibilidad)	0.46	0.81
Eficiencia	0.60	0.69
Eficiencia Total Equipo	0.25	0.54

La tabla 54 muestra un 29 % de aumento respecto a la eficiencia total del equipo obtenido antes del inicio con el análisis P-M.

ANEXO G

G. METODOLOGÍA ¿POR QUÉ? ¿POR QUÉ?

Esta metodología es conocida como: "Know-why", "conocer-porqué", "técnica porqué, porqué, porqué" o "quinto porqué". Se emplea para realizar estudios de las causas profundas que producen fallas en el equipo. El principio fundamental de esta técnica es la evaluación sistemática de las posibles causas de la falla, empleando como medio la inspección detallada del equipo, teniendo presente el análisis físico del fenómeno.

El método ¿Por qué? - ¿Por qué? busca unificar a través de la inspección y el análisis físico, todos los posibles factores causales de la falla, para lograr reconstruir el deterioro acumulado del equipo y encontrar la causa raíz del problema. Básicamente el proceso consiste en identificar las causas probables y empezar a preguntar "¿Por qué es así?" o "¿Por qué está pasando esto?" (La razón) para todos los factores causales posibles y verificar la respuesta, continuar preguntando ¿Por qué? al menos cinco veces. Esto reta al equipo humano a buscar a fondo y no conformarse con causas ya "probadas y ciertas" hasta llegar a la causa primera o raíz y proponer una acción que lo contrarreste figura 70, un correcto análisis de la causa del problema nos permitirá erradicar definitivamente el mismo, es un método sencillo que por su facilidad puede ser utilizado por los mismos operarios.

Esta herramienta nos hace más objetivos en nuestra manera de ver las cosas. Con esta metodología evitamos: esfuerzos innecesarios al encontrar soluciones parciales, en los análisis de averías de equipos que el grupo de estudio se desvíe e identifique causas cualitativas y complejas de verificar como causas potenciales del problema de la falla de las máquinas, evita caer durante el análisis en temas como los siguientes: "es un problema de políticas de la compañía", "debido a la falta de personal", "falta de capacitación del personal", "no hay repuestos". En la

figura 71 se muestra un resumen de lo que se puede lograr aplicando este método.

Figura 70. Desarrollo general método ¿por qué? - ¿por qué?

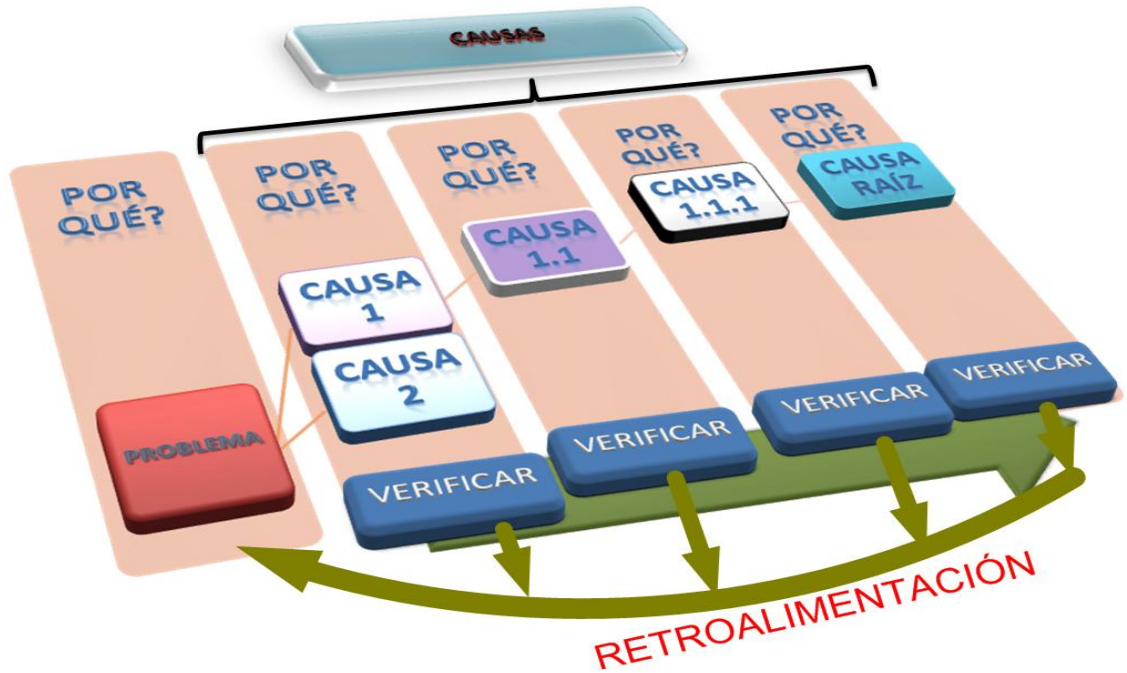
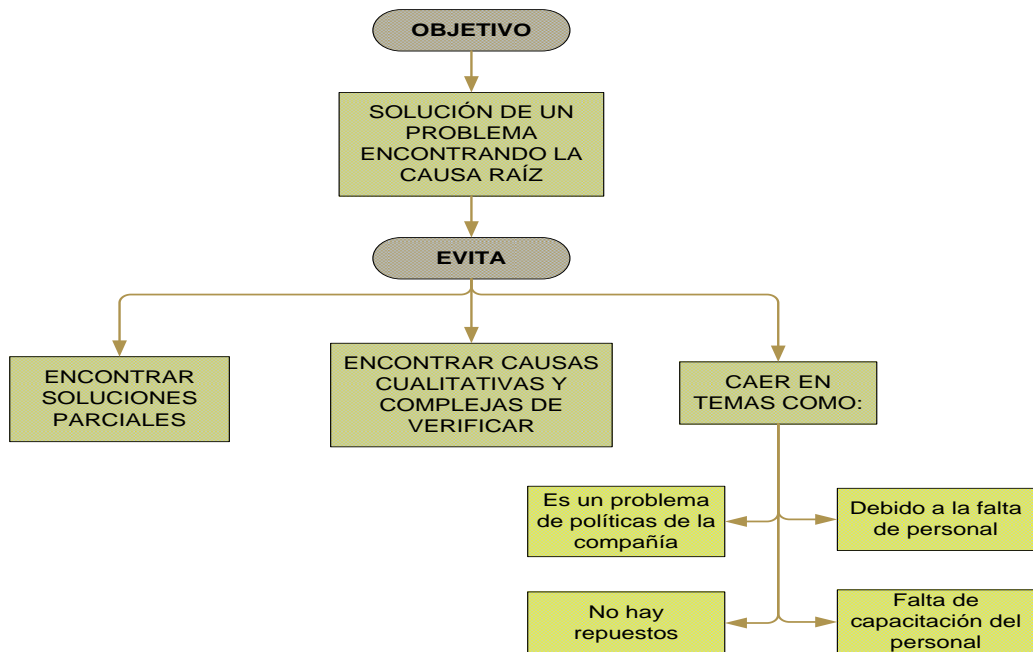


Figura 71. Que se consigue con el método ¿Por qué? - ¿Por qué?



G.1 ANTECEDENTES DE LA METODOLOGÍA

La técnica fue desarrollada originalmente por Sakichi Toyoda y más tarde fue utilizada dentro de Toyota Motor Corporation, durante la evolución de sus métodos de fabricación (Sistema de Producción Toyota). La evolución de este sistema de producción se desarrollo usando la metodología llamada los “los cinco porqués”. El arquitecto del Sistema de Producción Toyota, Taiichi Ohno describe la metodología de los 5 ¿por qué? como "la base del enfoque científico del Toyota. Al preguntar por cinco veces ¿por qué?, aclaramos la naturaleza del problema, así como encontramos su solución." Preguntar repetidamente ¿Por qué? Es la base científica del sistema de Toyota. La herramienta se ha generalizado y ahora es utilizado dentro de métodos como: Kaizen, la eficiencia en la fabricación, Six Sigma y análisis de fala⁵⁴.

G.2 REQUISITOS Y CONSIDERACIONES SOBRE EL ANÁLISIS ¿POR QUÉ? – ¿POR QUÉ?

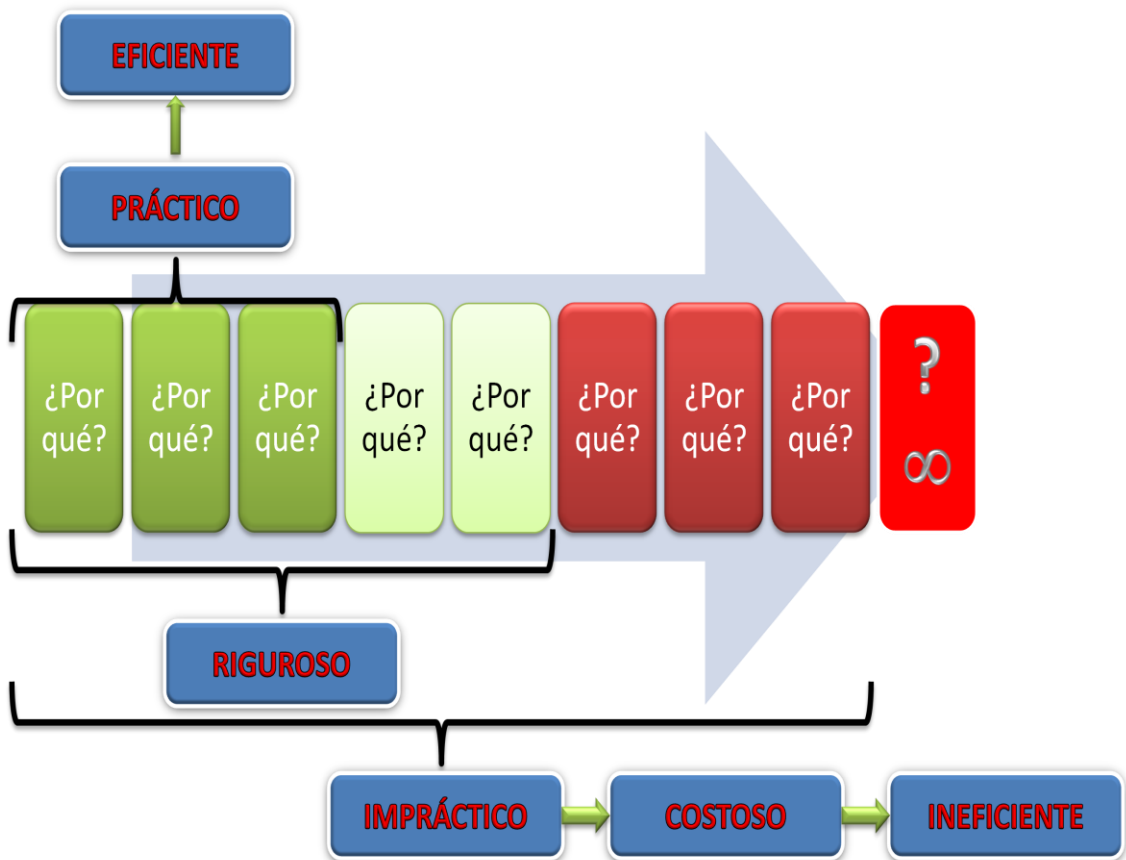
Esta metodología se desarrolla mejor en grupos pequeños, se puede conformar por personal capacitado en análisis de fallas y jefes de producción y/o operarios. El análisis es un esfuerzo de equipo, no por una sola persona, se deberá establecer una dinámica de funcionamiento en el grupo y las relaciones entre los miembros del grupo, esto con el fin de mantener las relaciones dentro del grupo en buenos términos ya que a veces la pregunta ¿por qué? puede incomodar a las personas.

Algunas veces es difícil saber hasta dónde se puede llevar el análisis, probablemente se puede continuar desarrollando siempre que podamos responder a la pregunta ¿Por qué? Así hasta un número infinito de veces como se muestra en la figura 72 Esto es impráctico e innecesario. El punto en donde se debe

⁵⁴ Taiichi Ohno; prólogo de Norman Bodek (1988). Sistema de producción Toyota: más allá de la producción a gran escala. Portland, Or: Productivity Press. ISBN 0915299143 . Portland, OR: Productividad de prensa.

terminar el análisis es donde no se tiene control o influencia sobre la solución o el arreglo, en este punto seguir respondiendo al ¿por qué? aporta muy poco al análisis, se recomienda que se haga cinco rondas de preguntas ¿Por qué?, ya que con esto será suficiente para llegar a la causa raíz del problema, aunque esto puede variar de acuerdo a la complejidad de la falla presente, o de las actividades que se vean afectadas. En el desarrollo del método sólo se debe responder a la pregunta ¿Por qué?, y nunca responder a la pregunta ¿Quién? Ya que no se trata de encontrar culpables, sino causas raíces de las fallas de los equipos.

Figura 72. Hasta cuando preguntarnos ¿Por qué? - ¿Por qué?



La respuesta a cada pregunta ¿por qué? se debe realizar desde un punto de vista técnico y científico enmarcada en el contexto del proceso, no se deben admitir respuestas sin fundamentos.

Es importante realizar una lista de control o un formulario donde se incluya de una forma ordenada cada pregunta con su respectiva respuesta, de esta forma, no perder el rumbo del análisis y encontrar la causa raíz de la falla. El análisis termina cuando las contramedidas para evitar la repetición del problema se encuentran, Es un método sencillo y de fácil aplicación en comparación con otros métodos de análisis de fallas, en ocasiones el mismo operario puede aplicar la metodología si la conoce bien, si conoce el equipo, el proceso y las causas son fácilmente verificables.

G.3 CUANDO UTILIZAR EL ANÁLISIS ¿POR QUÉ? ¿POR QUÉ?

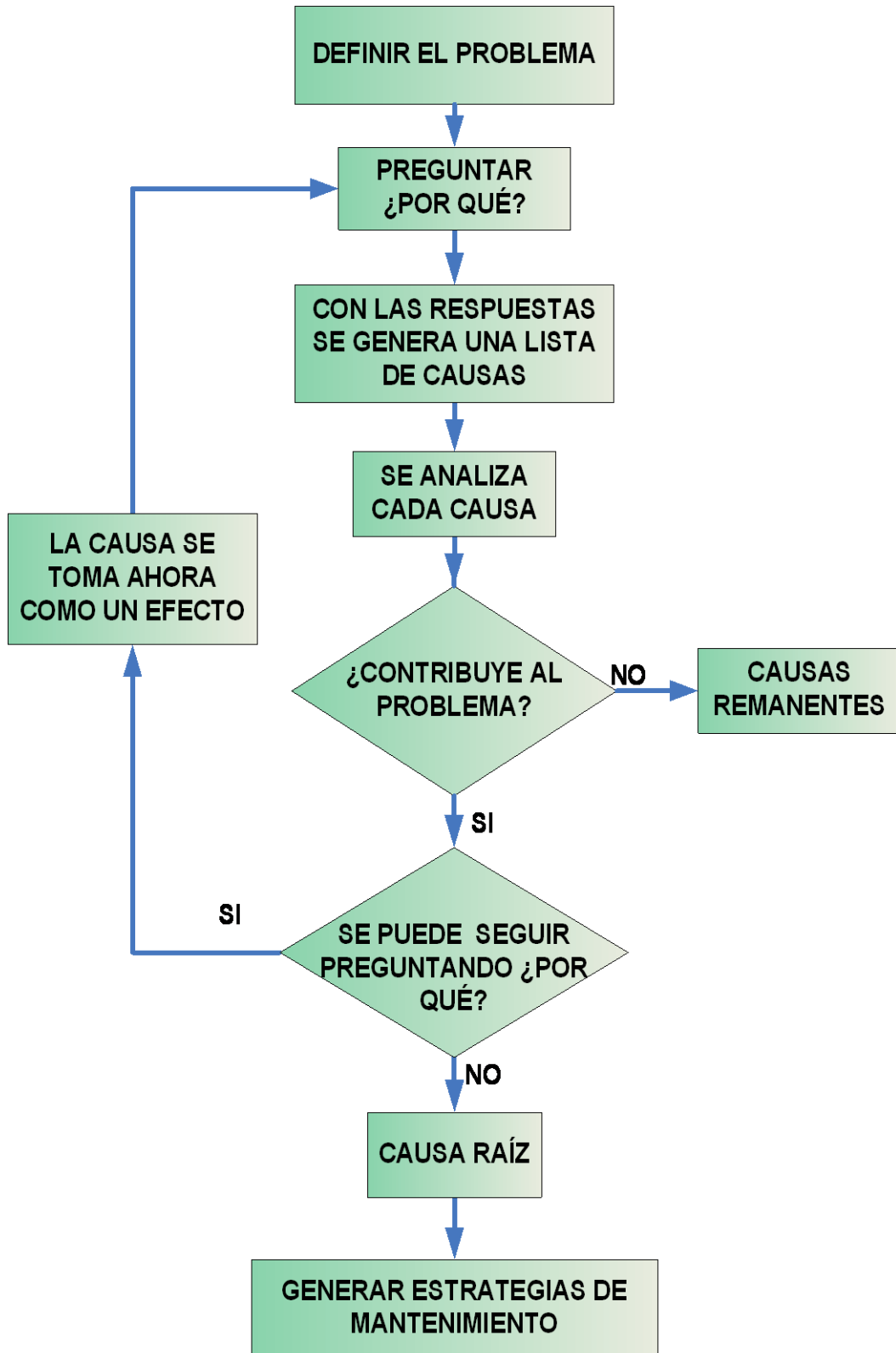
El análisis ¿Por qué? ¿Por qué? se recomienda utilizar:

- Cuando se tienen problemas crónicos, que generan paradas cortas pero recurrentes en una línea de producción.
- Cuando existen muchas causas lo que provoca que el problema se torne confuso.
- En casos con alto grado de deterioro de los equipos (degradación).
- Se puede utilizar como herramienta para encontrar causas en otras metodologías para análisis de fallas como RCA, P-M, Causa – Efecto.

G.4 MODELO A SEGUIR

El modelo se desarrolla desde un enfoque sistemático, donde interesa determinar las causas del fallo relacionándolas con todo el proceso y/o el equipo y sus partes, definimos el problema dependiendo de su interacción con el proceso y/o con la función del equipo en el cual ha ocurrido, encontramos la causa raíz de la falla partiendo de causas generales, hasta llegar a causas más específicas de acuerdo a las funciones afectadas, en la figura 73 se muestra el proceso a seguir para desarrollar esta metodología.

Figura 73. Metodología de desarrollo ¿por qué? – ¿Por qué?



G.4.1 Definir el problema

Definir el problema es el primer paso y quizás el más importante de la metodología ya que su objetivo es entender perfectamente lo que surge en todos los aspectos. Es a partir de esta definición que se va a trabajar.

Este paso es de toma de datos e investigación para entender exactamente qué pasa y cuál es el verdadero problema. Por lo tanto se estudia el problema bajo varios puntos de vista con el fin de destacar todas las relaciones posibles entre factores y orígenes. Para evitar actuar basándose en supuestos infundados, el grupo de analistas debe acudir al sitio donde ocurrió la falla para observar en realidad lo que sucedió o está sucediendo, escuchar a la gente que observó la falla, tome la mayor cantidad de evidencia del lugar de la falla, revisar los flujos del proceso o de trabajo, como se ven afectados estos, consultar manuales, proveedores, datos históricos, datos en campo, fotografías, etc.; esto con el fin de sacar sus propias conclusiones, en este paso el grupo de analistas debe poseer bastante creatividad y ser muy recursivos para poder entender el problema al cual se enfrentan, por lo general el problema es lo que se percibe con los sentidos humanos, pueden ser paros de los equipos, defectos en las piezas, pérdida de una función específica (velocidad, presión, temperatura) etc. realizamos un análisis físico el cual consiste en comprender correctamente y clasificar el problema por tipo o patrón basado en lo que consiste, cómo ocurre, dónde ocurre, qué clase de máquinas están involucradas etc. Como se muestra en la tabla 55, respondemos a una serie de preguntas orientadas a este fin, se puede modificar cualquier pregunta dependiendo del contexto en el que se encuentre y de los objetivos del estudio.

Tabla 55. Preguntas claves para definir el problema

	PREGUNTA	RESPUESTA
¿Qué?	¿Qué está pasando?	
	¿Qué ocurrió?	
	¿Qué se afecta?	
	¿Qué se puede hacer?	
¿Cuándo?	¿Cuándo sucede?	
	¿Cuándo se interviene?	
	¿Cuándo fue la última vez?	
¿Dónde?	¿Dónde ocurre?	
	¿Dónde está el fallo?	
	¿De dónde proviene?	
¿Quién?	¿Quién lo utiliza?	
	¿Quién puede ayudar?	
	¿Quién o quienes se ven afectados?	
¿Cuál?	¿Cuál es el área afectada?	
	¿Cuál es la metodología para solucionar el problema?	
¿Cómo?	¿Cómo ocurre el fallo?	
	¿Cómo funciona el equipo?	

Los puntos cruciales para este proceso son, eliminar las nociones preconcebidas, clasificar y estratificar los problemas en detalle, comparar lo normal, estándares (productos buenos) con lo anormal (Productos defectuosos) para localizar todas las diferencias significativas.

Una vez definido el problema, se pueden decidir cuáles son los objetivos que se quieren conseguir con la aplicación de la metodología, cual es el criterio de éxito y cómo se mide el resultado.

G.4.2 Establecer la relación causa–efecto a través de las preguntas ¿Por qué? ¿Por qué? y validar cada respuesta.

El segundo paso consiste en encontrar las relaciones causa-efecto del problema, esto lo realizamos respondiendo a la pregunta ¿Por qué?, El primer ¿Por qué? lo relacionamos con el problema que queremos resolver, a fin de que las respuestas sean las correctas, cada respuesta obtenida se valida entre el grupo de trabajo estando todos de acuerdo, hay varias formas de hacer esto, por medio de inspección y/o medición, observación directa, pruebas controladas, preguntando a otras personas familiarizadas con el problema o se trata de desaprobar esta causa, es decir, probar que esta no está ocurriendo, si esto no se logra, esta será una causa del problema, si se desaprueba una causa, se busca una nueva causa y se analiza para su validación.

Para cada una de las causas identificadas y validadas anteriormente que contribuyen con el problema, se pregunta otra vez ¿Por qué?, al preguntar el ¿Por qué?, convertimos la causa en efecto y las respuestas son sus causas. Y se sigue así hasta encontrar la causa raíz del problema. Gráficamente se puede desarrollar mediante un árbol lógico como se muestra en la figura 74. Aunque los ¿Por qué? pueden ser conducidos por un camino único, cuando el fenómeno es complejo se debe seleccionar el camino múltiple, o mediante un formato el cual se desarrolla dependiendo del tipo de empresa, de las políticas de ésta, y de la profundidad a la cual se quiera llevar la metodología.

Para el desarrollo de la metodología se ha elaborado un formato ver figura75, en el cual se van realizando las anotaciones a medida que se desarrolla la metodología, el formato constara de tres partes principales

- 1. Encabezado:** Está conformado por 4 renglones, en el primer renglón se anota, la empresa en la cual se está desarrollando el estudio, el encargado y la fecha de realización, en el segundo, el equipo o sistema objeto de estudio, en el tercer renglón la definición del problema, ayudados con las preguntas de la

tabla 55 obtenemos esta definición, en el cuarto renglón va el lugar o sección donde se realiza el análisis.

- 2. Preguntas (¿Por qué?), respuestas (porque) y verificación:** Esta parte está conformada por 10 columnas, se inicia en la columna 1 llamada Ronda N°1, en el renglón 6 se preguntara ¿Por qué ocurre el problema?, en el renglón 7 de la misma columna se responderá a esta pregunta, si se tiene más de una respuesta a esta pregunta, en el renglón 8 se vuelve a anotar la misma pregunta y en el renglón 9 se responde con otra respuesta y así sucesivamente hasta que no tengamos respuestas, en la columna 2 se anota si la verificación de la respuesta fue correcta o no, las que resulten positivas, en la columna 3 Ronda N°2 se pregunta ¿Por qué ocurre esto (respuestas obtenidas de la Ronda N°1) y se responde de igual forma que para la Ronda N°1, se verifican estas respuestas columna 4 y se continua así hasta llegar a la causa raíz

- 3. Recomendaciones:** Para la causa raíz encontrada se da una recomendación para su solución esto se hace en la columna 11, en el renglón enfrente a la causa raíz.

G.4.3 Generar estrategias de mantenimiento

Para todas las causas y para la causa raíz encontradas en el análisis ¿Porqué?- ¿Porqué?, se propone una contramedida para remediar la causa, cada una de estas acciones debe tener su protocolo para que la falla no vuelva ocurrir, se estandariza toda la documentación existente o crear una nueva si es necesario, y actualizar los estándares ya existentes con las contramedidas utilizadas para prevenir la falla.

En la mayoría de las aplicaciones se encuentra con acciones correctivas, se recomienda realizar estas tareas y documentar el proceso para realizar la respectiva estrategia de mantenimiento.

Figura 74. Desarrollo por medio de Árbol Lógico

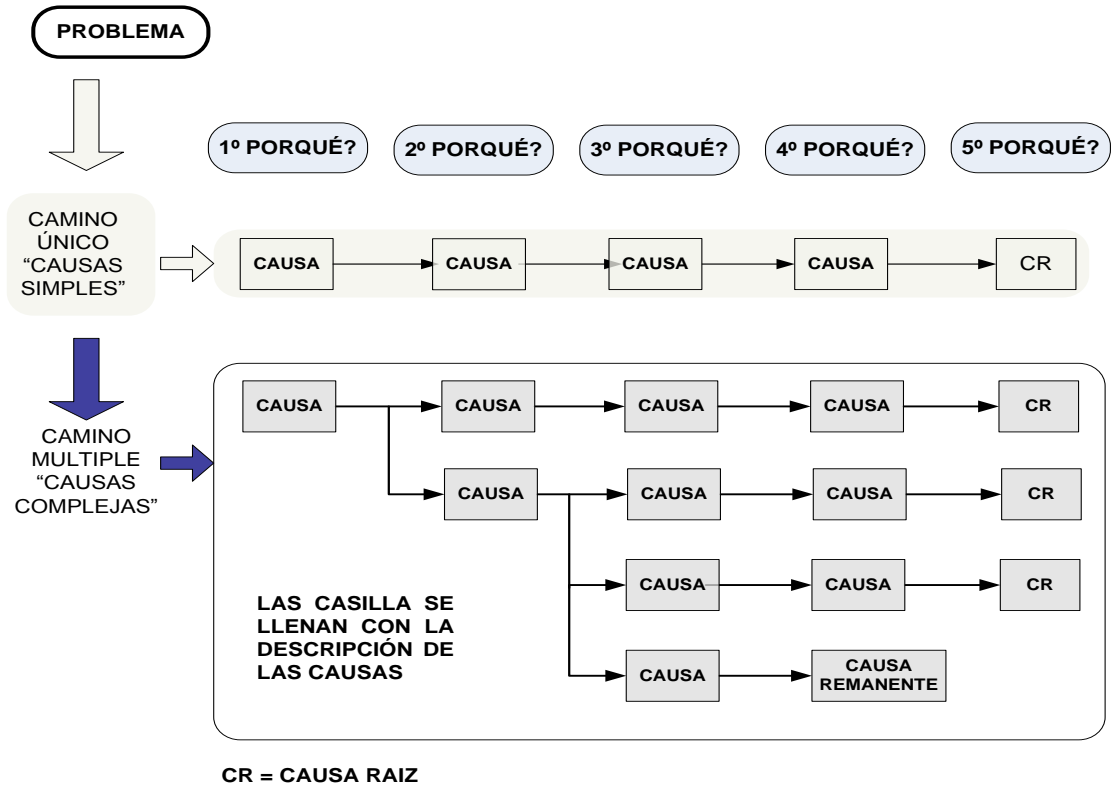


Figura 75. Formato para la metodología ¿Por qué? ¿Por qué?

1. ENCABEZADO	1	EMPRESA: _____		RESPONSABLE: _____		FECHA DEL ANÁLISIS: _____						
	2	NOMBRE DEL EQUIPO O SISTEMA: _____										
	3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA: _____										
	4	SITIO DEL PROBLEMA: _____										
2. PREGUNTAS (¿Por qué?), RESPUESTAS (Porque) Y VERIFICACIÓN	5	RONDA Nº 1	SI/NO	RONDA Nº 2	SI/NO	RONDA Nº 3	SI/NO	RONDA Nº 4	SI/NO	RONDA Nº 5	SI/NO	3. ANOTACIÓN DE LAS RECOMENDACIONES
	6											
	7											
	8											
	9											
	10											
	11											
	12											
	13											
	14											
	15											
	16											
	17											
	18											
	19											
	20											
	21											
	22											
	23											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

G.5 Aplicación de la metodología.

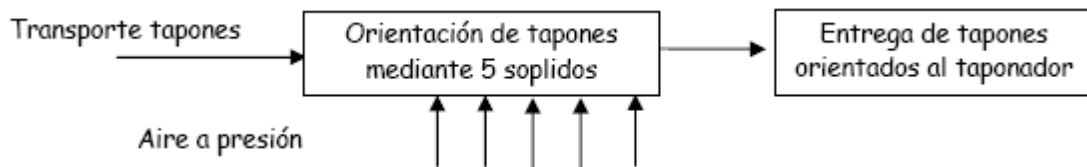
Mejora de la productividad de una línea de envasado en la empresa envasados químicos del Bages SL, Barcelona España.

Definición del problema:

Los tapones quedan obstruyendo los alveolos del orientador de tapones, produciendo paro del equipo para retirar los tapones. Esta parada implica una parada de toda la línea de envasado produciendo pérdidas significativas para la empresa.

El diagrama del proceso se muestra en la figura 76

Figura 76. Proceso de orientación de tapones



1. Objetivo

Se pretende encontrar la causa básica de esta pérdida crónica y reducirla lo máximo posible.

2. Descripción del proceso:

El orientador está formado por un disco rotativo de teflón con alveolos y está alimentado por el elevador de tapones. Los tapones se posicionan en los alveolos en una orientación aleatoria Figura 77, y el orientador selecciona los que tengan la orientación adecuada, mediante 5 soplos de aire Figura 78.

Figura 77. Disco alveolar



Figura 78. Soplos del orientador



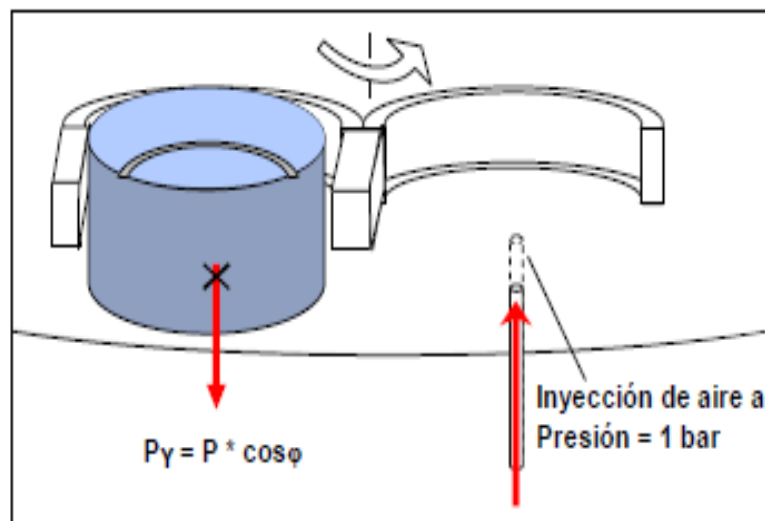
El ciclo de funcionamiento de cada vuelta del orientador es el siguiente:

- i. Soplos laterales 1B/1A: seleccionan los tapones que se han situado ya en los huecos del disco, los cuales evitan el soplido, y el resto recibirán el soplido lateral, que los aleja a la parte más baja del orientador, iniciando de nuevo la rotación.
- ii. Sopro inferior 2A: ya en los huecos, selecciona los que tengan la orientación adecuada; en cambio, un soplido en la parte inferior del tapón hace saltar a los que están al revés.
- iii. Sopro lateral 3B: sirve para alejar los tapones que saltan debido al sopro 2A; por eso está alineado verticalmente con éste.
- iv. Sopro lateral 3A: Asegura que no quede ningún tapón mal ubicado a la salida.

3. Análisis físico del problema

Todos los soplos nombrados son importantes en el ciclo del orientador, sin embargo, el más crítico para evitar que lleguen tapones al revés es la inyección de aire 2A. En la figura 79 se presenta un dibujo esquemático del mismo, donde se puede observar que la inyección de aire está ubicada de tal forma que impacta en el hueco dejado por los alveolos o en el tapón en caso de que haya un tapón posicionado en él.

Figura 79. Soplo 2A

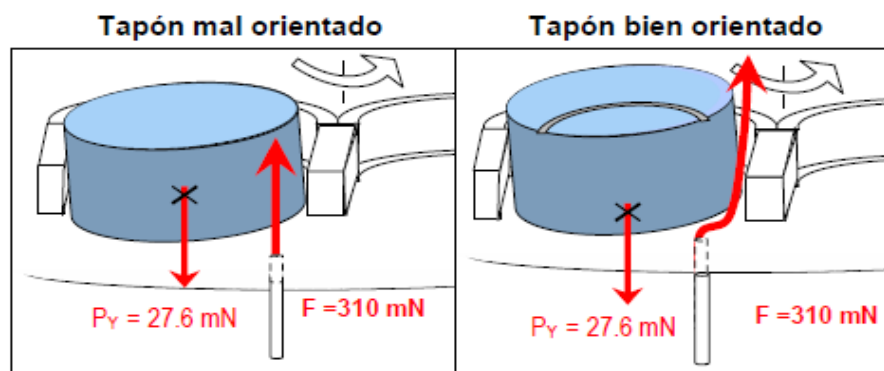


Cuando llegan a este punto los tapones pueden tener únicamente dos posiciones mostradas en la Figura 80 (suponiendo que el resto de soplos han funcionado correctamente). Como se puede observar, si el tapón está mal orientado el soplo impacta en el interior del tapón, haciéndolo saltar, mientras que si está bien orientado el aire a presión levanta ligeramente el tapón hasta que se escapa por el lateral del tapón (además, este hecho está favorecido porque el tapón tiene una forma ligeramente cónica). Se debe tener en cuenta los siguientes datos tabla 56:

Tabla 56. Datos técnicos del taponador rotativo

Masa del tapón	3g
Inclinación del tapón	$\alpha = 20^\circ$
Presión de aire 2ª	1 bar
Diámetro del inyector	2 mm
Velocidad de rotación del disco alveolar	4.5 rpm
Presión 1 (soplos 1A y 1B)	2 bar
Presión 2 (soplo 2A)	1 bar
Presión 3 (soplos 3A y 3B)	2bar

Figura 80. Funcionamiento del soplo



Establecer la relación causa–efecto a través de las preguntas ¿por qué? ¿por qué? y validar cada respuesta:

El proceso de encontrar las causas respondiendo a la pregunta ¿por qué? Se muestra en la tabla 58, en la verificación de las causas se encontró tubos neumáticos poroseados, tapones atrancados en la estructura, suciedad acumulada entre el disco alveolar y el contenedor, y también mucha suciedad alrededor de todos los soplos debidos a la humedad del aire inyectado. Las causas encontradas con su respectiva acción de mejora o contramedida se muestran en la tabla 57

Tabla 57. Resultados de la aplicación de la metodología

CAUSA	PLAN DE ACCIÓN /CONTRAMEDIDAS
1. Tubo 2A poroseado	Se cambia el tubo 2A y se revisan los tubos semanalmente
2. El deshumidificador no le quita la humedad necesaria al aire inyectado	Cambiar los filtros del deshumidificador y hacer seguimientos según su ciclo de vida
3. Distancia vertical entre el alveolo y el contenedor	Fabricación de una pieza que elimine esta distancia
4. Alveolos irregulares	Analizar irregularidad y disminuir la variabilidad entre los alveolos
5. Mala ubicación del Soplo 3B	Se cambia de ubicación el Soplo 3B
6. El tapón llega inclinado	Se busca el tubo roto y se revisan los tubos semanalmente

Tabla 58. Formato para la metodología ¿Por qué? ¿Por qué?

EMPRESA:		RESPONSABLE:		FECHA DEL ANÁLISIS:							
NOMBRE DEL EQUIPO O SISTEMA: Taponador Rotativo											
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA: Se presenta paro del equipo y paro de toda la línea de envasado											
SITIO DEL PROBLEMA: Línea de envase											
RONDA Nº 1	SI/NO	RONDA Nº 2	SI/NO	RONDA Nº 3	SI/NO	RONDA Nº 4	SI/NO	RONDA Nº 5	SI/NO	RECOMENDACIONES	
¿Por qué hay paradas en el taponador rotativo?	SI										
Porque la fuerza de impacto es baja											
		¿Por qué la fuerza de impacto es baja?									
		Porque la presión de red es muy baja	NO								
		¿Por qué la fuerza de impacto es baja?									
		Porque hay fugas de aire	SI	¿Por qué hay fugas de aire?							
				Porque el tubo 2A esta poroseado	SI	¿Por qué el tubo 2A esta poroseado?					
						Porque la humedad es alta	SI	¿Por qué la humedad es alta?			
								Porque el deshumidificador no le quita la humedad necesaria al aire inyectado	SI	Cambiar los filtros del deshumidificador y hacer seguimiento según su ciclo de vida	
				¿Por qué hay fugas de aire?							
				Porque el regulador 2 está en mal estado	NO						
		¿Por qué la fuerza de impacto es baja?									
		Porque hay una obstrucción en la inyección de aire	SI	¿Por qué hay una obstrucción en la inyección de aire?							
				Porque hay suciedad acumulada	SI	¿Por qué hay suciedad acumulada?					
						Porque hay restos de tapones	NO				
						¿Por qué hay suciedad acumulada?					
						Porque hay humedad en los alrededores de los soplos	SI	¿Por qué hay humedad en los alrededores de los soplos?			
								Porque el deshumidificador no le quita la humedad necesaria al aire inyectado	SI	Cambiar los filtros del deshumidificador y hacer seguimiento según su ciclo de vida	

¿Por qué hay paradas en el taponador rotativo?									
Porque existe una fuerza de rozamiento u obstrucción	SI	¿Por qué existe una fuerza de rozamiento u obstrucción?							
		Porque los tapones están fuera de especificaciones	NO						
		¿Por qué existe una fuerza de rozamiento u obstrucción?							
		Porque el tapón se atranca en el alveolo	SI	¿Por qué el tapón se atranca en el alveolo?					
				Porque la distancia entre alveolo y contenedor no es la indicada	SI	¿Por qué la distancia entre alveolo y contenedor no es la indicada?			
						Porque se diseño mal	SI		Fabricación de una pieza que elimine ésta distancia
				¿Por qué el tapón se atranca en el alveolo?					
				Porque hay alveolos irregulares	SI	¿Por qué hay alveolos irregulares?			
						Porque hay defectos de fabricación	SI		Analizar irregularidades y disminuir la variabilidad entre los alveolos
¿Por qué hay paradas en el taponador rotativo?									
Porque los tapones llegan inclinados	SI	¿Por qué los tapones llegan inclinados?							
		Porque los soplos no funcionan correctamente	SI	¿Por qué los soplos no funcionan correctamente?					
				Porque hay tubos agujereados	SI	¿Por qué hay tubos agujereados?			
						Porque la humedad es alta	SI	¿Por qué la humedad es alta?	
								Porque el deshumidificador no le quita la humedad necesaria al aire inyectado	SI Cambiar los filtros del deshumidificador y hacer seguimiento según su ciclo de vida
¿Por qué hay paradas en el taponador rotativo?									
Porque la Fsoplo 3B no deja salir el tapón del alveolo	si	¿Por qué la Fsoplo 3B no deja salir el tapón del alveolo?							
		Porque el soplo 3B está mal ubicado	SI	¿Por qué el soplo 3B está mal ubicado?					
				Porque el diseño no es el indicado	SI				Se cambia de ubicación el soplo 3B

ANEXO H

H. ANÁLISIS CAUSA-EFECTO

El análisis causa-efecto es un instrumento avanzado de mantenimiento para el análisis de falla, que organiza y representa en forma gráfica, clara y concisa las diferentes teorías propuestas sobre las causas de una falla.

Gráficamente está constituido por una línea central horizontal que es conocida como “línea principal o espina central”. Posee varias flechas inclinadas que se extienden hasta el eje central, al cual llegan desde su parte inferior y superior. Cada una de ellas representa un grupo de causas que inciden en la existencia de la falla. Cada una de estas flechas a su vez son tocadas por flechas de menor tamaño que representan las “causas secundarias” de cada “causa” o “grupo de causas de la falla”.

El diagrama causa-efecto presenta la ventaja de permitir visualizar de una manera muy rápida y clara, la relación existente entre cada una de las causas con las demás razones que inciden en el origen del problema. En algunas oportunidades son causas independientes y en otras, existe una íntima relación entre ellas, las que pueden estar actuando en cadena.

H.1 PRINCIPIO DE CAUSALIDAD

El principio de determinismo causal enunciado por Aristóteles dice: “Se entiende el conocimiento de una cosa por sus causas, las cuales suelen ser las cuatro tradicionales: eficiente, final, formal y material.”. De esta manera se desata una discusión científica filosófica entre la corriente Idealista y los Escépticos acerca de la fuente del conocimiento, en el siglo XVI Francisco Sánchez en su obra *Quod nihil scitur* (Que nada se sabe), ofrece una crítica a este principio; “Toda causa que explique un efecto, ya sea eficiente o final, requiere, a su vez, de ser ella misma explicada por otra causa, sin que quepa encontrar una conclusión a esta

secuencia de relaciones causales”. Finalmente en el siglo XVIII David Hume en *Treatise of human nature*. (Tratado de la naturaleza humana) ofrece un juicio racional acerca del origen del principio de causalidad y las conexiones que deben cumplirse, como son:

- Contigüidad espacio-temporal entre la causa y el efecto
- Prioridad temporal: la causa es siempre anterior al efecto
- Conjunción constante entre la causa y el efecto

“Hemos dicho que todos los argumentos acerca de la existencia se fundan en la relación causa-efecto, que nuestros conocimientos de esa relación se derivan totalmente de la experiencia y que todas nuestras conclusiones experimentales se dan a partir del supuesto de que el futuro será como ha sido el pasado”⁵⁵.

En fin el principio de causalidad establece que todo efecto visible se puede explicar por sus causas; y a su vez, éstas requieren ser explicadas por sus causas. Aunque por lo general, se percibe primero el efecto, en realidad la causa es siempre anterior al efecto.

H.2 RESEÑA HISTÓRICA

Ideado en 1952 por el japonés Dr. Kaoru Ishikawa para facilitar el proceso de raciocinio en el cual se mostrara de forma clara la relación entre las características de calidad y los factores causales que intervienen en el proceso, de tal manera que se tuviera un control total sobre éste, y se pudieran implementar mejoras, fijar mejores metas y lograr efectos. (Ishikawa)

Ishikawa fue el precursor de los conceptos sobre la calidad total en el Japón. Posteriormente tuvo una gran influencia en el resto del mundo, ya que fue el primero en resaltar las diferencias culturales entre las naciones como factor importante para el logro del éxito en calidad. Fue fundador de la Unión de Científicos e Ingenieros Japoneses (Union of Japanese Scientists and Engineers,

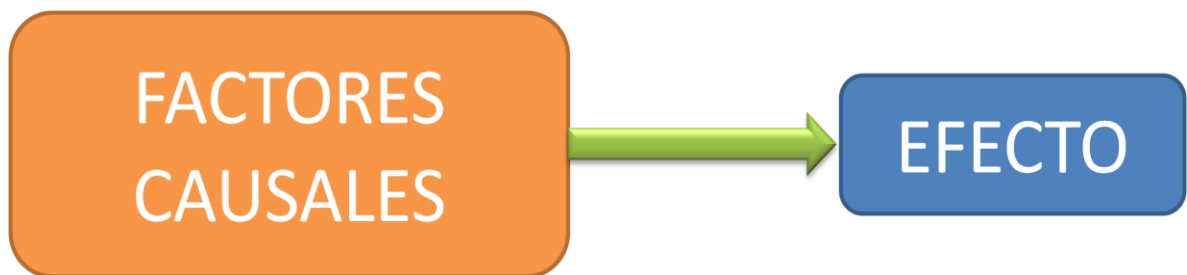
⁵⁵ HUME, David. *Treatise of human nature*.1748

UJSE), entidad que se preocupaba de promover la calidad dentro de Japón durante la época de la post-guerra.

H.3 PARTES CONSTITUTIVAS

Como herramienta de análisis de falla, el diagrama causa-efecto está constituido por el problema o falla a analizar (efecto) y los factores causales de la falla (causas). En la figura 81. Se muestra de manera gráfica este concepto.

Figura 81. Partes constitutivas del diagrama



H.3.1 Efecto

El efecto representa el problema o falla principal que se desea analizar, el cual se coloca en el extremo derecho del diagrama, enmarcado en un recuadro para facilitar su visualización. Éste debe estar claramente definido e identificado por el grupo de trabajo.

El problema principal puede ser la falla total de un equipo o sistema, o la magnitud de un estándar de funcionamiento asociada a un estado de falla parcial de éste. La mejor manera de identificar y definir el problema es a través de la participación de todos los miembros del equipo de trabajo, para lo cual es indispensable que cada uno conozca a fondo la estructura y el funcionamiento del equipo o sistema.

H.3.2 Factores Causales

Los factores causales representan las diferentes teorías propuestas como causas potenciales y/o reales de la falla funcional. Aunque los factores causales pueden ser muchos, los verdaderamente importantes, los que tienen gran impacto sobre el efecto, no son tantos. Todo lo que se requiere hacer y quizás lo más importante, es normalizar tres a cinco de los factores causales más importantes. Para lo cual hay que consultar con las personas que están íntimamente relacionadas con el diseño, montaje, operación, configuración y mantenimiento del equipo, por ejemplo: operarios, inspectores, mantenedores, ingenieros, proveedores, etc. Estos factores causales más importantes son los que se denominan causas principales o grupos de causas, y en el gráfico están representados por las líneas inclinadas que apuntan hacia el eje principal desde arriba y desde abajo.

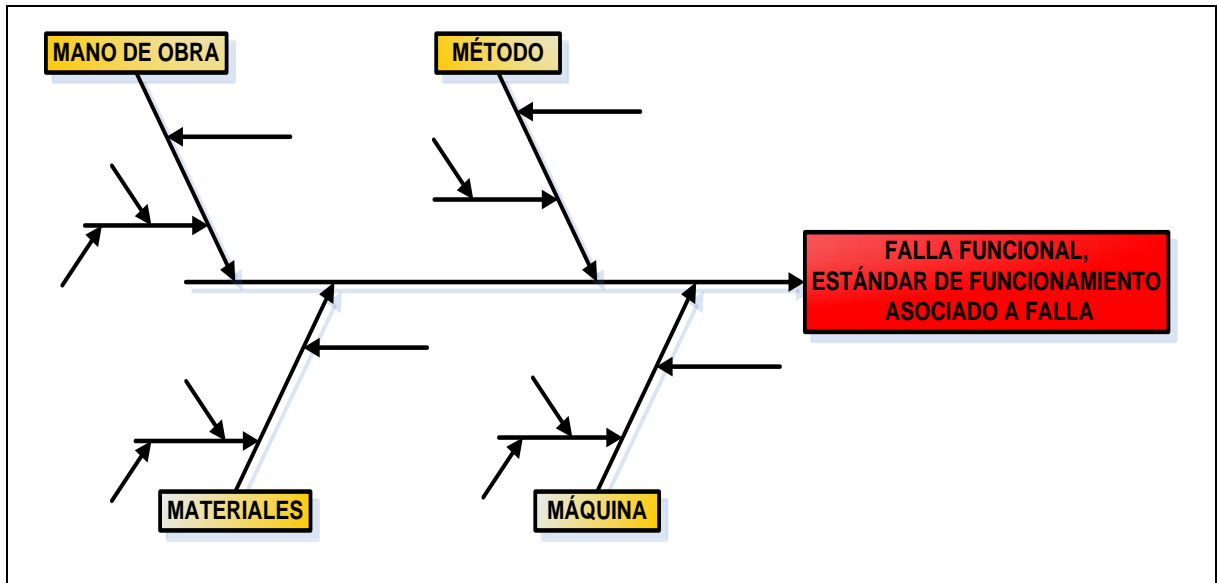
Los factores causales a saber asociados a una falla pueden estar definidos por las 4M's de manufactura:

- Método de trabajo
- Mano de obra
- Materiales
- Máquinas y equipo

La figura 82. Muestra el esquema de los factores causales más importantes de una falla definidos por las 4M's. Pero este no es el caso general, ya que depende en gran medida del enfoque que se le dé al análisis; es decir de la definición del efecto y del alcance de análisis, ya que éste puede ser la falla total de un equipo, un modo de falla específico, un evento fortuito o una meta propuesta por mantenimiento y los factores causales se pueden enfocar hacia los componentes del equipo, los mecanismos de falla que pueden producir un modo de falla particular, una serie de eventos causales, los pasos o el procedimiento para alcanzar la meta o en fin una combinación dos o tres de los casos anteriores.

Cada uno de estos grupos de causas a su vez se convierten en efectos, para los cuales hay que definir sus causas, gráficamente éstas se representan por flechas que apunta hacia las causas principales y se les denomina causas secundarias. El proceso continua hasta quedar cubiertas la totalidad de las causas reales y/o potenciales asociadas a la falla funcional.

Figura 82. Factores causales principales de una falla definidos por las 4M's



H.4 CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA CAUSA-EFECTO

Para la construcción del diagrama Causa-Efecto se debe seguir una metodología disciplinada que garantice la correcta aplicación y el alcance de los objetivos. Los pasos a seguir son:

- Definir el problema
- Realizar sesión de tormenta de ideas
- Clasificar las causas en categorías
- Elaborar el diagrama
- Determinar el nivel de comprensión del diagrama
- Determinar el grado de importancia de cada causa

- Desarrollar el plan de acciones

A continuación se ve cada paso en detalle

H.4.1 Definir el problema

Consiste en identificar claramente el efecto, la falla funcional o estándar de funcionamiento asociado a una falla funcional. Debe hacerse de manera específica y concreta para que el análisis de las causas se oriente correctamente y se eviten confusiones.

H.4.2 Realizar sesión de “tormenta de ideas”

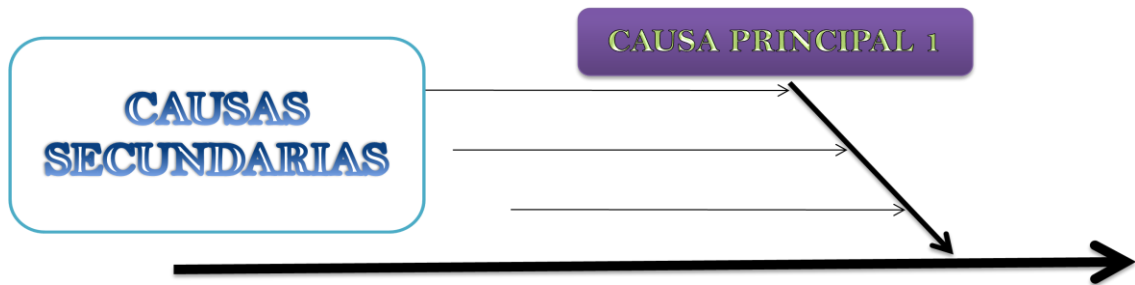
Se debe llevar a cabo una sesión de tormenta de ideas entre el grupo de trabajo con el fin identificar y enumerar las causas reales y potenciales de la falla. Una tormenta de ideas es una metodología para despertar iniciativa y originalidad en un grupo de trabajo generando una exhaustiva lista de ideas en un clima de camaradería y apoyo. La metodología a seguir es la siguiente:

- El grupo se reúne y las personas expresan por turnos rigurosos, dando una idea cada vez. La función del líder de grupo o moderador es promover la libre discusión y no de dirigir la sesión.
- Se debe evitar hacer evaluaciones de lo expuesto por los miembros del grupo y mantener un tono neutro: “ni bueno”, “ni malo”.
- Es necesario elaborar una lista de los puntos expuestos por cada miembro en un lugar visible.
- Se debe dar varias oportunidades a las personas para exponer sus ideas, hasta agotarlas.
- En el grupo de trabajo se discuten y se amplían las ideas sugeridas.
- Se utilizan mecanismo del consenso para tomar decisiones, por ejemplo: ¿Cuál problemas es el mayor?, ¿Cuál es el camino a seguir?, etc.

H.4.3 Clasificar las causas en categorías

Se deben clasificar las causas en grupos de causas o causas principales y causas secundarias y a su vez determinar estas causas secundarias a qué grupo principal pertenecen. En la figura 83. Se observa como a cada causa principal se convierte a su vez en efecto, y las causas secundarias en sus causas, y así sucesivamente hasta el nivel de detalle que el equipo de trabajo considere pertinente.

Figura 83. Clasificación de las causas por categorías

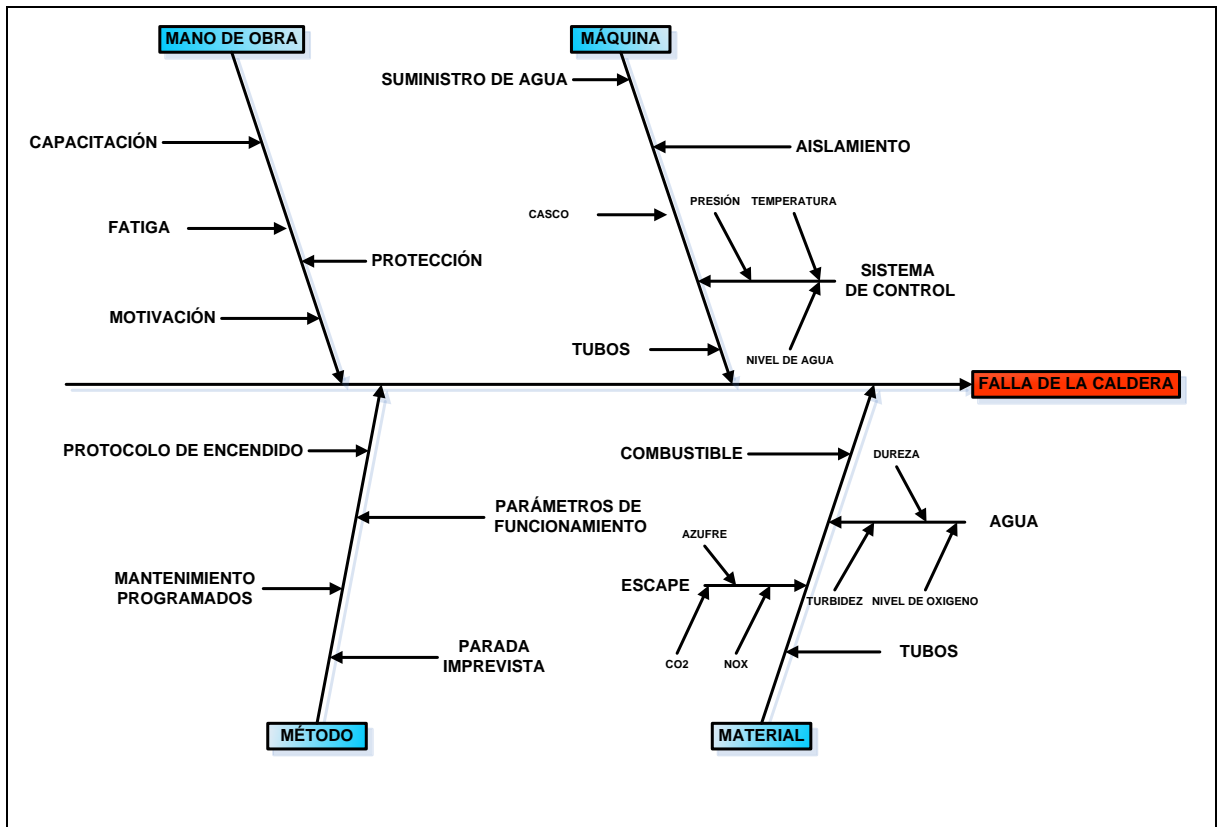


H.4.4 Elaborar el diagrama Causa-Efecto

Para ello se debe:

- Escribir el efecto a la derecha, y trazar una flecha de izquierda a derecha.
- Ubicar las causas en categorías o grupos, trazando flechas secundarias en dirección a la principal.
- Incorporar a cada una de estas flechas secundarias, los factores detallados que pueden ser considerados como actuantes en cada categoría. Estas formarán las ramificaciones secundarias. En la figura 84 se puede ver un diagrama Causa-Efecto para la falla de una caldera

Figura 84. Diagrama Causa-Efecto para la falla de una caldera



H.4.5 Determinación del nivel de compresión del diagrama

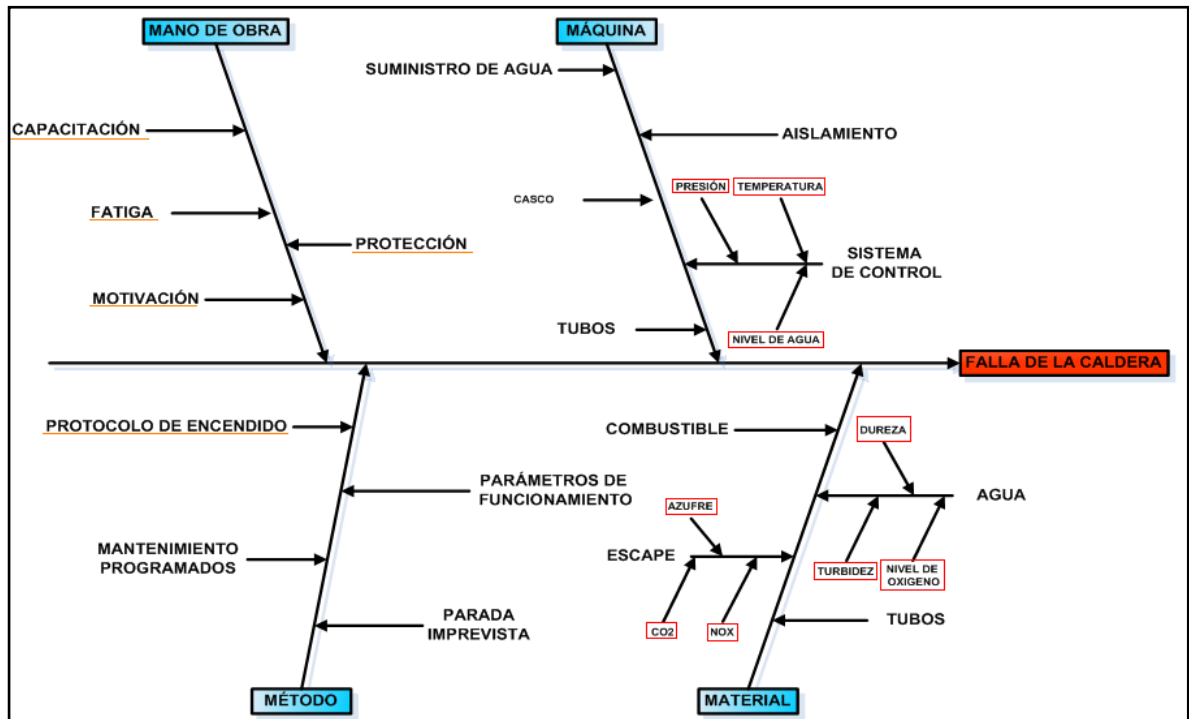
Para determinar el nivel de compresión del diagrama se debe hacer una discriminación de las causa para ello:

- Se halla dentro de un cuadro aquella causa que pueda ser probada cuantitativamente. Por Ejemplo: Problemas en máquina, equipos, etc.
- Se subraya la causa que no pueda ser probada cuantitativamente.
- No se marca la causa cuando no pueda probarse su relación con el efecto.

A mayor número de causas encuadradas y / o subrayadas mayor es el nivel de compresión del problema. En la figura 85 se muestra el diagrama Causa-Efecto

para la falla de una caldera con algunas de sus causas subrayadas y algunas encuadradas.

Figura 85. Determinación del nivel de comprensión del diagrama Causa-Efecto



H.4.6 Determinación del grado de importancia de cada causa

- Cada miembro del grupo enumera las causas más importantes.
- Se jerarquizan las cinco (5) causas de mayor importancia.
 - La causa más importante (5 ptos.).
 - La próxima en importancia (4 ptos.) y así sucesivamente.
 - A las causas con mayor número de puntos se les asigna prioridad para el plan de acción.

En la tabla 59. Se muestra un ejemplo hipotético de cómo sería la determinación del grado de importancia de las causas

Tabla 59 Determinación del grado de importancia de las causas

CAUSA	PUNTAJE
CONTROL DE PRESIÓN	5 Pts.
CONTROL DE NIVEL DE AGUA	4 Pts.
CONTROL DE NIVEL DE TEMPERATURA	3 Pts.
NIVEL DE AZUFRE EN ESCAPE	2 Pts.
AISLAMIENTO	1Pt.

H.4.7 Desarrollo del plan de acción

- Jerarquizar causas.
- Asignar responsabilidades individuales para eliminar cada causa
- Indicar el tiempo proyectado para atacar cada causa, desde el inicio hasta el final.
- Recolectar datos que sirvan para apoyar el análisis de dicha causa y su eliminación.
- Elaborar otro diagrama de causa-efecto y proceder de la misma manera.

H.5 ANÁLISIS DEL DIAGRAMA CAUSA-EFECTO

El diagrama Causa-Efecto es un vehículo para ordenar, de forma muy concentrada, todas las causas que supuestamente pueden contribuir a un determinado efecto.

Permite, por tanto, lograr un conocimiento común de un problema complejo, sin ser nunca sustitutivo de los datos. Es importante ser conscientes de que los diagramas de causa-efecto presentan y organizan teorías. Sólo cuando estas

teorías son contrastadas con datos podemos probar las causas de los fenómenos observables.

Errores comunes son construir el diagrama antes de analizar globalmente los síntomas, limitar las teorías propuestas enmascarando involuntariamente la causa raíz, o cometer errores tanto en la relación causal como en el orden de las teorías, suponiendo un gasto de tiempo importante.

H.6 BENEFICIOS

- Elaborarlo es una labor educativa en sí misma, favorece el intercambio de técnicas y experiencia.
- Ayuda a determinar el tipo de datos a obtener con el fin de confirmar si los factores seleccionados fueron realmente las causas del problema.
- Para prevenir problemas, cuando se detectan causas potenciales de un problema, éstas pueden prevenirse si se adoptan controles apropiados.
- Muestra la habilidad profesional que posee el personal encargado del proceso; entre más alto sea el nivel, mejor será el diagrama resultante.

ANEXO I

I. ORDINOGRAMA

Es una representación gráfica de la secuencia lógica de pasos de las operaciones que se realizan para llevar a cabo un análisis de falla y obtener una solución. Cumple una visión informativa ya que supone una visión rápida de la estructura organizativa del proceso de análisis de falla.

En el momento que se desarrolla el ordinograma es importante considerar el objetivo, tipo y cantidad de información requerida por el usuario del mismo.

Se abordará el tema de los ordinogramas mostrándolos como metodología para la solución de fallas en sistemas y equipos.

I.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES:

- Proporcionan información clara, ordenada y concisa sobre los pasos a seguir para el análisis y corrección de fallas en sistemas y equipos.
- Permiten la puesta en común de conocimientos individuales sobre el proceso de análisis de fallas de un sistema o equipo.
- Utilizan símbolos⁵⁶ normalizados los cuales están unidos por flechas denominadas líneas de flujo que indican la secuencia en la que se deben ejecutar.

I.2 CUÁNDO SE UTILIZA

- **Como procedimiento de caza de fallas para detectar causas de fallas en sistemas y equipos:**


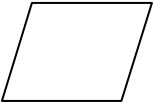

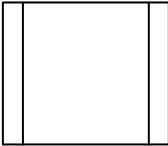
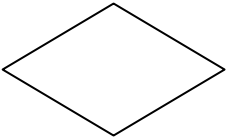
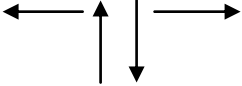
⁵⁶ Los símbolos indican los pasos que se deben realizar para llevar a cabo el análisis de falla.

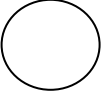

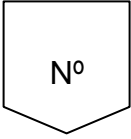
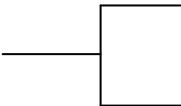

- Hidráulicos
 - Neumáticos
 - Eléctricos
 - Electrónicos
 - Electro neumáticos
 - Electrohidráulicos
- **Para generar teorías sobre las causas principales de falla en sistemas y equipos.**
- **En la aplicación de soluciones para:**
- Explicar el proceso de análisis caza falla y la solución propuesta a la causa de falla detectada.
 - Guiar de una forma rápida y sencilla a diferentes personas con conocimientos en los equipos y sistemas a los cuales se les hizo el ordinograma para que detecten causas de falla.

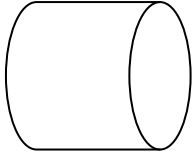
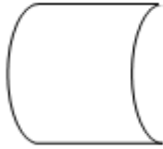

I.3 SÍMBOLOS BÁSICOS DE LOS ORDINOGRAMAS

En la tabla 6o. se ilustran algunos de los símbolos utilizados en los ordinogramas para análisis de fallas según la norma ANSI (American National Standard Instituted). Este formato de símbolos está disponible en paquetes informáticos como Word, Power Point, Visio.

Tabla 60. Algunos Símbolos Utilizados Norma ANSI Y32.10

<i>Símbolos de conexión</i>		
SÍMBOLO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
	TERMINADOR. (INICIO/FIN)	Marca el inicio, final o una parada necesaria en la ejecución de un ordinograma.
	DATOS	Muestra cualquier tipo de operación durante el proceso de la elaboración de datos depositados en la memoria.
	PROCESO	Muestra cualquier tipo de operación durante el proceso de elaboración de los datos depositados en la memoria.
	PROCESO PREDEFINIDO	Subprograma o subrutina, utilizado para hacer una llamada a una subrutina o un proceso
<i>Símbolos de decisión</i>		
	DECISIÓN	Indican el camino que pueden seguir en varias posibilidades según el resultado de la operación lógica o comparación establecida
<i>Líneas de flujo</i>		
	FLECHAS	Indica el sentido de ejecución de las operaciones

<i>Símbolos de conexión</i>		
SÍMBOLO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
	CONECTOR	Sirve para enlazar dos partes cualesquiera de un ordinograma a través de un conector en la salida y otro conector en la entrada.
	CONECTOR MISMA PÁGINA	Utilizado para enlazar dos partes cualquiera del diseño a través de un conector de salida y de entrada.
	CONECTOR DISTINTA PÁGINA	Este símbolo se utiliza con la finalidad de evitar las hojas de gran tamaño, el cual muestra al finalizar la hoja, hacia dónde va y al principio de la siguiente hoja de dónde viene; dentro del símbolo se anotara la letra "A" para el primer conector y se continuará con la secuencia de las letras del alfabeto.
<i>Símbolo de información</i>		
	COMENTARIO (ANOTACIÓN)	No forma parte del ordinograma de flujo, es un elemento que se adiciona a una operación o actividad para dar una explicación.
<i>Símbolos de soporte de información</i>		
	DOCUMENTO	Representa cualquier tipo de documento que entre, se utilice, se genere o salga del procedimiento.

SÍMBOLO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
	ARCHIVO DE DATOS	Representa la información es extraída o enviada a una base de datos.
	DATOS ALMACENADOS	Indica si la información generada se respalda o almacena en una P.C. o servidor
	ENTRADA MANUAL	Representa el uso de un dispositivo en línea para promocionar información a una computadora electrónica u obtenerla de ella.

Un elemento clave del ordinograma es el paso de decisión como se puede ver en la figura 86. Esto a menudo es una decisión simple de sí o no, pero puede ser una operación compleja en el cual muchos caminos son posibles.

Figura 86. Símbolo de decisión.



En un proceso de análisis de falla es necesario el acceso a variedad de bases de datos o fuentes de información. Los archivos de salida pueden ser enviados a discos o a un almacenamiento magnético.

El círculo pequeño que representa un conector como se puede ver en la figura 87, indica que el flujo continúa en alguna otra parte en el diagrama o en una grafica siguiente. El símbolo Anotación como se puede ver en la tabla 60, se destina a

notas y comentarios para proporcionar información sobre los pasos del ordinograma.

Figura 87. Símbolo conector



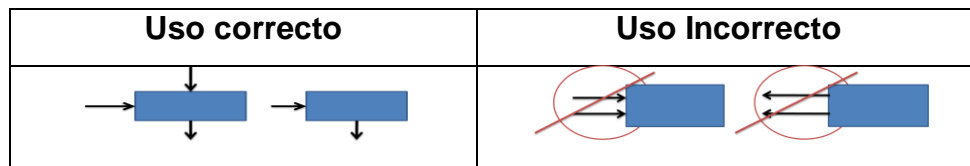
I.4 RECOMENDACIONES PARA EL USO Y APLICACIÓN DE LOS SÍMBOLO

A continuación se citan las recomendaciones como se puede ver en la figura 88, uso y aplicación de los símbolos que se utilizan para la creación de ordinogramas.

a) En cuanto al dibujo:

- No utilizar en un mismo lado del símbolo varias líneas de entrada y salida.

Figura 88. Recomendación para el uso de líneas de flujo



- Por claridad no debe haber más de una línea de unión entre dos símbolos.
- Las líneas de unión se deben representar con líneas rectas.
- Es conveniente que los símbolos tengan un tamaño uniforme.

b) En cuanto a su contenido y uso:

- La redacción del contenido del símbolo de operación debe ser realizada con frases breves, claras y precisas.
- El símbolo de conector puede ser alfabético o numérico, pero debe coincidir en los conectores de entrada y salida.

- Cuando existen una gran cantidad de conectores, es conveniente adicionar un color al símbolo.

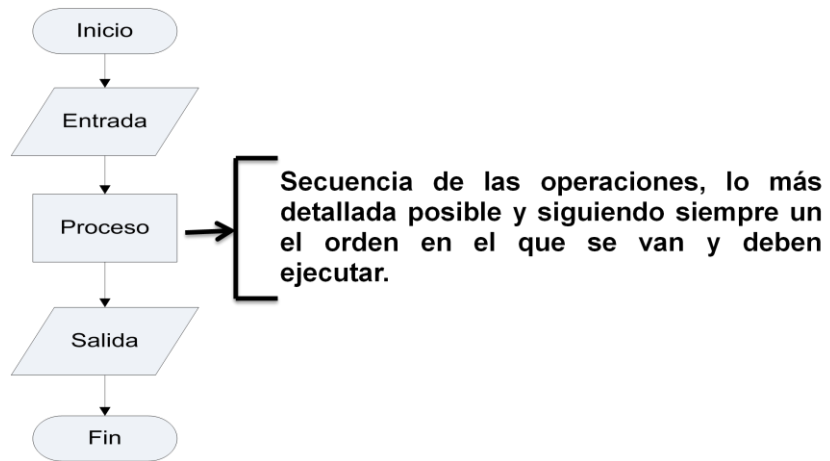
I.5 NORMAS BÁSICAS PARA LA CREACIÓN DE UN ORDINOGRAMA

1. Debe existir un principio y un final
2. En los ordinogramas (la secuencia detallada de la operación u operaciones, pasos del análisis caza falla) deben escribirse de arriba hacia abajo, y/o de izquierda a derecha.
3. Los símbolos se unen con líneas, las cuales tienen en la punta una flecha que indica la dirección en que fluye el análisis caza falla, se debe utilizar solamente líneas de flujo horizontales o verticales (nunca diagonales).
4. Se debe evitar el cruce de líneas, por ejemplo si se quisiera separar el flujo del ordinograma a un sitio distinto, se puede hacer utilizando los conectores. Se debe tener en cuenta que solo se van a utilizar conectores cuando sea estrictamente necesario.
5. No deben quedar líneas de flujo sin conectar
6. Todos los símbolos pueden tener más de una línea de entrada, a excepción del símbolo final.
7. Sólo los símbolos de decisión tienen más de una línea de flujo de salida.
8. El ordinograma en conjunto debe guardar una cierta simetría.

I.6 PARTES BÁSICAS DE UN ORDINOGRAMA:

En la figura 89 se ilustra el esquema básico de un ordinograma en el cual se incluye: Inicio – Entrada de datos – Proceso – Salida de Resultados – Fin.

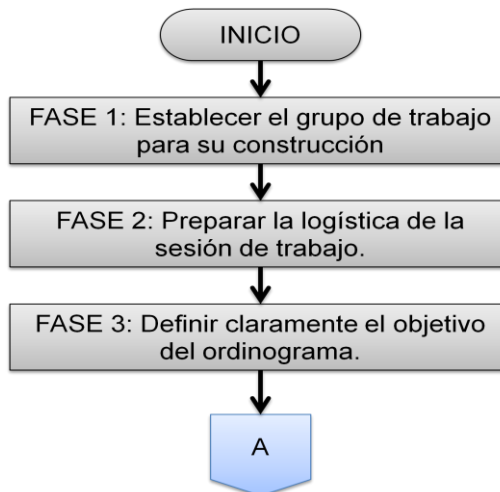
Figura 89. Esquema básico de un ordinograma

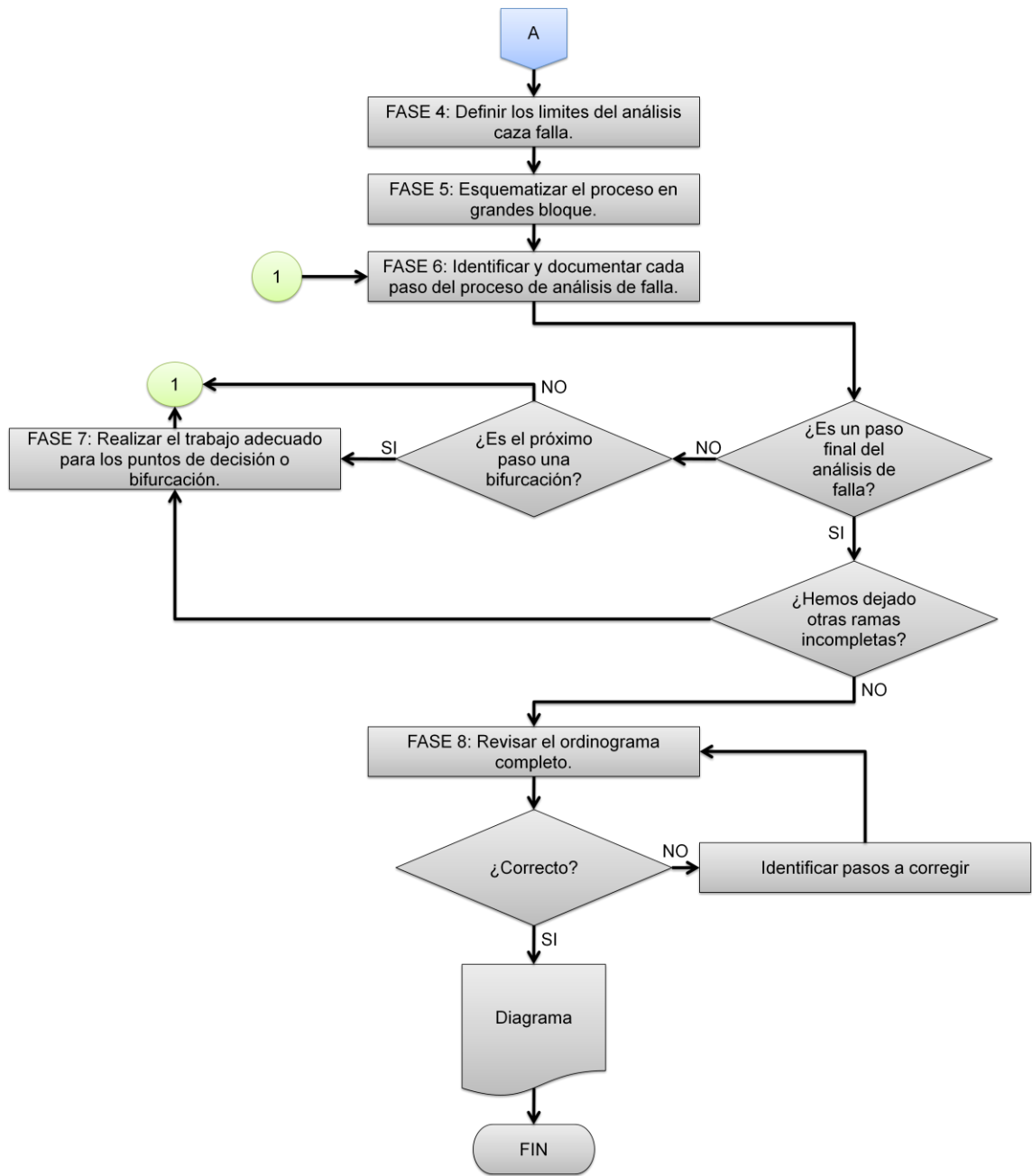


I.7 PROCESO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ORDINOGRAMAS

A continuación se plantean ocho fases que hay que seguir para realizar un ordinograma. como se puede ver en la figura 90. Los primeros 2 fases se centran en la preparación de la construcción del ordinograma:

Figura 90. Ordinograma para la creación de un ordinograma para el análisis de Fallas.





FASE 1: ESTABLECER EL GRUPO DE TRABAJO PARA SU CONSTRUCCIÓN.

1) Conformar el grupo de trabajo.

A manera de recomendación el grupo de trabajo debe estar integrado por:

- El especialista que dirige el proceso.
- Un operador familiarizado con el proceso operativo.
- Un técnico de mantenimiento en equipos mecánicos, eléctricos o de instrumentación.
- Un supervisor de planta.
- Un ingeniero de acuerdo a la especialidad en estudio.

2) **La pregunta a responder en seguida es:**

- *¿La solución del problema está dentro del alcance de influencia y capacidad del grupo de trabajo?*

Si la respuesta es sí continúe con el análisis, pero si la respuesta es no entonces redefina el grupo de trabajo y vincule el personal necesario (a juicio del grupo de trabajo) y continúe con el proceso de creación del ordinograma.

FASE 2: PREPARAR LA LOGÍSTICA DE LA SESIÓN DE TRABAJO.

Con objeto de que el ritmo de la sesión de trabajo sea el adecuado se debe prever:

1) Dar la información necesaria a los participantes en la reunión sobre el objeto de la misma y sobre el procedimiento para la creación del ordinograma (Por ejemplo: este proceso de construcción de ordinogramas).

2) Prepara superficies y material de escritura que permitan tener a la vista continuamente el trabajo que va siendo desarrollado.

DESARROLLO DE LA CONSTRUCCIÓN

Los seis pasos que a continuación se presentan tratan el desarrollo de la construcción de un ordinograma.

FASE 3: DEFINIR CLARAMENTE EL OBJETIVO DEL ORDINOGRAMA.

1) Clarificar el objetivo (*del análisis caza falla*) de la construcción del ordinograma.

El objetivo de la construcción del ordinograma debe basarse en crear una herramienta que sirva de guía para la detección de orígenes de falla en sistemas, subsistemas y equipos. Y para esto el grupo de trabajo debe plantearse y responderse los siguientes interrogantes:

- ¿Qué se debe hacer para detectar una causa de falla?
- ¿Por qué la actividad es necesaria?
- ¿Qué otra cosa se podría o debería hacer?

2) Determinar el nivel de detalle y la estructura que se requiere en el ordinograma para alcanzar el objetivo del análisis caza falla.

Para esto se requiere analizar:

- ¿Cómo se hace?
- ¿De qué otra forma se podría o debería hacer?

3) Analizar ¿cómo se pretende utilizar el Ordinograma?

4) Escribir el objetivo de la construcción del ordinograma de forma que sea visible para el grupo de trabajo durante todo el tiempo que dure la creación del mismo.

FASE 4: DEFINIR LOS LÍMITES DEL ANÁLISIS CAZA FALLA.

La forma de definir y clarificar los límites del proceso de análisis de falla es decir identificar ¿cuáles son el primer y último pasos del proceso de análisis de falla?:

1) El primer paso (es el que le da inicio al análisis de falla) del ordinograma se encuentra al responder:

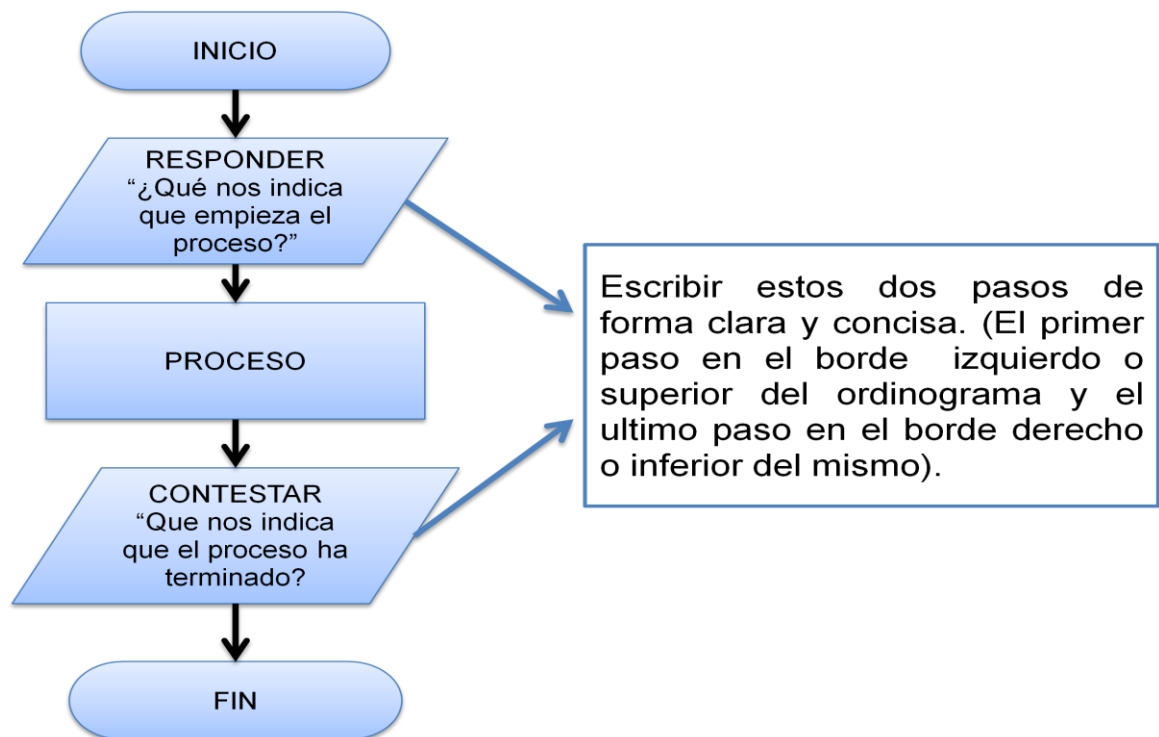
¿Qué nos indica que empieza el proceso de análisis de falla?

2) El último paso (indica que el análisis de falla ha finalizado) del ordinograma se encuentra al contestar:

¿Cómo sabemos que ha terminado el análisis de falla?

En la figura 91, Se ubican las preguntas para definir los límites de un proceso de análisis de fallas en un ordinograma.

Figura 91. Definición de los límites del proceso



Ejemplo:

FASE 3: Este ordinograma tiene como objetivo servir de herramienta para detectar causas de falla en el aire acondicionado de un vehículo MONTERO MITSUBISHI. Y será utilizado por el personal técnico de mantenimiento que realiza la inspección de los vehículos.

FASE 4: Nuestro primer paso es definir los límites del proceso en estudio:

- 1) El proceso empieza cuando se detecta el fallo en el sistema (funcionamiento del sistema de aire acondicionado fuera de parámetros establecidos).**

Se describe a continuación las cuatro desviaciones típicas del estándar operacional que se presentan en el sistema de aire acondicionado de los vehículos MONTERO MITSUBISHI según historial de fallas del departamento de mantenimiento de la empresa AUTOMOTORA DEL ORIENTE LTDA.

- a) No hay suficiente flujo de aire**
- b) El flujo de aire sale intermitentemente.**
- c) Sale aire pero no está frío.**
- d) No enfría bien**

Debido a que se presentan cuatro desviaciones del estándar operacional del sistema de aire acondicionado de los vehículos se decide hacer cuatro ordinogramas uno para cada problema detectado esto con el fin de que los ordinogramas sean sencillos y claros para el personal técnico de mantenimiento que los utiliza.

- 2) El proceso termina cuando se corrige el fallo y el sistema sigue en operación dentro de los parámetros de operación previamente establecidos.**

FASE 5: ESQUEMATIZAR EL PROCESO EN GRANDES BLOQUES.

1) Identificar los grupos de acciones más relevantes del proceso de análisis caza falla.

2) Establecer la secuencia temporal en la que se deben ejecutar los pasos para detectar las causas de falla. El grupo que crea el ordinograma debe responder los siguientes interrogantes:

- ¿Cuándo se hace?
- ¿Por qué se hace en ese momento en partículas?
- ¿Cuándo se podría o debería hacer?

3) Representar (de forma textual o gráfica) el esquema global del proceso a realizar.

Ejemplo:

Bloques de actividades (según su secuencia temporal):
Equipo en operación fuera de estándar
Inicio de análisis y detección de falla
Se detecta elemento o causa de falla
Se cambia el elemento que falló, o se elimina la causa de falla
Se inspecciona operación del equipo
Equipo en operación dentro de parámetros establecidos
Equipo sigue en operación.

FASE 6: IDENTIFICAR Y DOCUMENTAR CADA PASOS DEL PROCESO.

Cada paso que se da en el desarrollo de un análisis de falla está representado por un símbolo en el ordinograma así pues un paso puede ser una decisión, un proceso, un conector, un proceso Predefinido, mostrar resultados en una pantalla o cualquier símbolo que se coloque en el ordinograma.

Como cada símbolo representa un paso en el desarrollo del proceso de análisis de falla cada uno de estos deberá ser verificado en la realidad llevando a cabo el análisis, con el fin de comprobar la secuencia establecida en el ordinograma con lo que se hace en la realidad y poder establecer el orden más adecuado de las acciones que se tienen que llevar a cabo para detectar causas de falla.

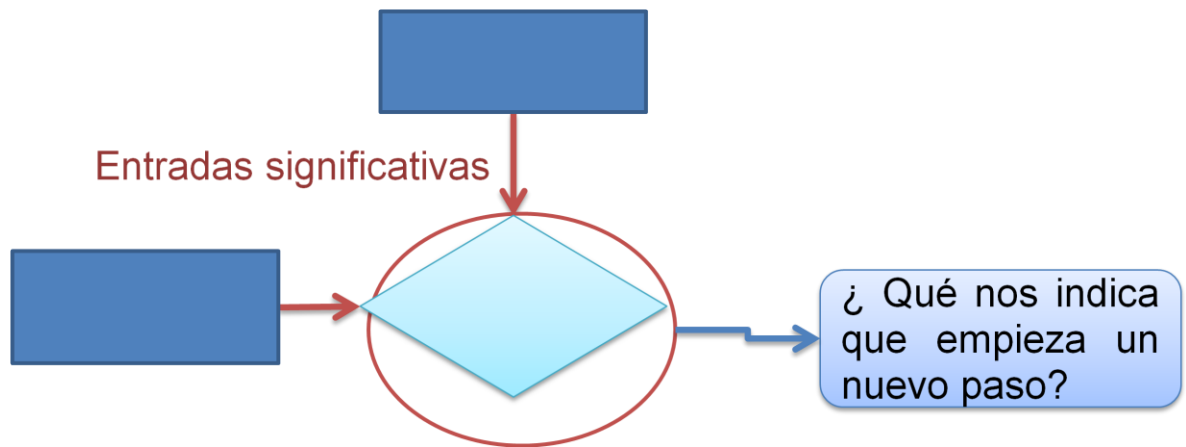
Después de responder el interrogante **¿Qué nos indica que empieza el proceso de análisis de falla?** De la fase 4. La actividad de identificar y documentar cada paso del análisis de falla empieza respondiendo el interrogante **¿Qué nos indica que empieza el siguiente paso del proceso de análisis de falla?**

Las preguntas a realizar enseguida para la identificación y documentación de los pasos del proceso de análisis de falla son las siguientes:

- 1) ¿Existen entradas significativas asociadas con este paso: tales como información, procesos, decisiones? ¿Este paso requiere de entradas que actualmente no se muestran en el ordinograma? ver la figura 92,

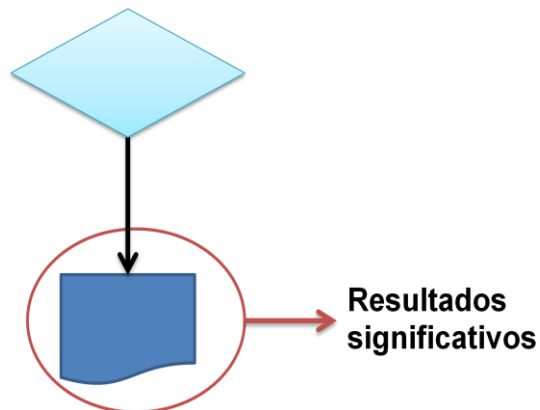
Si la respuesta a los dos interrogantes anteriores es afirmativa se deben señalar las entradas que falten por medio de los símbolos apropiados, en el ordinograma.

Figura 92. Entradas significativas



- 2) ¿Existen resultados significativos como consecuencia de este paso tales como documentos, procesos, decisiones, conectores? ver la figura 93,

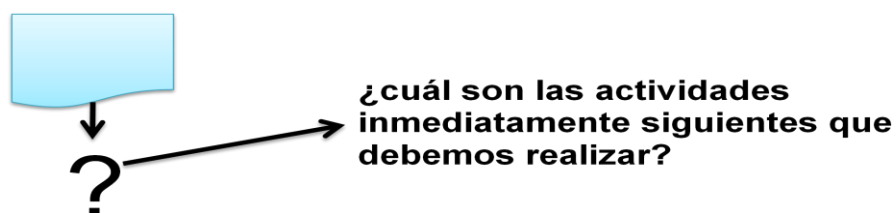
Figura 93. Resultados significativos



- 3) Una vez realizado este paso (ver figura 91.), ¿cuáles son las actividades inmediatamente siguientes que debemos realizar?

Señalar estas actividades, mediante el símbolo apropiado, en el ordinograma.
Ver figura 94

Figura 94. Paso siguiente a realizar.

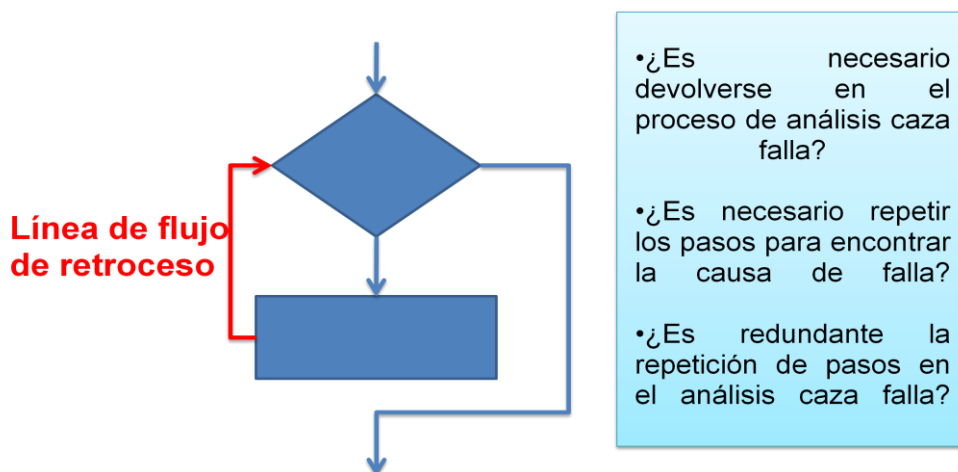


Nota: Cada vez que haya un símbolo en el ordinograma que éste acompañado de una línea de flujo que se devuelva a un paso anterior al que se encuentra dicho símbolo (repetición de las actividades en el análisis caza falla), el grupo de trabajo debe analizar la línea de flujo de salida de este símbolo y evaluar si es necesario devolverse en el proceso de análisis caza falla ya que esto implica: como se puede ver en la figura 95,

- Demoras en el proceso de identificación y corrección de fallas
- Mayores esfuerzos por parte del personal que esté llevando a cabo el análisis caza falla.

Todo esto aumenta los costos de realizar el análisis de falla.

Figura 95. Análisis del retroceso de las líneas de flujo del proceso



FASE 7: REALIZAR EL TRABAJO ADECUADO PARA LOS PUNTOS DE DECISIÓN O BIFURCACIÓN.

Cuando se llega a un paso en el que existe un punto de decisión o de bifurcación (como se muestra a continuación en la figura 96)

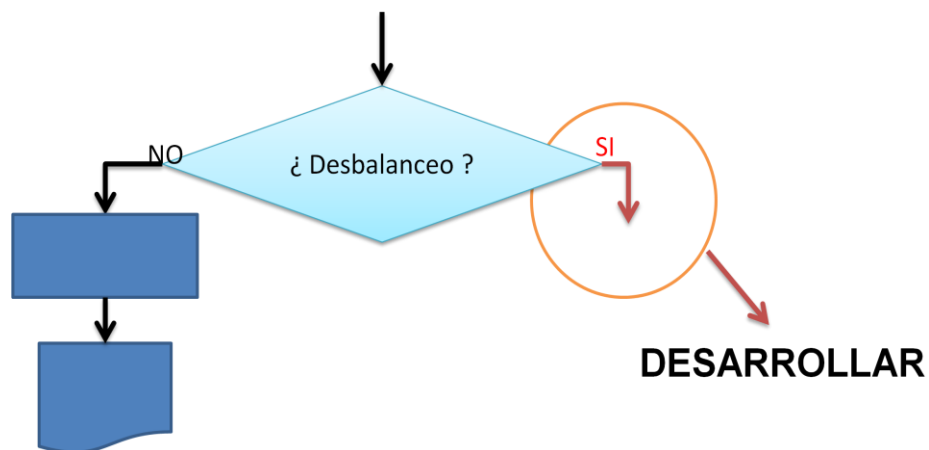
a) Escribir la decisión o alternativa de acuerdo con la simbología utilizada e identificar los posibles caminos a seguir mediante la notación adecuada.

En general, cuando se trata de una toma de decisión, se incluye dentro del símbolo una pregunta y la notación de las dos ramas posibles correspondientes se identifican con la notación SI/NO.

b) Escoger la rama más natural o frecuente de la bifurcación y desarrollarla, según lo dispuesto en el "**Fase 6**", hasta completarla.

c) Retroceder hasta la bifurcación y desarrollar el resto de las ramas de igual modo.

Figura 96. Desarrollo del símbolo de decisión



Ejemplo:

Se presenta en las figuras 97, 98, 98, 100. Los ordinogramas de detección y corrección de fallas en el sistema de refrigeración de un vehículo MONTERO MITSUBISHI.

Figura 97. Ordinograma para el efecto de falla: No hay suficiente flujo de aire.

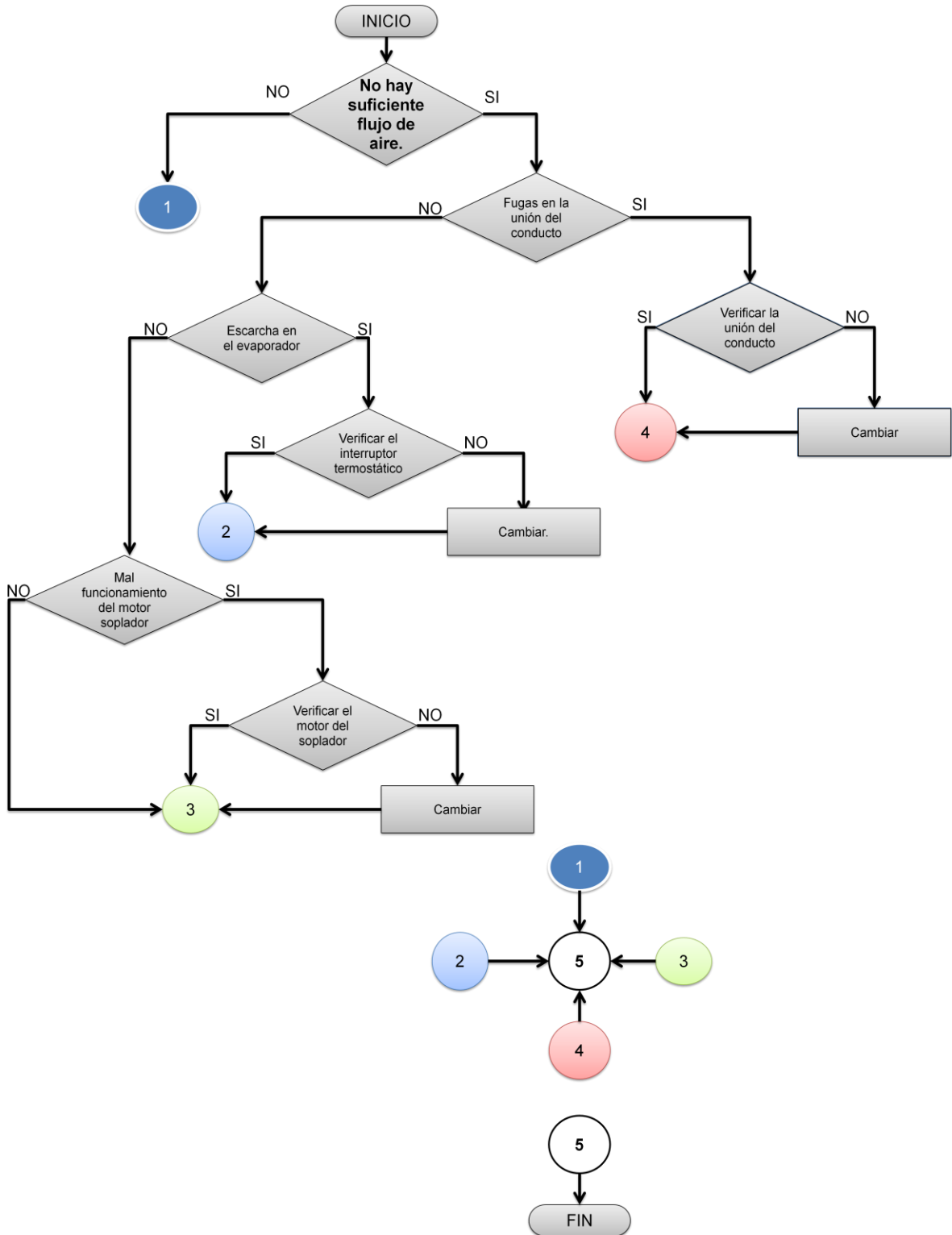


Figura 98. Ordinograma para el efecto de falla: El flujo del aire frio sale intermitentemente.

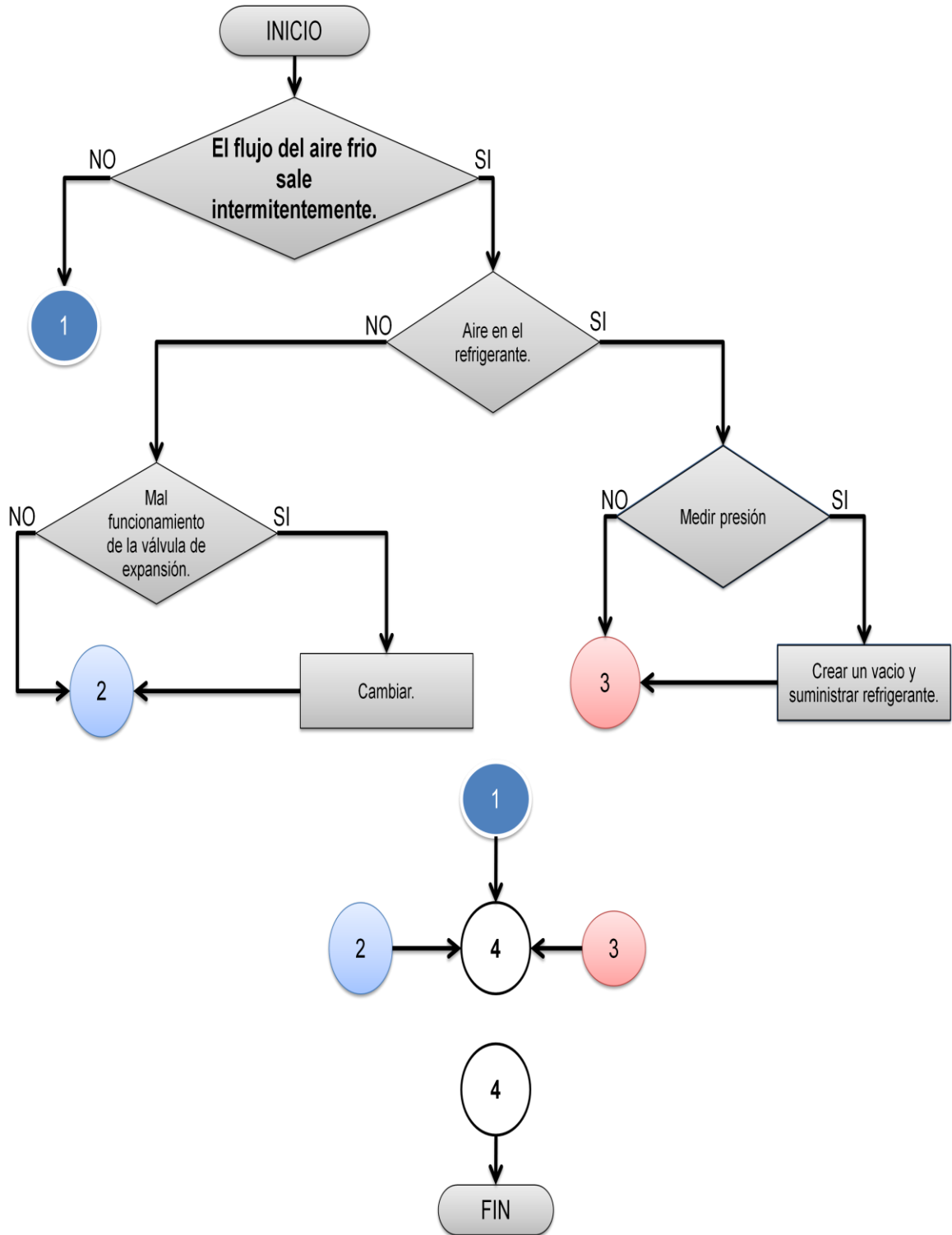
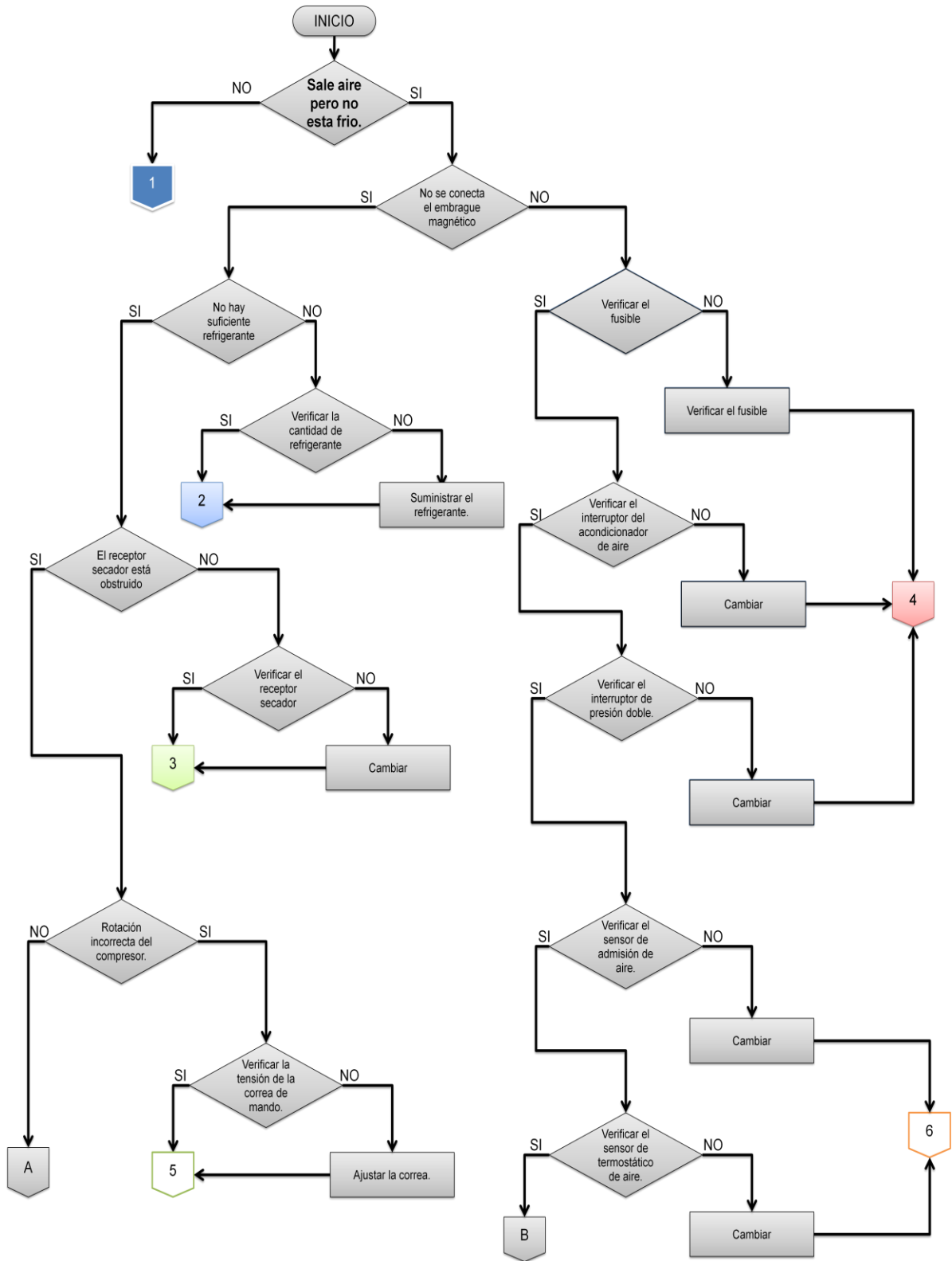


Figura 99. Ordinograma para el efecto de falla: sale aire pero no está frío.



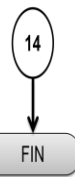
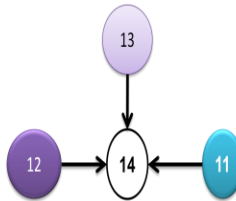
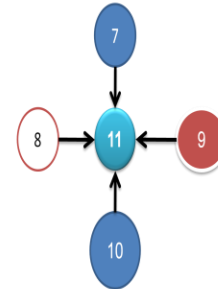
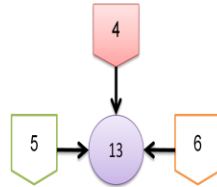
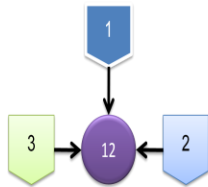
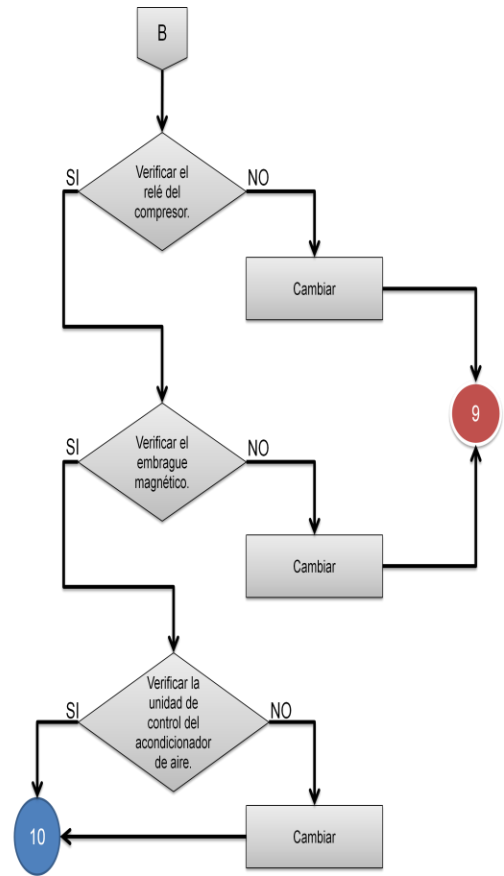
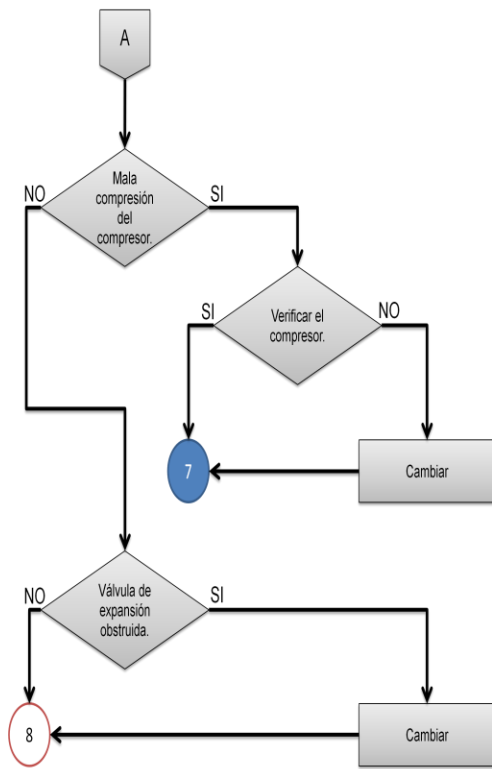
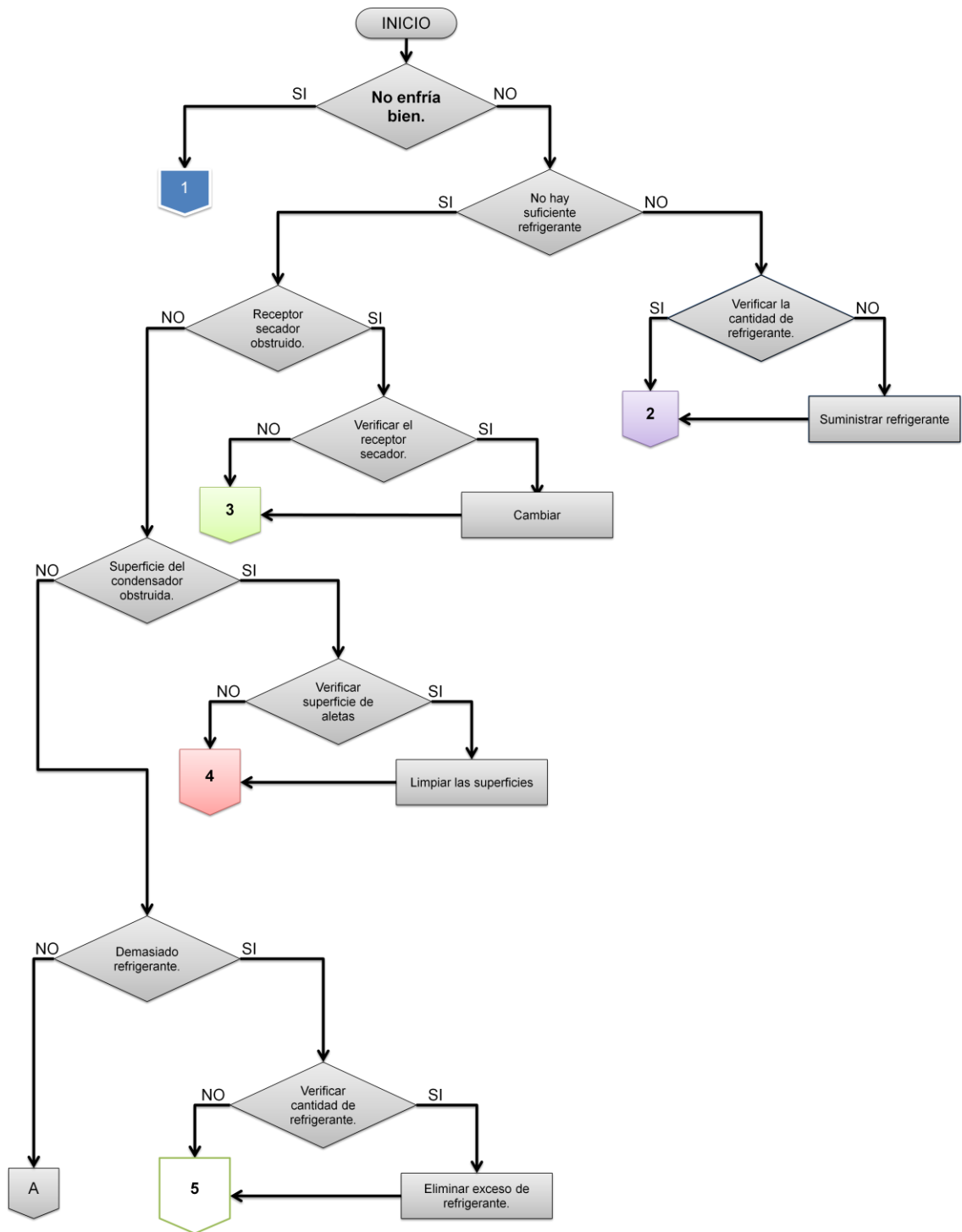
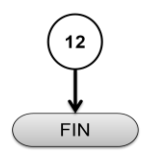
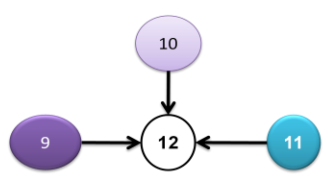
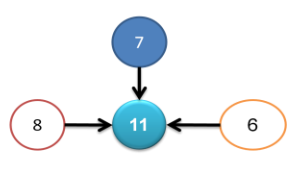
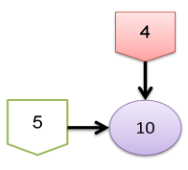
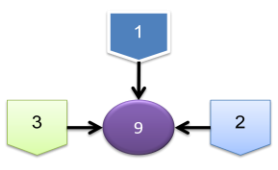
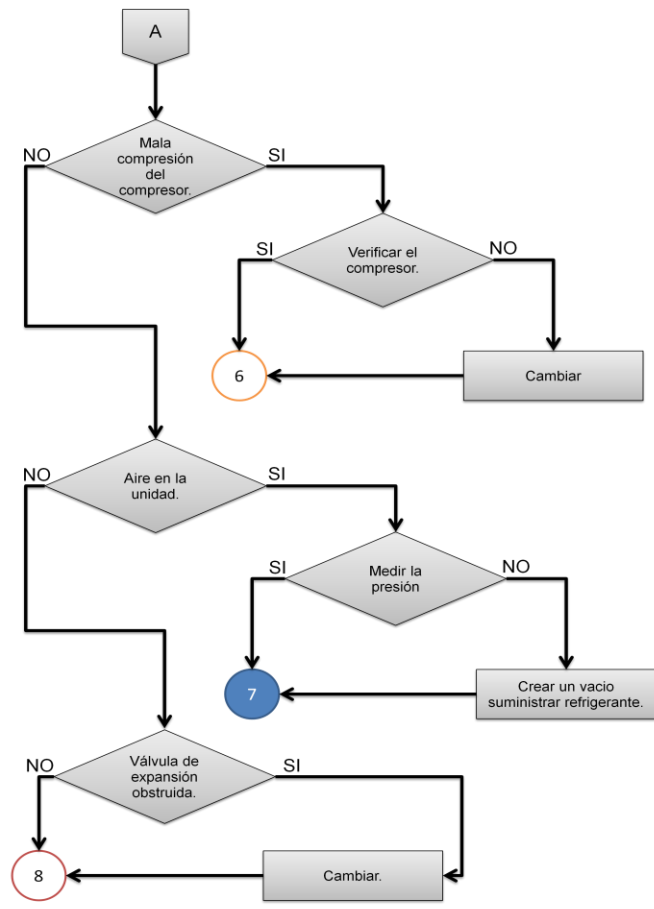


Figura 100. Ordinograma para el efecto de falla: No enfría bien.





FASE 8: REVISAR EL ORDINOGRAMA COMPLETO.

Comprobar que no se han omitido pasos, y que el proceso tiene una secuencia lógica. En caso de que existan dudas sobre parte del análisis caza falla representado, realizar una observación y verificación directa del proceso de análisis.

Examinar cada símbolo:

Este examen puede poner de manifiesto las deficiencias que pueda tener el ordinograma mediante cuestiones tales como:

- ¿Es necesario este paso para la detección de la causa de falla?
- ¿Este paso aporta al cumplimiento del objetivo planteado en la Fase 3?
- ¿Es un paso redundante en la detección de la causa de falla?

A continuación se generan una serie de preguntas que se debe hacer el grupo de trabajo que realiza el ordinograma:

- ¿Todas las flechas que indican los flujos del proceso inician en un símbolo y terminan en otro?
- ¿El ordinograma muestra la naturaleza serial del proceso de análisis caza falla?
- ¿El ordinograma representa de forma pertinente, sencilla y rápida como detectar y localizar fallas en procesos, sistemas y equipos?

Cuanto más sistematizado sea el ordinograma, más sencilla y eficaz puede resultar la detección de fallas en equipos.

I.8 UTILIDAD DE LA HERRAMIENTA

La herramienta es útil para:

- Identificación de fallas
- Análisis de las desviaciones operacionales que presenten los equipos.
- Identificación de Posibles Soluciones
- Diseño de soluciones
- Formulación de Teorías Sobre las Causas de falla.
- Evaluación de posibles soluciones
- Evaluación de la solución implantada
- Obtención de un conocimiento global y específico de un proceso de análisis
caza fallas.

ANEXO J

J. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EL ANÁLISIS DE FALLAS

El análisis exhaustivo y completo de los datos obtenidos de procesos de mantenimiento y producción mediante herramientas estadísticas generan instrumentos que ayudan a encontrar: fallas para su eliminación o control, causas de productos y servicios defectuosos para su erradicación⁵⁷.

Para abordar los métodos estadísticos para el análisis de fallas se citan definiciones de estadística que en principio dan una idea global de los temas que a continuación se tratan.

“La Estadística es la ciencia cuyo objeto es la obtención y análisis de datos mediante el recurso de modelos matemáticos y herramientas informáticas”⁵⁸.

“La Estadística es una teoría que trabaja con información, cuyo objetivo es hacer inferencias”⁵⁹.

“La estadística es un conjunto de técnicas que, partiendo de la observación de fenómenos, permiten al investigador obtener conclusiones útiles sobre ellos”⁶⁰.

J.1 DIVISIÓN DE LA ESTADÍSTICA SEGÚN EL TIPO DE INVESTIGACIÓN

La estadística se divide en dos grandes ramas de estudio:

⁵⁷MORA GUTIÉRREZ, Alberto. Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios. 2007 AMG, Colombia

⁵⁸ROMERO VILLA Franca Rafael, ZÚNICA RAMAJO Luisa Rosa. Métodos estadísticos en ingeniería. Universidad Politécnica de Valencia, 2005. Pag 14-16.

⁵⁹DENNIS D. Wackerly, RICHARD L. Scheaffer, Estadística matemática con aplicaciones, Edición: 6, Cengage Learning Editores, 2002. Pag 11-14.

⁶⁰GUARÍN SALAZAR Norberto, Estadística Aplicada, Universidad Nacional de Colombia, 2002. Pag. 4-60.

J.1.1 La estadística descriptiva

Esta se preocupa en primer lugar, por los métodos de recogida y descripción de datos, en segundo lugar, de generar técnicas que permitan el análisis de la información y en tercer lugar, de resumir y sintetizar la información que se tiene a partir de los datos individuales⁶¹. Tiene por objetivo fundamental la descripción numérica de un conjunto de datos. No generaliza las conclusiones obtenidas a otro grupo de datos.

J.1.2 La estadística matemática o inferencial

Desarrolla modelos teóricos que se ajusten a una determinada realidad con cierto grado de confianza. Tiene como finalidad generalizar los aspectos más característicos de los datos, buscando inducir propiedades o leyes que rigen el fenómeno en la población. Usa la información aportada por una muestra para sacar conclusiones de la población de la cual ha sido extraída.

J.2 DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS

Para la presentación de los datos se suelen utilizar estadísticas del tipo de distribución de frecuencias, que están basadas en la reducción de datos mediante la agrupación de los mismos con arreglo a un criterio de repetición. En este tipo de estadísticas los elementos pierden su individualidad en beneficio de un mejor conocimiento del comportamiento general⁶².

⁶¹LLORENTE GALERA Francisco, MARÍN FERIA Susana, TORRA PORRAS Salvador, Editorial Ramón Areces, 2000. Pag: 3-5.

⁶²FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ Santiago, Estadística descriptiva, ESIC Editorial, edición 2, 2002. Pag 46-47

Las distribuciones de frecuencias se presentan mediante tablas estadísticas que son agrupaciones de datos ordenados con arreglos a un criterio lógico, proceso que se denomina tabulación. El proceso que se sigue con los datos obtenidos en la observación es el siguiente:

- a. Obtención
- b. Ordenación
- c. Agrupación de los valores que se repiten (**frecuencia**).
- d. Presentación de la tabla estadística con sus diferentes frecuencias.

Las distribuciones de frecuencia se utilizan cuando no es necesario mantener la identidad del individuo, en estas la identidad de los individuos se diluye en el grupo.

Existen dos formas de distribución de frecuencias:

- Frecuencia Simple
- Frecuencia por intervalos

Las cuales se estudiarán a continuación.

J.2.1 Distribución de frecuencia simple

Para mayor simplicidad en la exposición del tema, se expone el ejemplo 1.

Ejemplo 1:

En la fábrica SIAF, se va a estudiar la frecuencia de falla de los elementos que componen de 50 máquinas iguales.

1) Obtener Datos.

Se recoge la información respecto de los elementos causantes de falla de 50 Máquinas iguales y se relacionan en la Tabla 61.

Tabla 61. Elementos causantes de falla de 50 máquinas de la fábrica SIAF

Máquina	Elemento	Máquina	Elemento	Máquina	Elemento
Nº	causante de falla.	Nº	causante de falla.	Nº	causante de falla.
1	3C	18	5E	35	4D
2	5E	19	4D	36	1A
3	6F	20	6F	37	6F
4	5E	21	6F	38	3C
5	4D	22	6F	39	7G
6	7G	23	3C	40	5E
7	5E	24	6F	41	3C
8	9J	25	4D	42	8H
9	2B	26	8H	43	7G
10	5E	27	5E	44	2B
11	5E	28	6F	45	9J
12	2B	29	7G	46	6F
13	5E	30	6F	47	4D
14	6F	31	7G	48	5E
15	5E	32	4D	49	4D
16	7G	33	8H	50	7G
17	3C	34	5E		

2) Ordenar Datos

En la tabla 62. Se dejan los datos de los elementos causantes de falla de todas las máquinas.

Tabla 62. Elementos causantes de falla de 50 máquinas

Elemento causante de falla.	Elemento causante de falla.	Elemento causante de falla.	Elemento causante de falla.	Elemento causante de falla.
3C	5E	6F	7G	3C
5E	2B	6F	4D	8H
6F	5E	3C	8H	7G
5E	6F	6F	5E	2B
4D	5E	4D	4D	9J
7G	7G	8H	1A	6F
5E	3C	5E	6F	4D
9J	5E	6F	3C	5E
2B	4D	7G	7G	4D
5E	6F	6F	5E	7G

En la tabla 63. Se procede a ordenar de menor a mayor según el número asignado a cada elemento causante de falla.

Tabla 63. Elementos causantes de falla ordenados

Elemento causante de falla.	Elemento causante de falla.	Elemento causante de falla.	Elemento causante de falla.	Elemento causante de falla.
1ª	4D	5E	6F	7G
2B	4D	5E	6F	7G
2B	4D	5E	6F	7G
2B	4D	5E	6F	7G
3C	4D	5E	6F	7G
3C	4D	5E	6F	8H
3C	4D	5E	6F	8H
3C	4D	5E	6F	8H
3C	5E	5E	6F	9J
4D	5E	5E	6F	9J

3) Agrupación de los valores que se repiten (frecuencia).

En la tabla 64. Se presenta la distribución de frecuencias de los elementos causantes de falla y se agrupan según este parámetro.

Tabla 64. Distribución de frecuencias de los elementos causantes de falla.

Elemento causante de falla	CONTEO	REPETICIÓN
1 ^a	I	1
2B	III	3
3C	IIII	5
4D	IIIIIIII	9
5E	IIIIIIIIII	12
6F	IIIIIIII	10
7G	IIII	5
8H	III	3
9J	II	2
SUMA		50

Como se puede observar, hay una gran diferencia entre los datos brutos de la tabla 61. Y el ordenamiento y agrupamiento de la tabla 64.

n: El tamaño de la muestra, es el número de observaciones.

X_i: La variable, es cada uno de los diferentes valores que se han observado.

La variable x_i , toma los valores $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_m$ valores.

f_i: La frecuencia absoluta o simplemente frecuencia, es el número de veces que se repite la variable X_i ; así f_1 , es el número de veces que se repite la observación x_1 , f_2 el número de veces que se repite la observación x_2 etc.

f_a: La frecuencia acumulada, se obtiene acumulando la frecuencia absoluta.

f_r : Frecuencia relativa; es el resultado de dividir cada una de las frecuencias absolutas por el tamaño de la muestra.

f_{ra} : Frecuencia relativa acumulada; se obtiene dividiendo la frecuencia acumulada entre el tamaño de la muestra.

En la tabla 65 se muestra la distribución de frecuencias teóricas para n observaciones.

Tabla 65. Distribución teórica de frecuencias de n observaciones.

Variable X_i	frecuencia f_i	Frecuencia acumulada f_a	frecuencia relativa f_r	frecuencia relativa acumulada f_{ra}
X_1	f_1	f_1	F_1/n	F_1/n
X_2	f_2	f_1+f_2	F_2/n	$(f_1+f_2)/n$
.
.
X_i	f_i	$f_1+f_2+\dots+f_i$	f_i/n	$(f_1+f_2+\dots+f_i)/n$
.
.
X_m	f_m	$f_1+f_2+\dots+f_m$	f_m/n	$(f_1+f_2+\dots+f_m)/n$
	n		1.00	

4) Presentación de la tabla estadística con sus diferentes frecuencias.

En la tabla 66 se muestra la distribución de frecuencia individual, acumulada, relativa y relativa acumulada para cada elemento causante de falla de 50 máquinas de la fábrica SIAF.

Tabla 66 Distribuciones de frecuencia por elemento

Elemento causante de falla.	f_i	f_a	f_r	f_{ra}
1 ^a	1	1	0.02	0.02
2B	3	4	0.06	0.08
3C	5	9	0.10	0.18
4D	9	18	0.18	0.36
5E	12	30	0.24	0.60
6F	10	40	0.20	.08
7G	5	45	0.10	0.9
8H	3	48	0.06	0.96
9J	2	50	0.04	1.00
SUMA	50		1.00	

Analizando las columnas porcentuales f_r y f_{ra} se obtiene, observaciones como:

- Sólo el 4% de las máquinas presentan fallas debido al elemento 9J.
- Sólo en una máquina el elemento causante de falla es el 1. Lo que constituye el 2% del total de las máquinas.
- El 62% de las máquinas presentan fallas causadas por los elementos 4D, 5E y 6F.

Con un análisis de distribución de frecuencias y en general con métodos cuantitativos para análisis de fallas se tienen fundamentos para la selección o mejora de acciones, tácticas y estrategias de mantenimiento.

J.2.2 Distribución de frecuencias por intervalos

Usualmente los valores de los datos no permiten un agrupamiento de ellos en una tabla de frecuencias simple, debido a que se encuentran distribuidos a través de todo el recorrido y el número de veces que se repite cada observación no es significativo en todos los casos, y en la mayoría de ellos su frecuencia es baja. Una tabla de frecuencia construida en estas condiciones, no presenta ninguna utilidad, debido a esto surge la necesidad de agrupar los datos en intervalos de valores.

Se explica la distribución de frecuencias por intervalos a través de un ejemplo.

Ejemplo 2:

En la fábrica SIAF con el objetivo de tener un control sobre el tiempo de no disponibilidad de 100 máquinas y fundamentos cuantitativos para dirigir las acciones, tácticas y estrategias de mantenimiento al grupo de máquinas con los mayores tiempo de no disponibilidad. Se desea hacer un estudio del tiempo en el que las máquinas no están disponibles. A cada máquina se le tomó el tiempo de no disponibilidad durante 12 meses. Los datos se relacionan en la tabla 67.

1) Obtener datos

En términos generales, es usual que el número de intervalos no sea inferior a 5 ni superior a 15. Sturges propone que el número de clases o intervalos sea determinado por la expresión $m \cong 1 + 3.3 \log (n)$ ⁶³.

La amplitud debe ser igual para todos los intervalos y, en lo posible, no se debe trabajar con clases abiertas.

⁶³ STURGES hebert, Trabajos de estadística descriptiva, 1926.

Tabla No. 67 Tiempo en minutos de no disponibilidad de 100 máquinas de la fábrica SIAF

478	458	683	780	736	448	591	555
339	694	478	498	310	537	592	549
666	239	398	720	648	533	586	321
313	644	495	122	521	368	531	472
415	291	621	253	763	746	323	575
210	480	223	433	444	437	360	559
425	459	418	351	361	183	383	259
419	655	487	135	370	345	282	578
425	436	634	450	223	479	161	337
420	422	282	439	449	321	452	444
391	569	460	308	477	463	367	251
487	610	470	469	392	517	359	527
540	504	542	369				

2) Ordenar datos

➤ Reglas empíricas para la construcción de intervalos

Es aconsejable seguir los pasos que se dan a continuación:

- Determinar los datos de mayor y menor valor X_{max} , X_{min} .
- Calcular el rango o recorrido.

$$R = X_{max} - X_{min} \quad (31)$$

- Determinar el número de intervalos (m) y la amplitud de clase (A):

$$m \cong 1 + 3.3 \log (n) \quad (32)$$

- Debe tenerse presente que m es un número natural. Luego se busca la amplitud (A):

$$A > \frac{R}{m},$$

- Calcular el rango amplio:

$$Ra = m * A \quad (33)$$

- Establecer la diferencia $a=R_a-R$, es decir la cantidad en que ha sido alterado el rango, la cual no debe ser superior a la amplitud.

“a” También puede ser definida como la cantidad positiva más pequeña que le hace falta al rango para ser divisible exactamente por la amplitud.

$$a = Ra - R \quad (34)$$

- Distribuir adecuadamente la cantidad “a” de la siguiente manera:

Al valor X_{min} se le resta aproximadamente $\frac{a}{2}$ y la parte restante se le suma a X_{max} , obteniendo el límite inferior del primer intervalo y el límite superior del último, respectivamente. En la tabla 68 se muestra la obtención de los intervalos para el ejemplo.

$$X_{min} - \left(\text{aproximadamente } \frac{a}{2} \right) = LIPI \text{ (Límite inferior del primer intervalo)}. \quad (35)$$

$$X_{max} + \left(\text{aproximadamente } \frac{a}{2} \right) = LSUI \text{ (Límite superior del último intervalo)} \quad (36)$$

- Construir los intervalos
- Calcular los puntos medios o marcas de clase
- Hacer el agrupamiento de frecuencias.

Tabla 68. Reglas empíricas para la construcción de intervalos

Intervalos	Marcas de clase X	Frecuencia f_i	Frecuencia acumulada f_a	Frecuencia relativa f_r	Frecuencia relativa acumulada f_{ra}
LIPI-LIPI+A	X_1	f_1	f_1	f_1/n	f_1/n
LIPI+A-LIPI+2 ^a	X_2	f_2	f_1+f_2	f_2/n	$(f_1+f_2)/n$
.
.
(LIPI+(m-1)A)-LSUI	X_m	f_m	n	f_m/n	1.00
SUMA		N		1.00	

n: Número de observaciones

LIPI: Límite inferior del primer intervalo

LSUI: Límite superior del último intervalo

X_i : Punto medio del intervalo, o marca de clase

- Con el fin de evitar dobles conteos se toma el límite inferior del intervalo cerrado y el límite superior del intervalo abierto.

Retomando la tabla 67, del **ejemplo 2** y construyendo una distribución de frecuencias por intervalos.

$$X_{max} = 780$$

$$a \leq X < b$$

- Rango:

$$R = X_{max} - X_{min}$$

$$R = 780 - 122 = 658$$

- Número de intervalos

$$m \cong 1 + 3.3 \log (n)$$

$$m \cong 1 + 3.3 \log (100)$$

$$m \cong 1 + 3.3(2) = 7.6$$

No es lógico escoger 7.6 intervalos, por lo tanto se procede a aproximar el número de intervalos a un número natural cercano.

Aproximemos, $m=7$, y se busca la amplitud.

$$A > \frac{R}{m}, A > \frac{658}{7} = 94$$

Ya determinado el número de clases en $m=7$, la amplitud debe ser mayor que 94. Se fija, entonces, en $A=100$, que hace más manejable y presentable la tabla con la información.

- Rango ampliado

$$R_a = 7 \cdot 100$$

- Se altero el Rango original $R=658$, cambiándolo por el rango ampliado.

$R_a=700$. La diferencia está representada por $a=R_a-R$ esto quiere decir:

$$a = 700 - 658 = 42.$$

- Se tiene por tanto, que distribuir adecuadamente la diferencia entre los rangos.

$$X_{min} - \left(\text{aproximadamente } \frac{a}{2} \right) = LIPI ; 122 - 22 = 100 = LIPI$$

$$X_{max} + \left(\text{aproximadamente } \frac{a}{2} \right) = LSUI ; 780 + 20 = 800 = LSUI$$

Como se dijo antes, no se está hablando de restar o sumar estrictamente $\frac{a}{2}$ sino una cantidad aproximada que brinde una buena presentación.

3) Agrupación de los valores que se repiten ver tablas 69, 70, 71, 72.

- Construcción de los intervalos.

Tabla 69. Distribución de datos según intervalos

Intervalos Minutos	Marca de clase $X = [(LIPI + LSUI) / 2]$	Datos del intervalo
100-200	150	122, 135, 161, 183.
200-300	250	210, 223, 223, 239, 251, 253, 259, 282, 282, 291.
300-400	350	308, 310, 313, 321, 321, 323, 337, 339, 345, 351, 359, 360, 361, 367, 368, 369, 370, 383, 391, 392, 398.
400-500	450	415, 418, 419, 420, 422, 425, 425, 433, 436, 437, 439, 444, 444, 448, 449, 450, 452, 458, 459, 460, 463, 469, 470, 472, 477, 478, 478, 479, 480, 487, 487, 495, 498.
500-600	550	504, 517, 521, 527, 531, 533, 537, 540, 542, 549, 555, 559, 569, 575, 578, 586, 591, 592.
600-700	650	610, 621, 634, 644, 648, 655, 666, 683, 694.
700-800	750	720, 736, 746, 763, 780.

Tabla 70. Conteo de datos según intervalos

Intervalos minutos	Marca de clase $X=[(LIPI+LSUI)/2]$	f_i	Conteo
100-200	150	4	
200-300	250	10	
300-400	350	21	
400-500	450	33	
500-600	550	18	
600-700	650	9	
700-800	750	5	

Tabla 71. Tiempo total y porcentaje de no disponibilidad de cada intervalo

Intervalos minutos	Marca de clase $X=[(LIPI+LSUI)/2]$	f_i	Tiempo de no disponibilidad (minutos)	Porcentaje de no disponibilidad
100-200	150	4	601	1.336%
200-300	250	10	2513	5.585%
300-400	350	21	7386	16.416%
400-500	450	33	14986	33.308%
500-600	550	18	9906	22.017%
600-700	650	9	5855	13.014%
700-800	750	5	3745	8.324%
SUMA			44992	100%

Tabla 72. Construcción de los intervalos para el tiempo de no disponibilidad de las 100 máquinas

CONSTRUCCIÓN DE LOS INTERVALOS PARA EL TIEMPO DE NO DISPONIBILIDAD DE LAS 100 MÁQUINAS			
Intervalos	Marca de clase X	f_i	
100-200	150	4	
200-300	250	10	
300-400	350	21	Clase Pre-modal
400-500	450	33	Clase Modal
500-600	550	18	Clase Pos-modal
600-700	650	9	
700-800	750	5	

Se puede desde luego, proceder a agrupar la información en los respectivos intervalos, haciendo la salvedad de que ninguno de los límites superiores de las clases son considerados dentro de los intervalos.

4) Presentación de la tabla estadística con sus diferentes frecuencias.

En la tabla 73 se muestra la distribución de frecuencias por intervalos del tiempo de no disponibilidad de 100 máquinas de la fábrica SIAF. De esta se obtienen observaciones como:

- El 72% de las máquinas tienen un tiempo de no disponibilidad entre 300 y 600 minutos.
- De todas las máquinas, 5 de ellas tienen un tiempo de no disponibilidad entre 700 y 800 minutos que representan el 8.324% del tiempo de no disponibilidad de todas las máquinas, estas máquinas tienen el mayor tiempo individual de no

disponibilidad y hay que dirigir inmediatamente esfuerzos de mantenimiento para mejorar la disponibilidad de estos equipos.

- De las máquinas 14 de ellas que tienen tiempos de no disponibilidad entre 600 y 800 minutos representan el 21.338% del tiempo de no disponibilidad (pocas máquinas con tiempos de no disponibilidad altos). Este es un dato importante de mantenimiento ya que dirigiendo recursos y esfuerzos a estas máquinas se logra disminuir en gran medida el tiempo total de no disponibilidad de las 100 máquinas.

Tabla 73. Distribución de frecuencias por intervalos del tiempo de no disponibilidad de 100 máquinas de la fábrica SIAF.

INTERVALOS (Minutos)	X	f _i	f _a	f _r	f _{ra}	Tiempo de no disponibilidad (minutos)	Porcentaje de no disponibilidad
100-200	150	4	4	0.04	0.04	601	1.336%
200 -300	250	10	14	0.10	0.14	2513	5.585%
300 -400	350	21	35	0.21	0.35	7386	16.416%
400 -500	450	33	68	0.33	0.68	14986	33.308%
500 -600	550	18	86	0.18	0.86	9906	22.017%
600 -700	650	9	95	0.09	0.95	5855	13.014%
700 -800	750	5	100	0.05	1.00	3745	8.324%
SUMA		100		1.00		44992	100%

Nota: Algunos autores afirman que en la actualidad, con la utilización de los computadores los datos se trabajan siempre sin agrupar, habiéndose convertido la distribución por intervalos en una mera forma de presentación visual de los datos⁶⁴.

⁶⁴ Ronquillo Melcio Ana, Estadística aplicada: Técnicas cuantitativas y cualitativas de análisis, Editorial Ramon Areces, 1997. Pag:31-33.

J.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA

La representación gráfica es un medio auxiliar de investigación estadística. El objetivo al construir un gráfico es lograr un impacto visual apropiado de los datos. Con las representaciones se busca transmitir los resultados de un análisis de forma rápida, directa y comprensible para un conjunto amplio de personas. Una gráfica es un dibujo complementario a una tabla o cuadro, que permite observar las tendencias de un fenómeno en estudio y facilita el análisis estadístico de las variables allí relacionadas.

J.3.1 Representación gráfica de variables

Cuando se muestran los datos estadísticos a través de representaciones gráficas, se ha de adaptar el contenido a la información visual que se pretende transmitir. Para ello, se cuenta con múltiples formas de representación:

➤ Diagrama de líneas

Usado básicamente para representar el comportamiento de una variable cuantitativa a través del tiempo como se puede ver figura 101. El gráfico de líneas consiste en segmentos rectilíneos unidos entre sí, los cuales resaltan las variaciones de la variable por unidad de tiempo.

Figura 101. Ejemplo de diagrama de líneas

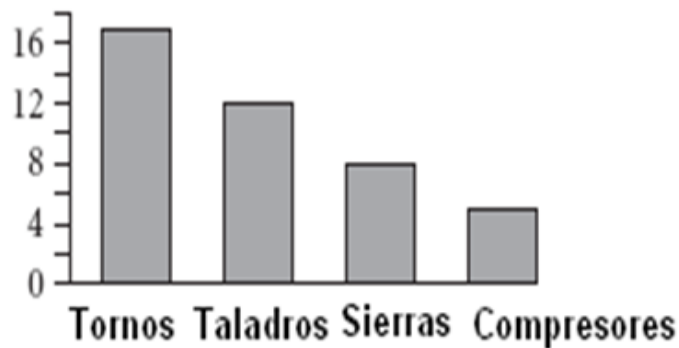


➤ **Diagrama de Barras:**

El gráfico de barras, como su nombre lo indica, está construido por barras rectangulares de igual ancho, conservando la misma distancia de separación entre sí. En la figura 102 se puede ver un ejemplo. Se utiliza básicamente para mostrar y comparar frecuencias de variables cualitativas o comportamientos en el tiempo, cuando el número de ítems es reducido⁶⁵.

Figura 102. Ejemplo de diagrama de barras

Máquinas inspeccionadas en una semana



Histograma de Frecuencias

Forma especial de diagrama de barras para distribución de frecuencias cuantitativas continuas en la figura 103 se ve un ejemplo. Para la construcción de un histograma, debe disponerse de una distribución de frecuencias por intervalos con amplitud igual para cada clase de intervalo. En el eje de las abscisas procedemos a representar los intervalos de la variable, y en el eje de las ordenadas las frecuencias de cada clase.

⁶⁵ GUARÍN SALAZAR Norberto, Estadística Aplicada, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
Pag: 37

El histograma se construye dibujando barras contiguas que tienen como base la amplitud de cada intervalo y como altura la frecuencias respectivas⁶⁶.

El histograma utiliza los conceptos de clase, rango y frecuencia.

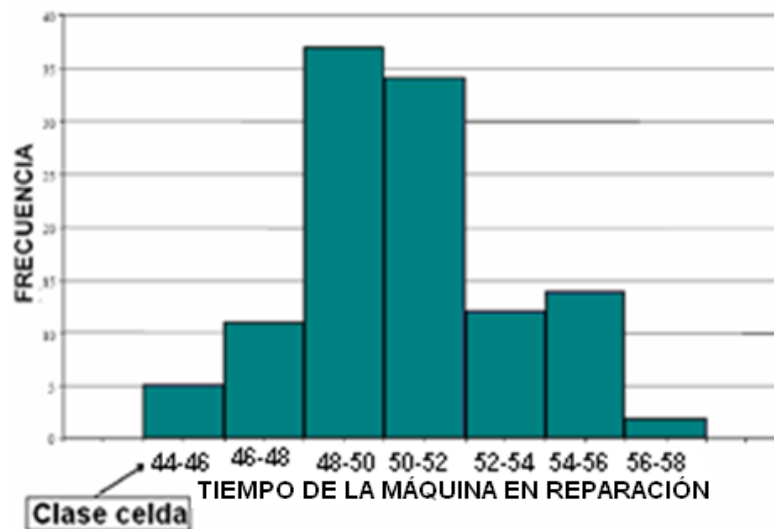
Clase: Por clase se entiende la dimensión de un intervalo de variabilidad de los datos que se toma como base para representar los propios datos.

Frecuencia: Por frecuencia se entiende el número de elementos comprendidos en una determinada clase.

Rango: Por rango se entiende la dimensión del intervalo existente entre el máximo y el mínimo de los valores⁶⁷.

En el eje de las abscisas de un histograma se representa la variable. En el eje de las ordenadas se representan las densidades de frecuencia. Las densidades de frecuencia son el cociente entre un tipo de frecuencia y la amplitud del intervalo que tengamos.

Figura 103. Ejemplo de Histograma



⁶⁶ Guarín Salazar Norberto, Estadística Aplicada, Universidad Nacional de Colombia, 2002. Pag: 39

⁶⁷ Galgano Alberto, Las 7 herramientas de la calidad total, Coopers & Lybrand Galgano, consultores en calidad total, 2003. Pag: 84.

J.4 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL

Las Medidas de tendencia central son indicadores estadísticos que muestran hacia qué valor (o valores) se agrupan los datos.

Las principales medidas de tendencia central son:

- Media Aritmética.
- Mediana.
- Moda.

J.4.1 Media aritmética

La media aritmética es el valor resultante que se obtiene al dividir la sumatoria de un conjunto de valores observados sobre el número total de observaciones.

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_1^n x_i}{n} \quad (37)$$

\bar{X} : Media aritmética de la variable X

x_i : valores de la variable X

n : número de observaciones

J.4.2 Media aritmética Ponderada

La Media Aritmética se calcula con base a la magnitud de los datos, y se le otorga igual importancia a cada uno de ellos. Sin embargo en muchas ocasiones la magnitud del dato está ponderada con un determinado peso que lo afecta relativamente.

La media aritmética ponderada tiene en cuenta la importancia relativa de cada uno de los datos, para lo cual la definimos con la siguiente expresión:

$$\overline{X}_w = \frac{\sum_1^n x_i w_i}{\sum_1^n w_i} \quad (38)$$

Dónde:

\overline{X}_w : Media aritmética ponderada

x_i : Valor de la variable X

w_i : ponderación del item x_i

J.4.3 Mediana

Valor que divide una serie de datos en dos partes iguales. La cantidad de datos que queda por debajo y por arriba de la mediana son iguales. (Esta no se basa en la magnitud de los datos)

➤ La Mediana Cuando los datos no están Agrupados en Intervalos.

Partiendo de la información recogida, ordenamos los datos descendente o ascendente:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, \dots, x_i, \dots, \dots, x_n$$

$$\text{Mediana} = M_e = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}, \text{ si } n \text{ es impar} \quad (39)$$

$$\text{Mediana} = M_e = \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2}, \text{ si } n \text{ es par} \quad (40)$$

➤ La Mediana Cuando la Información se Encuentra Agrupada en Intervalos

Si la información se encuentra agrupada en intervalos iguales entonces la mediana se calcula según la siguiente expresión.

$$M_e = LI + \frac{\frac{n}{2} - f_{a(i-1)}}{f_i} A \quad (41)$$

M_e : Mediana

LI: Límite inferior del intervalo donde se encuentra la mediana (intervalo mediano, el cual se determina observando en que clase se encuentra la posición $n/2$).

n: Número de observaciones

$f_{a(i-1)}$: Frecuencia acumulada anterior al intervalo mediano

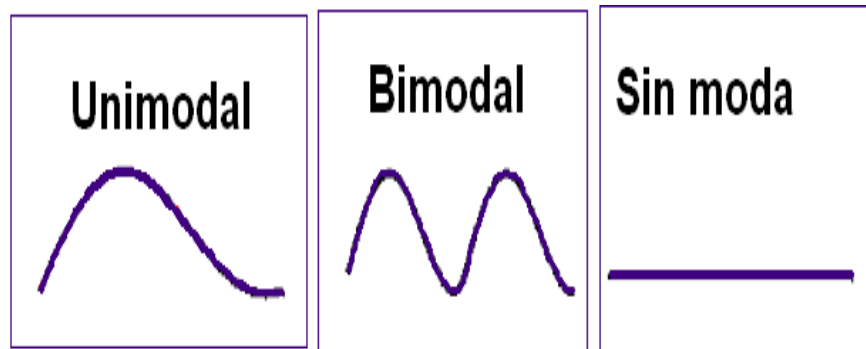
f_i : Frecuencia del intervalo mediano

A: Amplitud del intervalo

J.4.4 Moda

La Moda indica el valor que más se repite, o la clase que posee mayor frecuencia. En la figura 104 se observan algunos tipos modales. Una información puede poseer una moda y se llama unimodal, dos modas y se llama bimodal, o varias modas y llamarse multimodal. Sin embargo puede ocurrir que la información no posea moda.

Figura 104. Tipos de moda



➤ **La Moda Cuando los datos no están Agrupados en Intervalos**

Se busca el valor que más veces se repite (el de mayor frecuencia), si se hallan dos valores con la mayor frecuencia decimos que se trata de una distribución bimodal, y si aparecen más de dos valores con la mayor frecuencia decimos que es multimodal.

➤ **Cálculo de la Moda Cuando la información está Agrupada en Intervalos**

Cuando la moda se encuentra agrupada en intervalos de igual tamaño la moda se calcula con la siguiente expresión. En la tabla 74 se detallan la clase modal, pre-modal y post-modal para el ejemplo 2

$$M_o = LI + \frac{f_m - f_{(m-1)}}{2f_m - f_{(m-1)} - f_{(m+1)}} A \quad (42)$$

Donde:

M_o : Moda

LI: Limite inferior del intervalo

f_m : Frecuencia de la clase modal

$f_{(m-1)}$: Frecuencia de la clase premodal

$f_{(m+1)}$: Frecuencia de la clase posmodal

A: Amplitud de los intervalos

Tabla 74. Construcción de los intervalos para el tiempo de no disponibilidad de las 100 máquinas (del ejemplo 2.)

Intervalos minutos	Marca de clase X	f _i	
100-200	150	4	
200-300	250	10	
300-400	350	21	Clase Pre-modal
400-500	450	33	Clase Modal
500-600	550	18	Clase Pos-modal
600-700	650	9	
700-800	750	5	

$$M_0 = LI + \frac{f_m - f_{(m-1)}}{2f_m - f_{(m-1)} - f_{(m+1)}} * A = 400 + \frac{33 - 21}{(2 * (33)) - 21 - 18} = 444,44 \text{ min.}$$

J.5 MEDIDAS DE DISPERSIÓN

La dispersión de una distribución es la mayor o menor separación de sus datos respecto de una de las características de tendencia central, pretendiendo medir la representatividad de dicha característica.

Para medir el grado de dispersión de una variable, se utilizan principalmente los siguientes indicadores:

- Rango o Recorrido
- Desviación media

- Varianza y desviación típica o estándar
- Coeficiente de variabilidad.

J.5.1 Rango o recorrido

El Rango (R) es la diferencia entre el valor más alto (X_{max}) y el valor más bajo (X_{min}) de una variable. (El rango solo considera los dos valores de una colección de datos).

$$R = X_{max} - X_{min} \quad (43)$$

Un valor pequeño del Rango indica poca dispersión, puesto que la variable toma valores en un intervalo pequeño. Sin embargo, un valor grande puede indicar mucha dispersión o la existencia de valores extremos.

J.5.2 Desviación media

La desviación media, mide la distancia absoluta promedio entre cada uno de los datos, y el parámetro que caracteriza la información. Usualmente se considera la desviación media con respecto a la media aritmética⁶⁸:

$$DM = \frac{\sum_1^m |x_i - \bar{X}| f_i}{n} \quad (44)$$

Donde:

DM: Desviación media

x_i : Diferentes valores de la variable X

f_i : Número de veces que se repite la observación x_i

\bar{X} : Media aritmética de la información

n: Tamaño de la muestra

m: Número de agrupamientos o intervalos

⁶⁸ GUARÍN SALAZAR Norberto, Estadística Aplicada, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
Pag: 37

Ejemplo 3

En la fábrica SIAF con el objetivo de tener un control sobre el tiempo de no disponibilidad de 50 máquinas y fundamentos cuantitativos para dirigir las acciones, tácticas y estrategias de mantenimiento al grupo de máquinas con los mayores tiempos de no disponibilidad. Se desea hacer un estudio del tiempo en el que las máquinas no están disponibles ver tabla 75. A cada máquina se le tomo el tiempo de no disponibilidad durante 12 meses, La media aritmética calculada de los 50 datos es 54.1 horas. Y se utilizara como medida de tendencia central para calcular la desviación media de los datos y el error estándar que se cometería al tomar la media como el valor que representa todos los datos.

Tabla 75. Tiempo de no disponibilidad para el cálculo de la desviación media

Tiempo de no disponibilidad (horas)	f_i	$ x_i - \bar{X} $	$ x_i - \bar{X} * f_i$
50	1	50-54.1=-4.1	4.1
51	3	51-54.1=-3.1	9.3
52	5	52-54.1=-2.1	10.5
53	9	53-54.1=-0.1	0.9
54	12	54-54.1=-0.1	1.2
55	10	55-54.1=0.9	9
56	5	56-54.1=1.9	9.5
57	3	57-54.1=2.9	8.7
58	2	58-54.1=3.9	7.8
SUMA	50		70

$$DM = \frac{\sum_1^m |x_i - \bar{X}| * f_i}{n} = \frac{70}{50} = 1.4 \text{ horas}$$

1.4 horas sería el error promedio que se cometería al tomar 54.1 horas de no disponibilidad como el tiempo de no disponibilidad de las 50 máquinas.

J.5.3 Varianza Desviación típica

Dado que la media es en la mayor parte de los casos un buen parámetro de posición, parece lógico tomar como medida de dispersión algún parámetro relacionado con la magnitud de las desviaciones de los datos observados respecto a su media.

La medida de dispersión más utilizada en Estadística es la denominada varianza o, alternativamente, su raíz cuadrada a la que se denomina desviación típica⁶⁹.

Numéricamente definimos la varianza, como desviación cuadrática media de los datos con respecto a la media aritmética:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{X})^2 f_i}{n} \quad (45)$$

S^2 : Varianza

x_i : Valor de la variable X

\bar{X} : Media aritmética de la información

f_i : Frecuencia absoluta de la información x_i

n: Tamaño de la muestra

m: Número de agrupamientos o intervalos

A continuación en la tabla 76 se calcula la varianza para **Ejemplo 3**:

⁶⁹ Romero Villa Franca Rafael, Zúñica Ramajo Luisa Rosa, Métodos Estadísticos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Valencia, 2005. Pag: 15.

Tabla 76 Cálculo de varianza del ejemplo 3

Horas X_i	f_i	$x_i f_i$	$(x_i - \bar{X})$	$(x_i - \bar{X})^2$	$(x_i - \bar{X})^2 f_i$
50	1	50	50-54.1=-4.1	16.81	16.81
51	3	153	51-54.1=-3.1	9.61	28.83
52	5	260	52-54.1=-2.1	4.41	22.05
53	9	477	53-54.1=-0.1	1.21	10.89
54	12	648	54-54.1=-0.1	0.01	0.12
55	10	550	55-54.1=0.9	0.81	8.10
56	5	280	56-54.1=1.9	3.61	10.05
57	3	171	57-54.1=2.9	8.41	25.23
58	2	116	58-54.1=3.9	15.21	30.42
SUMA	50				160.50

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{X})^2 f_i}{n} = \frac{160.5}{50} = 3.21$$

Nota: La varianza de la suma de variables aleatorias no es en general igual a la suma de sus varianzas, sin embargo, cuando en una población las variables aleatorias x_i son independientes, la varianza de su suma es igual a la suma de sus varianzas. En el caso de que las variables no fuesen independientes la varianza se calcularía como se muestra a continuación⁷⁰:

$$\text{Varianza: } s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (46)$$

J.5.4 Desviación típica

La desviación típica o estándar se define como la raíz cuadrada de la varianza:

⁷⁰ ROMERO VILLA Franca Rafael, ZÚNICA RAMAJO Luisa Rosa, Métodos Estadísticos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Valencia, 2005. Capitulo 5.

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{X})^2 f_i}{n}} \rightarrow S = \sqrt{3.21} = 1.791$$

El error estándar (**del Ejemplo 3**) que se comete al tomar 54.1 horas como el tiempo de no disponibilidad de las 50 máquinas es 1.797 horas/6 meses.

ANEXO K

K. PLANILLA DE INSPECCIÓN

La planilla de inspección es una herramienta utilizada en mantenimiento para observar la tendencia de una variable asociada a la falla de un proceso o equipo con respecto al tiempo, visualizando rápidamente el efecto más sobresaliente, de mayor valor o más frecuente para una muestra dada, de esta manera controlar la desviación de los estándares operacionales que dan origen a una falla realizando la respectiva gestión de mantenimiento.

La Planilla de Inspección es un formato para recoger la información relativa a un tema y representarla en forma organizada, de modo que se pueda comprender con claridad el problema o situación que se estudia y se facilita su resolución o representación gráfica posterior. Ésta también asegura que no se pase por alto ninguno de los puntos a verificar durante la inspección y permite encontrar rápidamente las causas asignables cuando el proceso se aparta de su funcionamiento habitual observando su variación.

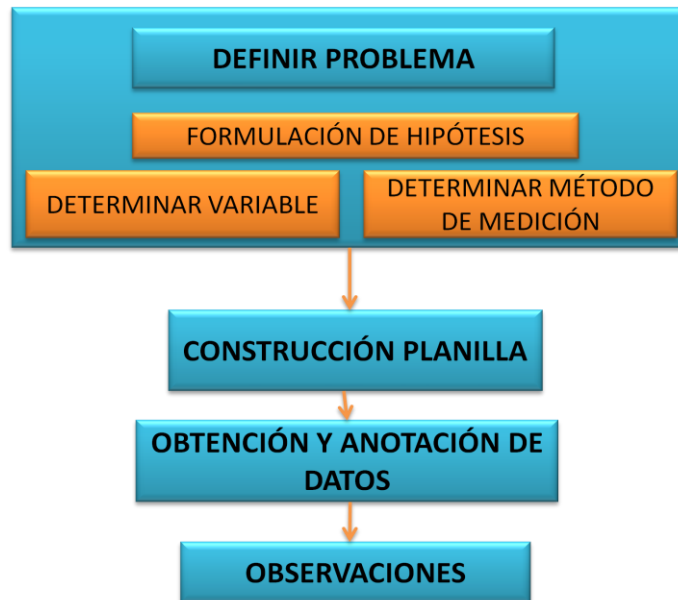
Al marcar los valores mínimos y máximos especificados para la variable de falla (límite inferior especificado “LIE” y límite superior especificado “LSE”) se observa que porcentaje de datos cumple con las especificaciones establecidas.

La planilla de inspección observa la tendencia de la variable a medir a medida que se va anotando los datos, por lo tanto no es necesario esperar a recoger todos los datos para disponer de información estadística

K.1 PROCEDIMIENTO

El procedimiento para elaborar una planilla de inspección se ve en la figura 105, empieza por definir el problema, se proceder a construir la planilla, se realiza la obtención y anotación de datos y por último se realizan observaciones.

Figura 105. Elaboración de la planilla



K.2 DEFINIR EL PROBLEMA

Definir el problema consiste en identificar el contexto operacional del proceso o equipo, formular las hipótesis asignables a la falla, determinar las variables implicadas en las hipótesis, método y herramientas para su medición. Ver problema de aplicación.

Formulación de la hipótesis

Es una proposición para establecer relaciones de una falla con respecto al cambio de una variable para un determinado problema buscando una posible solución a éste.

Determinación de las variables

De acuerdo a la hipótesis planteada se determinan cuales son las variables relevantes para la prueba de ésta.

Método y herramientas para su medición

Seleccionar la herramienta adecuada para la medición indicando su resolución y el método a llevar a cabo para realizar la medición.

K.3 CONSTRUCCIÓN DE LA PLANILLA

La planilla de inspección se compone de un encabezado, escala de valores a medir y zona de anotación de los datos, como se muestra en las figura 106.

En el encabezado se registran los siguientes datos Fecha, Número de inventario del equipo, Sección, Proceso, Nombre del Producto o equipo, Inspector y Operario. Esto es importante porque admitirá identificar el trabajo de medida en el futuro.

En las escalas de valores se anotan los posibles valores que tomarán las variables, con intervalos adecuados de acuerdo a la resolución del equipo de medición.

En la zona de anotación de datos se registran los datos de la variable mediante símbolos sencillos como se muestra en las figuras 107

La zona de observaciones es de utilidad debido a que permite registrar la información relevante respecto a la tendencia de los datos.

En la planilla de inspección se indican los valores mínimos y máximos especificados para la variable de falla (límite inferior especificado “LIE” y límite superior especificado “LSE”) para observar que porcentaje de datos cumple con las especificaciones establecidas al definir el problema.

K.4 OBTENCIÓN Y ANOTACIÓN DE DATOS

Para elaborar una planilla de inspección, primero se debe listar los datos de la variable de falla que se requiere verificar del proceso, equipo o producto.

Consiste en recoger los datos de interés asociados a la falla de forma correcta o asegurarse de la adecuación de los existentes.

Los datos deben ser:

- Objetivos: Establecidos en hechos, no en supuestos u opiniones.

- Exactos: Asegurar que la variabilidad en el proceso de recogida de datos (variabilidad de la medida) no desvirtúa la variabilidad del proceso en estudio.

Las anotaciones en la planilla de inspección no tienen un estándar establecido por el contrario se marca con un símbolo sencillo cualquiera, se sugiere hacer marcas de algún tipo (*, +, -, etc.) en la columna correspondiente al resultado que obtuvimos para cada variable, como se observa en las figuras 106 y 108

Para cada columna se cuenta el total de resultados obtenidos el cual se anota en la parte inferior de la planilla de inspección. Ésta es la frecuencia de cada resultado (la suma de todas la frecuencias debe ser igual al número de productos estudiados), que indica cuáles mediciones se repitieron más veces.

K.5 OBSERVACIONES

La información que brinda la Planilla de Inspección es práctica y de fácil entendimiento, algunos conceptos importantes son:

- ✓ Al mismo tiempo que se miden y registran los resultados, va mostrando cual es la tendencia central de las mediciones
- ✓ Se observa la variabilidad o dispersión de los datos
- ✓ Deducir e investigar la distribución de los datos
- ✓ Muestra información acerca de los datos de manera grafica
- ✓ Qué porcentaje de datos de la variable a analizar cumple con la especificación previa establecida al definir el problema

Se presenta un ejemplo para mostrar la utilidad de la planilla de inspección en la gestión de mantenimiento en especial para el análisis de fallas.

Ejemplo

Medir el diámetro de varillas día a día (se tomarán 50 varillas al azar) para determinar cuando estas están por fuera de la tolerancia especificada (30 +/- 0.1 mm), el diámetro de las varillas está asociado a falla en la boquilla de extrusión,

por lo tanto indica que si las varillas no cumplen la tolerancia especificada se debe revisar la boquilla de extrusión. Se utiliza el pie de rey como herramienta de medición del diámetro de las varillas el cual cuenta con una resolución 0.05 mm.

Hipótesis

La desviación del diámetro de las varillas respecto a la tolerancia específica indica falla en la boquilla de extrusión. Con alarma temprana del 6%

Determinación de las variables

Diámetro de varilla (mm), frecuencia de ocurrencia, % de defectos

Herramientas de medición

Pie de rey con resolución de 0.05 mm

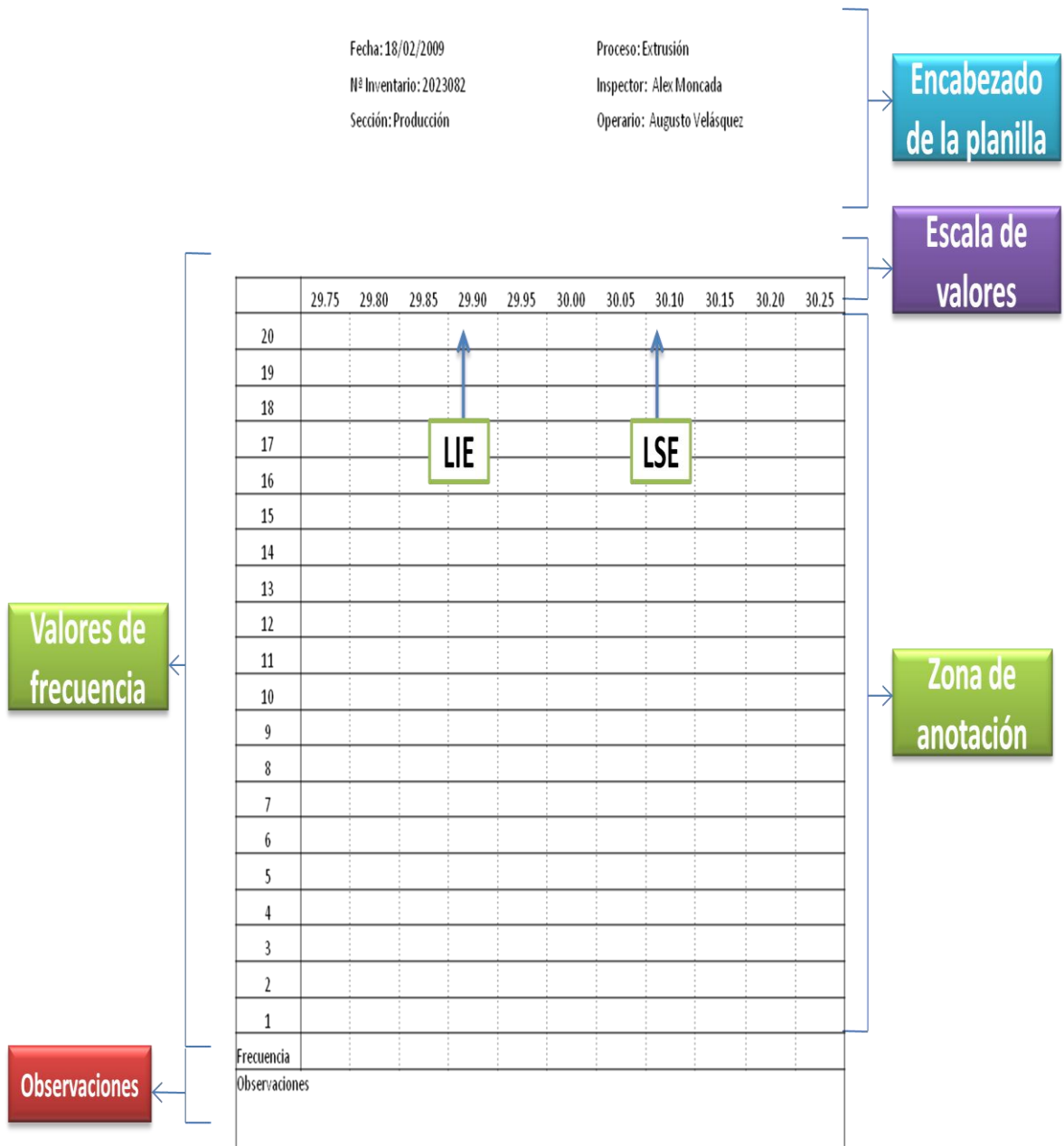
Construcción planilla

La construcción de la planilla de inspección representa en el eje horizontal el rango de valores esperados para los diámetros de las varillas extruidas indicando cuáles son sus límites o la tolerancia específica para el problema (LIE-LSE) como se muestra en la figura 106, el eje vertical representa una escala de valores para apreciar la frecuencia de las varillas en las casillas de cada intervalo de diámetro.

LIE: Limite inferior especificado (29.90 mm)

LSE: Limite superior especificado (30.10 mm)

Figura 106. Construcción Planilla de Inspección



Obtención y anotación de datos

Para el ejemplo de las varillas provenientes del proceso de extrusión, se obtienen los siguientes diámetros (datos en mm) de las 50 varillas, como se muestra en la tabla 77:

Tabla 77. Diámetro de las varilla

29.95	30.10	30.05	29.95	29.90	30.05	29.95	30.05	29.95	30.05
29.95	30.00	30.05	30.10	30.00	29.90	30.00	30.00	30.00	29.95
30.05	29.95	30.05	29.95	30.10	29.85	30.05	29.90	30.10	29.85
29.95	30.00	29.95	30.00	30.05	30.15	30.00	30.05	30.00	30.15
29.90	30.05	29.95	30.00	30.00	29.90	30.05	30.05	29.90	30.00

Para cada varilla medida e inspeccionada se hace una anotación con el símbolo acordado en la casilla correspondiente al diámetro de cada varilla analizada como se muestra en la figura 3, al final de las anotaciones se observará la tendencia y la frecuencia de cada intervalo de diámetro para observar que porcentaje de varillas están por fuera de la tolerancia especificada.

Para cada columna se cuenta el total de resultados obtenidos los cuales se anotan en la parte inferior de la planilla, esta es la frecuencia de cada resultado (la suma de todas la frecuencias debe ser igual al número de productos estudiados), que indica cuáles mediciones se repitieron más veces. Después de realizar las mediciones y anotaciones, la planilla se verá como sigue:

Figura 107 Anotación Planilla de Inspección (Tendencia Central)

**TENDENCIA
CENTRAL**

Fecha: 18/02/2009
Nº Inventario: 2023082
Sección: Producción

Proceso: Extrusión
Inspector: Alex Moncada
Operario: Augusto Velásquez



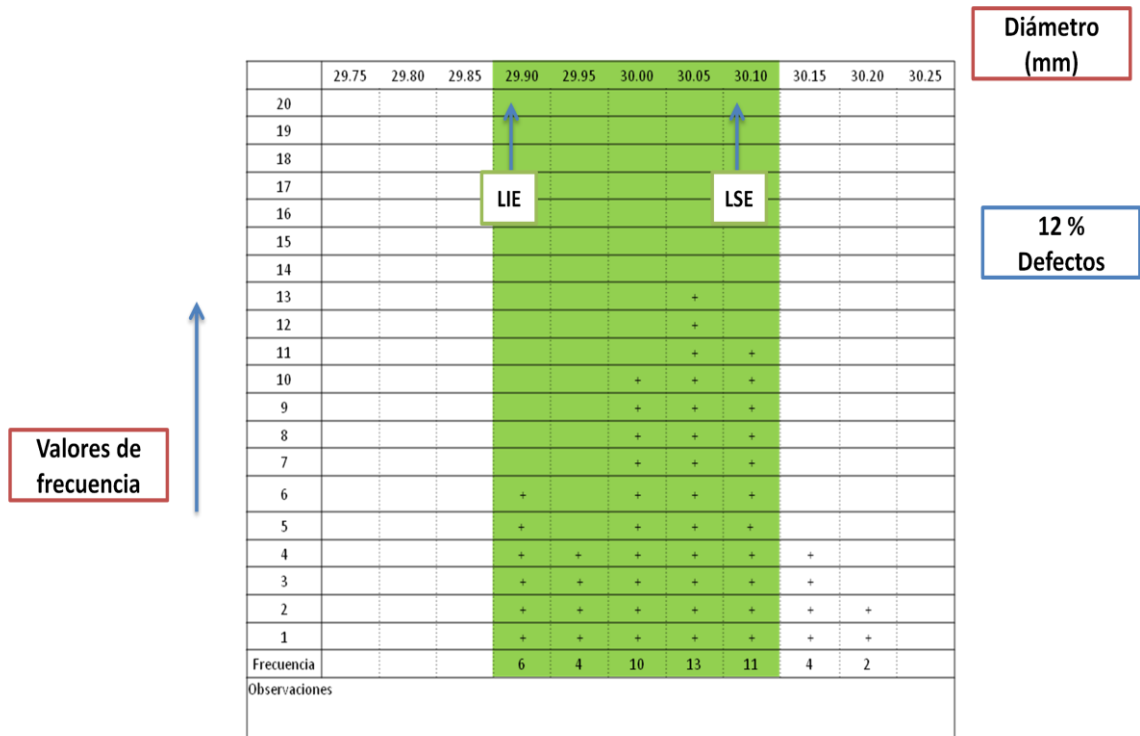
En la siguiente planilla de inspección se observa cuando los diámetros de las varillas están en gran medida por fuera de la especificación, indicando que se debe revisar la boquilla de extrusión.

Figura 108. Anotación Planilla de Inspección (Tendencia Dispersa)

**TENDENCIA
DISPERSA**

Fecha: 18/02/2009
Nº Inventario: 2023082
Sección: Producción

Proceso: Extrusión
Inspector: Alex Moncada
Operario: Augusto Velásquez



Observaciones

- Al contar con la tendencia de los diámetros de las varilla en la planilla de inspección se observa qué porcentaje esta por fuera de la tolerancia especificada con esto se evidencia una posible falla en la boquilla de extrusión.
- Se determina el momento adecuado de revisar o si es el caso cambiar la boquilla del proceso de extrusión, evitando de manera prematura el daño total de la boquilla o paro total del proceso sin previo aviso.
- La planilla de inspección presenta una tendencia central cuando los diámetros de la varillas están en la tolerancia especificada es decir el proceso no presenta problemas, cuando la tendencia de los datos no está dentro de la tolerancia especificada es el momento de revisar la boquilla de extrusión.

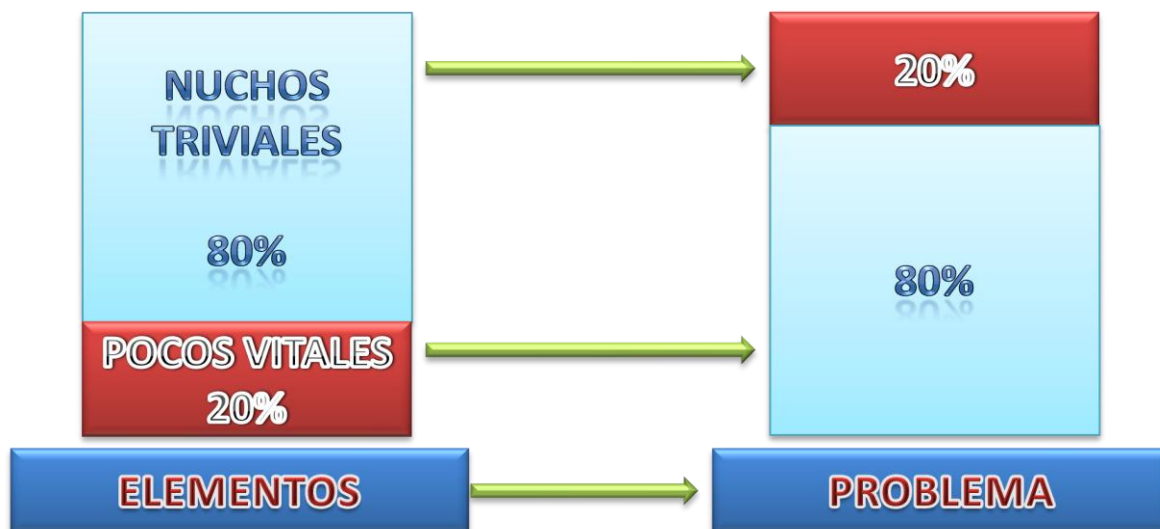
ANEXO L

L. ANÁLISIS DE PARETO

El análisis de Pareto, comúnmente llamado búsqueda de significancia o análisis ABC, es una herramienta avanzada genérica de mantenimiento para identificar y jerarquizar datos, con el fin de mostrar que elementos componen el tema que se está analizando. Éste permite, mediante una representación gráfica o tabular, conocida como diagrama de Pareto, identificar en una forma decreciente los aspectos que se presentan con mayor frecuencia o que tienen una ponderación o incidencia mayor.

Aplicando el análisis de Pareto se pueden detectar los problemas que tienen más relevancia, mediante la aplicación del principio de Pareto (pocos vitales, muchos triviales), conocido también como la regla 80/20 que dice que hay muchos problemas sin importancia frente a sólo unos graves, es decir, que el resultado de un proceso dependerá esencialmente de un número pequeño de los factores que intervienen en el mismo. Si se logra determinar cuáles son estos factores vitales se puede concentrar recursos en el estudio de los mismos con lo que se resuelve la mayoría del problema, de donde se deriva la famosa frase de Pareto “aplicando la atención a los pocos asuntos vitales, se consigue la máxima eficacia y rendimiento de los recursos dedicados”. Por lo tanto, el Análisis de Pareto es una técnica que separa los “pocos vitales” de los “muchos triviales”. En la figura 109 se esquematiza esta regla.

Figura 109. Regla 80/20

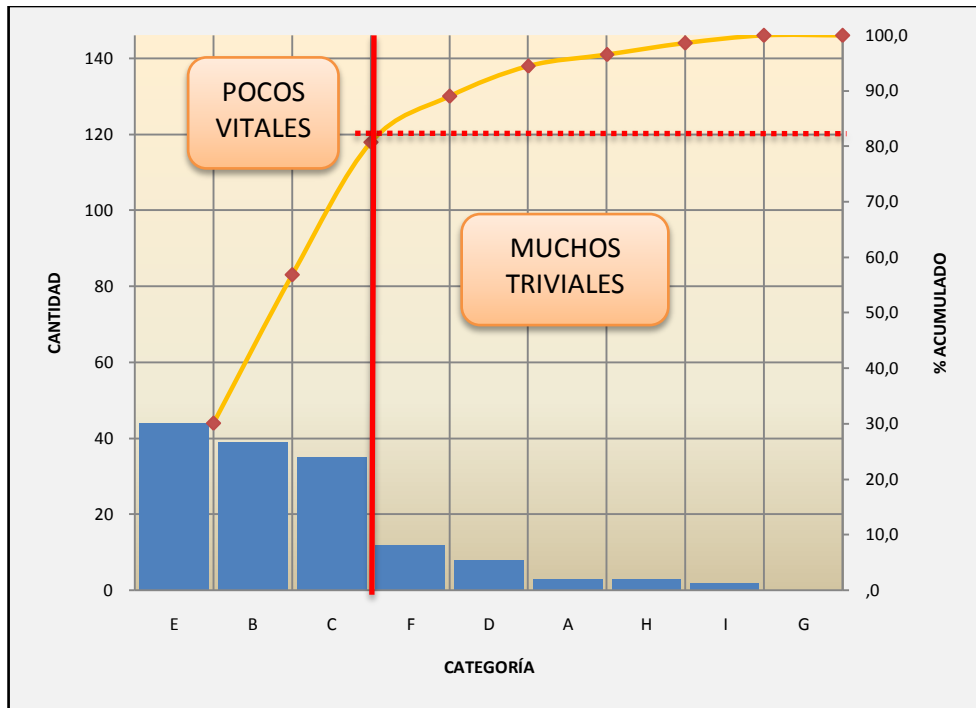


L.1 DIAGRAMA DE PARETO

El Diagrama de Pareto es la gráfica donde se organizan las diversas clasificaciones de datos, que representan los elementos o factores constituyentes de un problema o tema analizado, por orden descendente de izquierda a derecha por medio de barras sencillas o por una línea continua que une los puntos después de haber reunido los datos para calificar las categorías. De modo que se pueda asignar un orden de prioridades. La figura 110. Muestra el diagrama de Pareto en esencia.

EL diagrama permite identificar visualmente en una sola revisión las minorías de características vitales a las que es importante prestar mayor atención y de esta manera priorizar recursos para llevar a cabo una acción correctiva sin malgastar esfuerzos y tiempo. Con frecuencia, un aspecto puede representar el 80% del problema global. A veces hasta 2 ó 3 aspectos serán responsables por el 80% de los problemas.

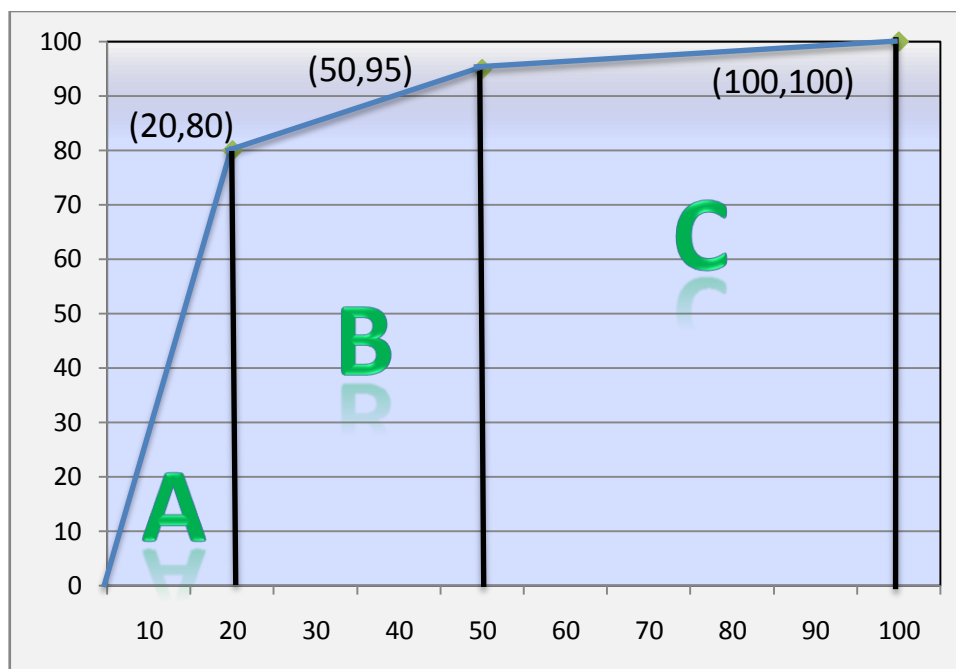
Figura 110. Diagrama de Pareto



L.2 ANÁLISIS ABC

Consiste en identificar las tres zonas que se pueden presentar en un análisis de búsqueda de significancia. La figura 111. Muestra estas tres zonas. La zona A, delimitada por el punto (20, 80), representa la zona de mayor impacto, el 20% de los elementos contribuyentes tienen un impacto en el 80% del problema. La zona B, comprendida entre la zona A y el punto (50, 95), a esta zona el Dr. Juran la llamó zona dudosa, 30% de los elementos contribuyentes tienen un impacto del 15% en problema global. La zona C es el área restante y representa los muchos triviales; es decir el 50% restante de los elementos contribuyentes que sólo tiene impacto en un 5% en el problema global.

Figura 111. Análisis ABC



L.3 ANTECEDENTES

Wilfredo Pareto, economista italiano (1848-1923), enunció el principio de la distribución de la riqueza diciendo que el 80% de la riqueza está en manos del 20% de la población. Con esto estableció la llamada "Ley de Pareto" según la cual la desigualdad económica es inevitable en cualquier sociedad.

Posteriormente el Dr. Joseph Juran aplicó este concepto a la calidad y le dio el nombre de diagrama de Pareto en honor al economista italiano, obteniéndose lo que hoy se conoce como la regla 80/20. Según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, podemos decir que el 20% de las causas resuelven el 80% del problema y el 80% de las causas solo resuelven el 20% del problema. En la actualidad el principio de Pareto es aplicable a múltiples actividades. Siempre pone de manifiesto aquellos factores que tienen más incidencia en el problema global. Por ejemplo: el 80% de las ventas se realizan al 20% de los clientes, el 80% de los costos de mantenimiento correctivo se debe al 20% del

total de las reparaciones, el 80% del valor del inventario está representado por el 20% de artículos, el 20% de los procesos son los causantes del 80% de los desperdicios o de los costos de reproceso, el 20% de productos representan el 80% de las ganancias obtenidas, etc.

L.4 OBJETIVOS DEL ANÁLISIS DE PARETO

En general el análisis de Pareto es una de las herramientas estadísticas de mantenimiento más útiles y sus aplicaciones en el área de mantenimiento sólo están limitadas por el ingenio del analista. Realizar el análisis de Pareto tiene como objetivos:

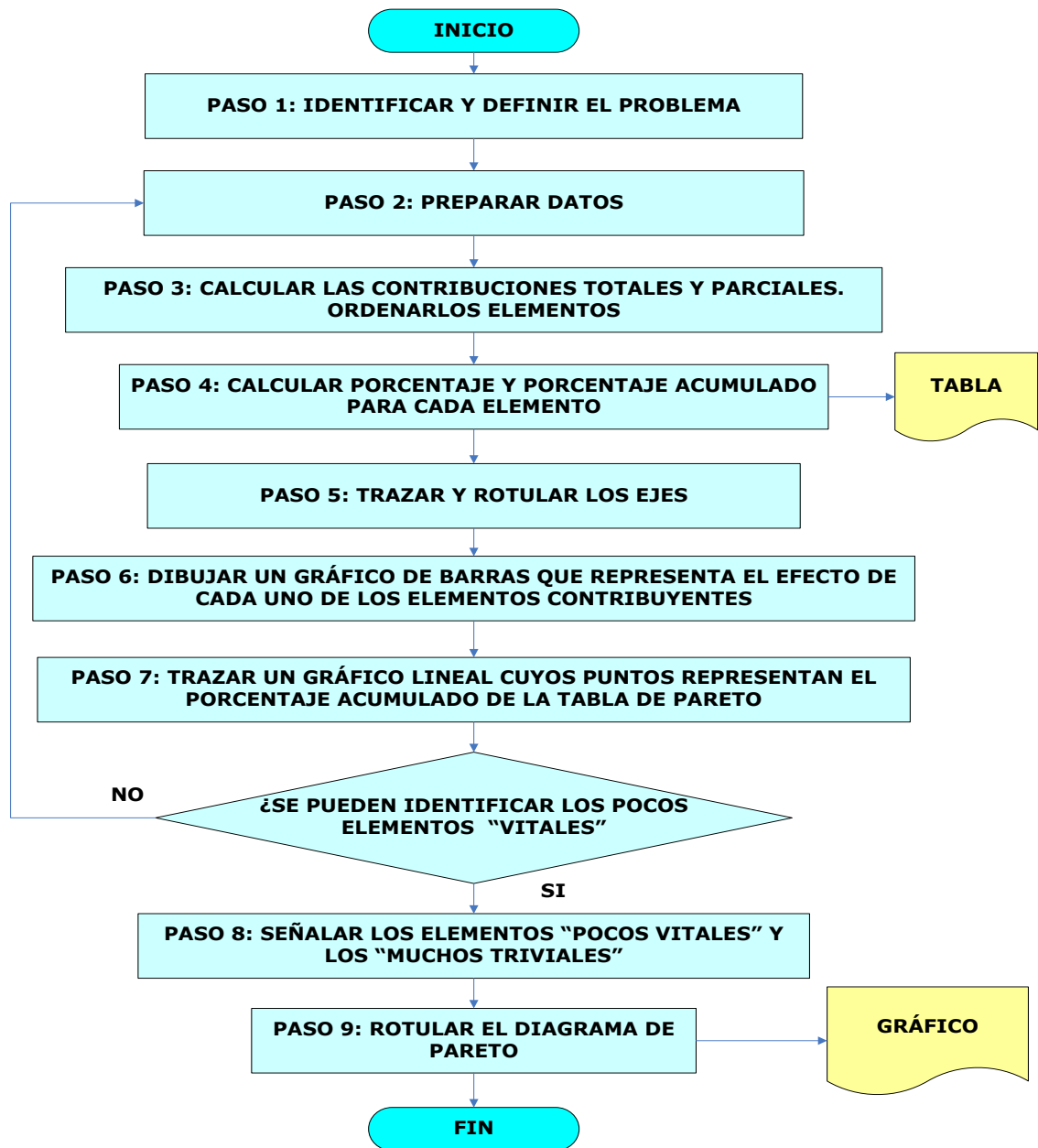
- Identificar oportunidades para llevar a cabo mejoras.
- Identificar un producto o servicio que requiera un análisis más exhaustivo.
- Identificar los sistemas, equipos o elementos que están causando la mayoría de problemas a mantenimiento y/o producción.
- Documentar de manera científica y sistemática los llamados de atención a un área o sector problemático.
- Analizar las diferentes agrupaciones de datos.
- Buscar las causas principales de los problemas y establecer la prioridad de las soluciones.
- Evaluar los resultados de los cambios efectuados a un proceso (antes y después).
- expresar los costos que significan cada tipo de falla y los ahorros logrados mediante el efecto correctivo llevado a cabo a través de determinadas acciones.

Es importante tener en cuenta que el análisis de Pareto se puede llevar a cabo siempre y cuando los factores o categorías de un problema se puedan cuantificar.

L.5 CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE PARETO

Para la construcción de un diagrama de Pareto o diagrama ABC, se debe seguir un el procedimiento adecuado. La figura 112. Muestra diagrama de flujo para la construcción de un diagrama de Pareto.

Figura 112. Diagrama de flujo para la construcción del diagrama de Pareto



L.5.1 Paso 1: Identificar y definir el sistema

Consiste en identificar y definir el sistema, equipo, asunto problemático, falla o característica a analizar, definir las categorías o elementos que lo componen y las unidades de medida. Para la construcción de un Diagrama de Pareto son necesarios:

- a. Un efecto cuantificado y medible sobre el que se quiere priorizar, éste puede ser: costos de reparación, tiempo de reparación, tiempo de paradas no programadas, número fallas, nivel de stock de inventario, etc.
- b. Una lista completa de elementos o factores que contribuyen a dicho efecto como pueden ser: modos de falla, pasos de un proceso, tipos de problemas, tipos de repuestos, ordenes de trabajo, productos, servicios, etc.

Es importante identificar todos los posibles elementos de contribución al efecto antes de empezar la recogida de datos. Esta condición evitará que, al final del análisis, la categoría "Varios" resulte ser una de las incluidas en los "Pocos Vitales". Las herramientas útiles para obtener esta lista son: la Tormenta de Ideas, el Diagrama de Flujo, el Diagrama de Causa-Efecto y sus similares, o los propios datos.

- c. La magnitud de la contribución de cada elemento o factor al efecto total.

La tabla 78. Muestra el paso 1: identificación y definición del problema de acuerdo al ejemplo que se plantea.

Ejemplo: Se quiere estudiar qué modos de falla se presentan con mayor frecuencia en la planta 1A, se recurre al sistema de reporte de fallas y acciones y se identifican 10 modos de falla diferentes.

Tabla 78. Identificación y definición del problema

EFECTO CUANTIFICADO Y MEDIBLE		
Fallas en la planta 1ª		
Elementos contribuyentes		Frecuencia
A	Modo de falla 1	
B	Modo de falla 2	
C	Modo de falla 4	
D	Modo de falla 5	
E	Modo de falla 6	
F	Modo de falla 7	
G	Modo de falla 8	
H	Modo de falla 9	
I	Modo de falla 10	

L.5.2 Paso 2: Preparación de los datos

Como en todas las herramientas de análisis de datos, el primer paso consiste en recoger los datos correctos o asegurarse de que los existentes son de calidad. Es necesario:

- Definir el origen de los datos (históricos o retrospectivos, actuales o de nueva información, etc.)
- Decidir sobre el tamaño de la muestra (hasta que fecha incluir los datos históricos, cuántos datos actuales, etc.)
- Verificar los datos históricos y confrontar la exactitud de los datos actuales para pasar a registrar los datos medidos sobre las categorías en una hoja de registro adecuada.

Estos datos, bien existan o bien haya que recogerlos, deberán ser:

- **Objetivos:** basados en hechos, no en opiniones.
- **Consistentes:** debe utilizarse la misma medida para todos los elementos contribuyentes y los mismos supuestos y cálculos a lo largo del estudio, ya que el Análisis de Pareto es un análisis de comparación.
- **Representativos:** deben reflejar toda la variedad de hechos que se producen en la realidad.
- **Verosímiles:** evitar cálculos o suposiciones controvertidas, ya que buscamos un soporte para la toma de decisiones, si no se cree en los datos, no apoyarán las decisiones.

La tabla 79 Muestra la preparación de los datos del Análisis de Pareto para el ejemplo.

Tabla 79. Preparación de los datos

EFECTO CUANTIFICADO Y MEDIBLE		
Fallas en la planta 1ª		
Elementos contribuyentes		Frecuencia
A	Modo de falla 1	3
B	Modo de falla 2	39
C	Modo de falla 3	35
D	Modo de falla 4	8
E	Modo de falla 5	44
F	Modo de falla 6	12
G	Modo de falla 7	0
H	Modo de falla 8	3
I	Modo de falla 9	2

L.5.3 Paso 3: Calcular las contribuciones totales y parciales, y ordenar

Para cada elemento contribuyente sobre el efecto, anotar su magnitud. Ordenar dichos elementos de mayor a menor, según la magnitud de su contribución. Calcular la magnitud total del efecto como suma de las magnitudes parciales de cada uno de los elementos contribuyentes. La tabla 80 Muestra el cálculo de las contribuciones parciales y totales.

Tabla 80. Cálculo de las contribuciones parciales y totales

Elementos Contribuyentes		Frecuencia
E	Modo de falla 5	44
B	Modo de falla 2	39
C	Modo de falla 3	35
F	Modo de falla 6	12
D	Modo de falla 4	8
A	Modo de falla 1	3
H	Modo de falla 8	3
I	Modo de falla 9	2
G	Modo de falla 7	0
TOTAL		146

L.5.4 Paso 4: Calcular porcentajes y porcentajes acumulados para cada elemento

Calcular el porcentaje que cada categoría representa sobre el total, y el porcentaje acumulado.

El porcentaje de la contribución de cada elemento se calcula:

$$\%C = (\text{magnitud de la contribución} / \text{magnitud del efecto total}) \times 100 \quad (46)$$

El porcentaje acumulado para cada elemento de la lista ordenada se calcula por alguna de las dos formas siguientes:

- Por suma de contribuciones de cada uno de los elementos anteriores en la tabla, más el elemento en cuestión como magnitud de la contribución, y aplicando la fórmula anterior.
- Por suma de porcentajes de contribución de cada uno de los elementos anteriores más el porcentaje del elemento en cuestión. En este caso habrá que tener en cuenta el que estos porcentajes, en general, han sido redondeados.

Una vez completado este paso se tiene construida la Tabla de Pareto. La cual se puede ver en la tabla 81.

Tabla 81. Tabla de Pareto

Elementos Contribuyentes		Frecuencia	% C.	% C. Acum.
E	Modo de falla 5	44	30,14	30,14
B	Modo de falla 2	39	26,71	56,85
C	Modo de falla 3	35	23,97	80,82
F	Modo de falla 6	12	8,22	89,04
D	Modo de falla 4	8	5,48	94,52
A	Modo de falla 1	3	2,05	96,58
H	Modo de falla 8	3	2,05	98,63
I	Modo de falla 9	2	1,37	100,00
G	Modo de falla 7	0	0,00	100,00
TOTAL		146		

L.5.5 Paso 5: Trazar y rotular los ejes

El eje vertical izquierdo representa la magnitud del efecto estudiado. Debe empezar en 0 e ir hasta el valor del efecto total, se debe rotular con el efecto, la unidad de medida y la escala.

La escala debe ser consistente, es decir variar según intervalos constantes. Las escalas de gráficos que se compararán entre sí, deben ser idénticas, es recomendable prestar especial cuidado a las escalas automáticas de los gráficos por programas de computador.

El eje horizontal contiene los distintos elementos o factores que contribuyen al efecto, éste se debe dividir en tantas partes como factores existan y rotular su identificación de izquierda a derecha según el orden establecido en la Tabla de Pareto. En la figura 113. Se muestra este paso.

El eje vertical derecho representa la magnitud de los porcentajes acumulados del efecto estudiado. La escala de este eje va desde el 0 hasta el 100%. El cero coincidirá con el origen y el 100% debe estar alineado con el punto, del eje vertical izquierdo, que representa la magnitud total del efecto.

L.5.6 Paso 6: Dibujar un gráfico de barras

Dibujar un Gráfico de Barras que representa el efecto de cada uno de los elementos contribuyentes. La altura de cada barra es igual a la contribución de cada elemento tanto medida en magnitud por medio del eje vertical izquierdo, como en porcentaje por medio del eje vertical derecho. En la figura 114. Se muestra el dibujo del gráfico de barras.

Figura 113. Rotulación de los ejes

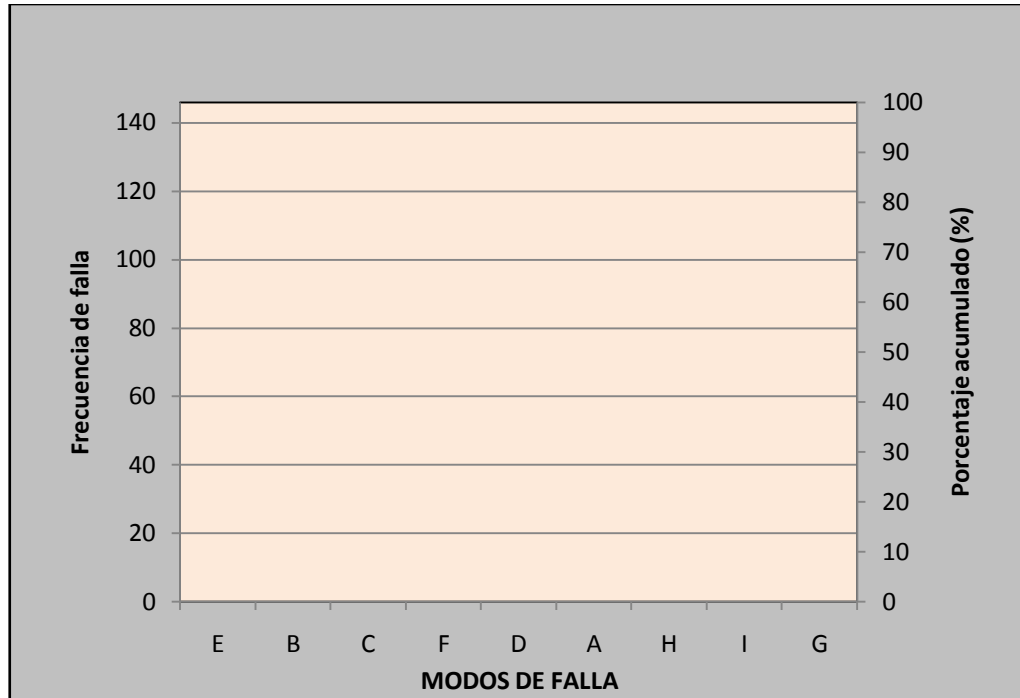
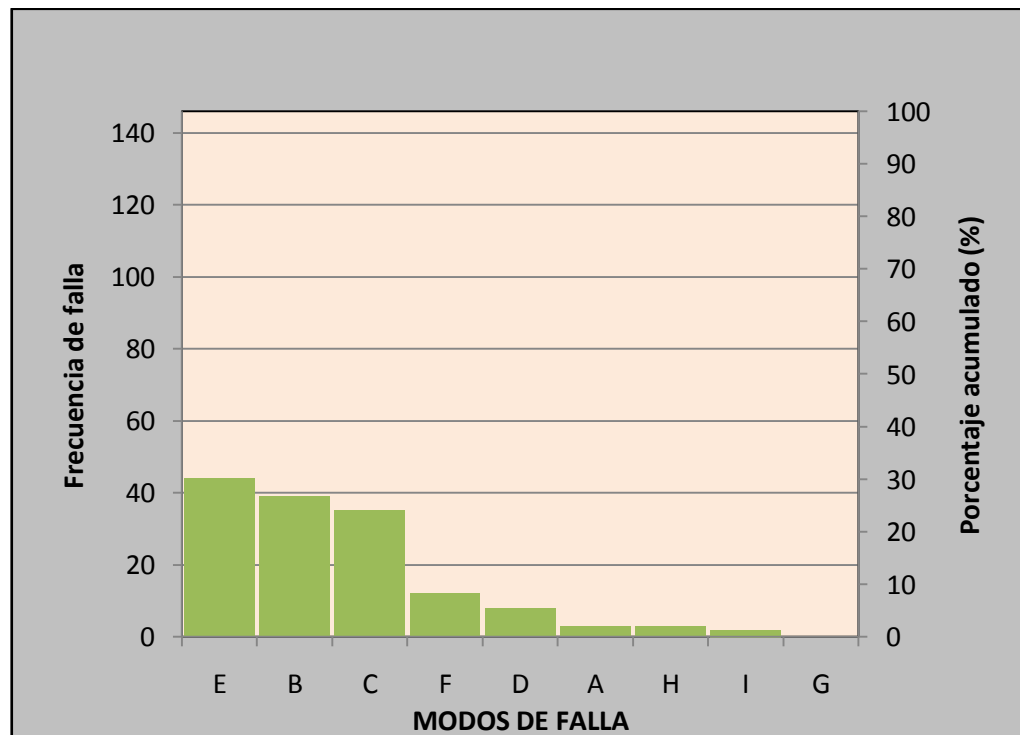


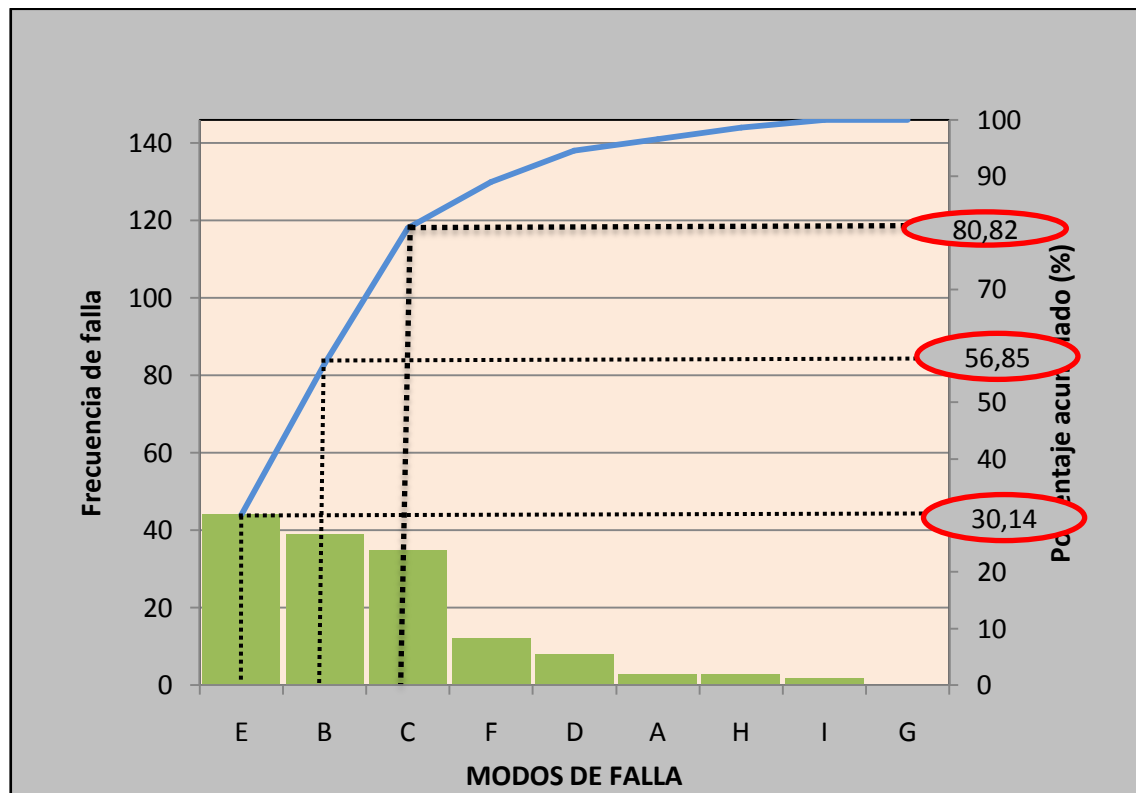
Figura 114. Gráfico de Barras



L.5.7 Paso 7: Trazar un gráfico lineal

Trazar un Gráfico Lineal cuyos puntos representan el porcentaje acumulado de la Tabla de Pareto, marcar los puntos del gráfico en la intersección de la prolongación del centro de cada barra con la magnitud del porcentaje acumulado correspondiente al elemento representado en dicha barra, por ejemplo, conectar los puntos con segmentos rectilíneos. En la figura 115. Se muestra este paso correspondiente al trazo del gráfico lineal.

Figura 115. Gráfico de línea



L.5.8 Paso 8: Señalar los elementos “pocos vitales” y los “muchos triviales”

Consiste en trazar una línea vertical que separe el Diagrama en dos partes y sirve para visualizar la frontera entre los "Pocos Vitales" y los "Muchos Triviales",

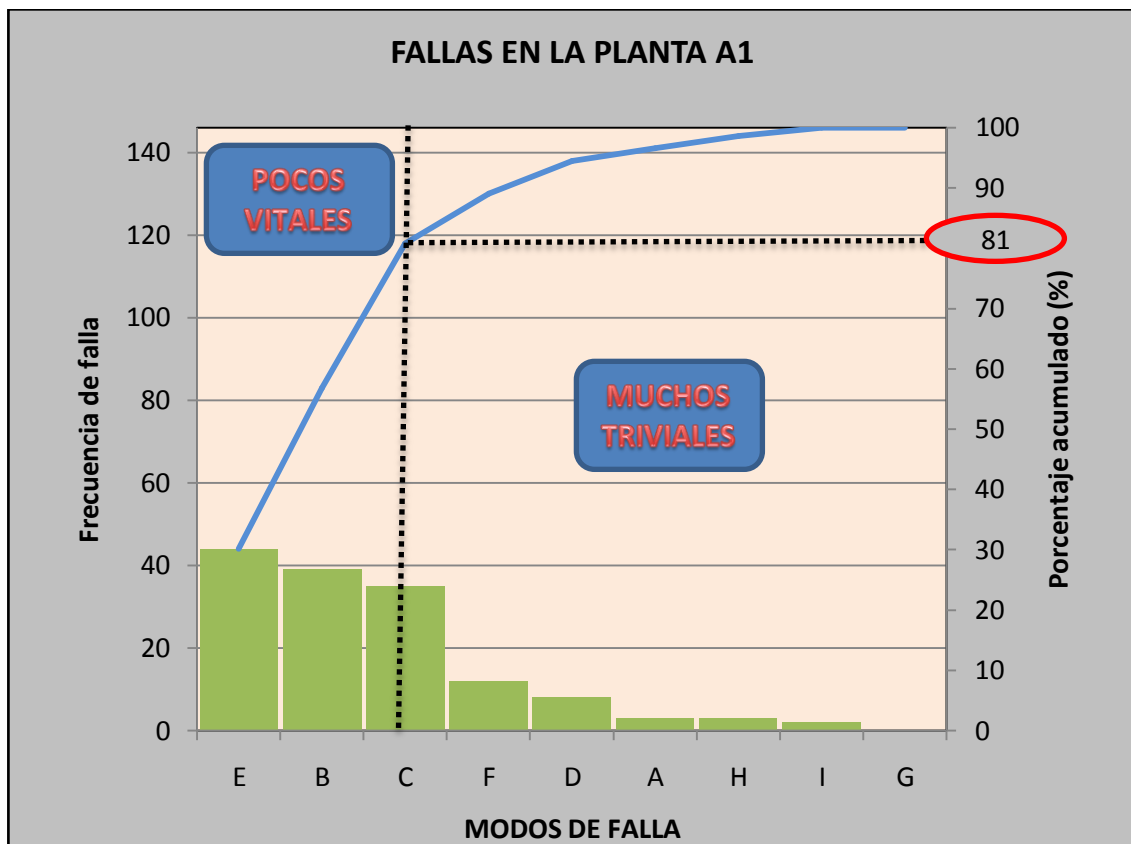
basándonos en el cambio de inclinación entre los segmentos lineales correspondientes a cada elemento, rotular las dos secciones del Diagrama.

Rotular el porcentaje acumulado del efecto correspondiente al último elemento incluido en la sección "Pocos Vitales".

L.5.9 Paso 9: Rotular el diagrama de Pareto

En este paso se le asigna un título al gráfico así como la fuente de los datos y la fecha de recolección. En la figura 116 se ve el diagrama de Pareto rotulado y terminado.

Figura 116. Diagrama de Pareto completo



L.6 ALGUNOS TIPS IMPORTANTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA

Algunas cuestiones que se deben tener presente a la hora de preparar el análisis de Pareto son los siguientes:

- El diagrama de Pareto no siempre identifica automáticamente las fallas más importantes, si no las que ocurren con mayor frecuencia. Es decir no es un análisis de criticidad, lo que significa que puede existir una categoría que se presente con alta ocurrencia pero su consecuencia no sea tan grave, como también puede que se presente una categoría con muy poca ocurrencia pero que tiene efectos catastróficos. Sin embargo esto se puede corregir de una de las dos formas siguientes:
 - Usar un modelo de ponderación para modificar los conteos de la frecuencia.
 - Acompañar el análisis de la gráfica de frecuencia de Pareto con una gráfica de costos o desenmascaramiento de Pareto.
- Registrar siempre el número total de de elementos, cantidades de dinero y las fechas o las horas en las que se recogieron los datos.
- En la medida de lo posible, expresar la medida de la categoría en términos monetarios en vez de usar números, cantidades, porcentaje de falla, etc. (esto para paliar el inconveniente que encabeza la presente lista).
- Cuando se decide el periodo para la recolección de datos, Pense en el objetivo de la presentación del diagrama. Este periodo no debe ser demasiado corto ni debe ser tan largo que incluya los resultados de varias acciones correctivas.
- Cuando se realice una acción correctiva, desarrollar los diagramas de Pareto antes y después con el objetivo de comparar los resultados.

- Desglosar los problemas mayores con más detalle y preparar diagramas de Pareto individuales para ellos.
- Si las fallas más frecuentes decrecen súbitamente, esto indica que o bien ha tenido éxito el esfuerzo cooperativo o que el proceso ha cambiado súbitamente aunque nada se haya hecho al respecto.

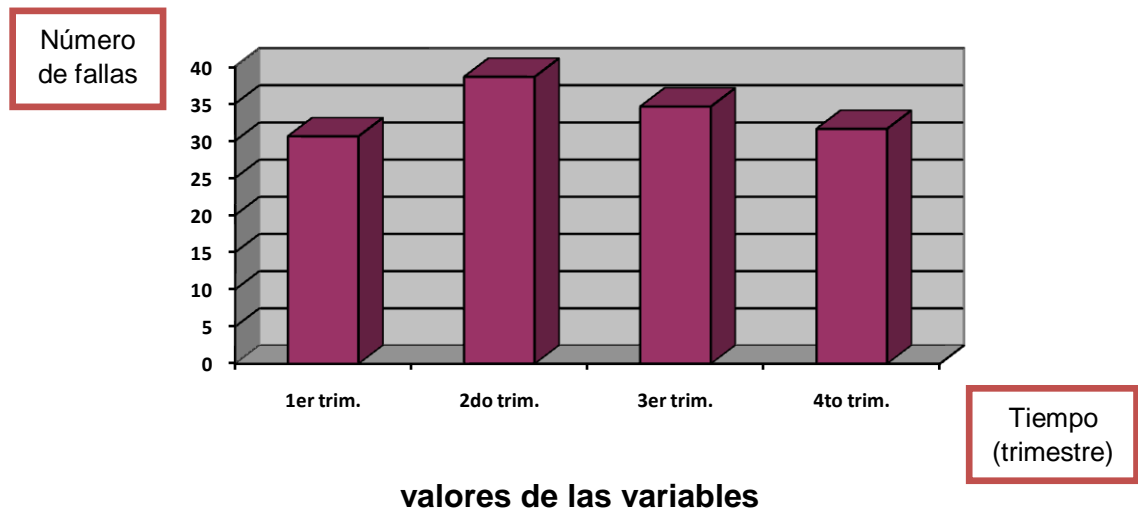
ANEXO M

M. HISTOGRAMA

Es una representación gráfica de una variable en forma de barras, en el que la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados, es decir muestra el número de veces que se repiten cada una de las variables como se muestra en la figura 117. En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables, normalmente señalando las marcas de clase.

En mantenimiento ayuda a agrupar fallas comunes; ocurrencia de fallas; costos; y consumos entre otros factores útiles para la gestión de mantenimiento.

Figura 117. Histograma



El histograma se utiliza para:

- El Estudio de análisis de fallas en sistemas o equipos como herramienta para ver la tendencia de la falla en el tiempo o la relación de las variable de un modo de falla
- Hacer seguimiento al desempeño actual de un sistema o equipo
- Seleccionar el siguiente modo de falla o servicio a mejorar

- Observar el resultado en el tiempo de un mantenimiento preventivo practicado al sistema o equipo
- Obtener una revisión rápida de la variabilidad de un determinado evento de falla para un sistema o equipo
- Representar más de una variable de falla y su análisis e interpretación debe ser para cada variable
- Dirigir las políticas (diagnostico y toma de decisiones) de mantenimiento a las áreas o sistemas más críticos

M.1 CONCEPTOS IMPORTANTES

El histograma necesita de claridad en conceptos como variabilidad, estratificación, rango y clase para poder comprender el desarrollo de la herramienta como se muestra en la figura 118 y tabla 82, también en características importantes que son el fuerte de la herramienta como la capacidad de síntesis, de análisis y de comunicación.

Figura 118. Conceptos Importantes

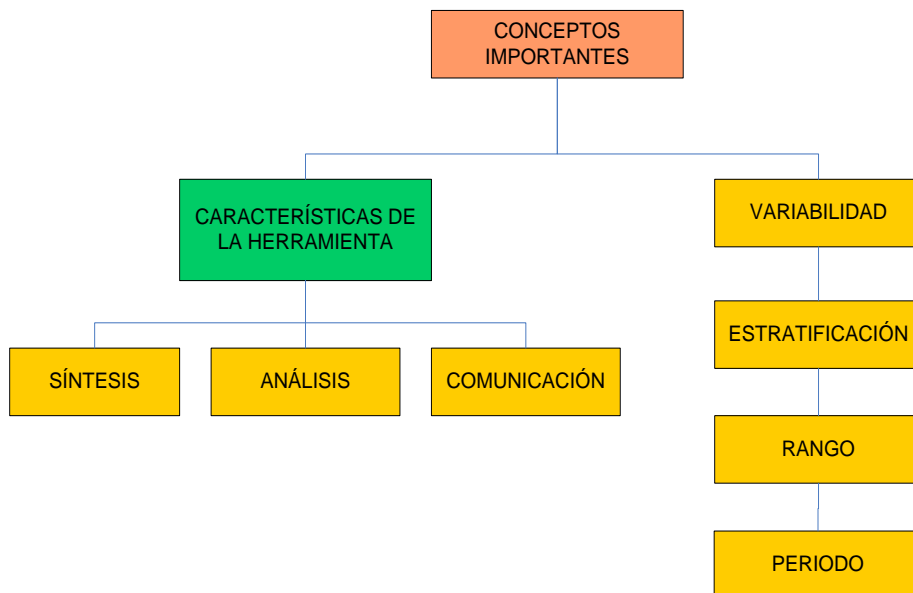


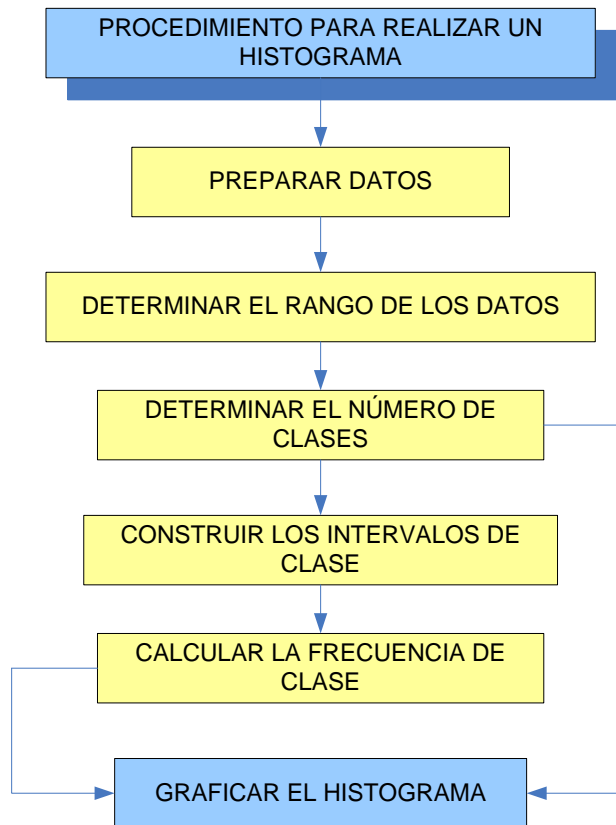
Tabla 82. Definición de los conceptos importantes en el estudio de un histograma

Síntesis	Permite simplificar y graficar una distribución de fallas, agrupando aquellos factores de falla asociados a un mecanismo o modo de falla específico.
Análisis	Permite examinar fallas evidenciando esquemas o tendencias de comportamiento
Comunicación	Permite comunicar información de forma clara y sencilla sobre modos de falla complejos
Variabilidad	Intervalo de variación en los valores numéricos de una variable asociada a un evento de falla para un sistema ó equipo
Periodo	Intervalos en que se divide el eje de las ordenadas que corresponde al tiempo, se simboliza con la letra (T)
Estratificación	Separación de un conjunto de factores de falla en diferentes grupos o clases
Rango	Medida de la dispersión, correspondiente a la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de un conjunto de valores, el rango se simboliza por la letra (R)

M.2 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN HISTOGRAMA

El procedimiento para la realización de un histograma parte de la obtención de datos a los cuales se les realiza un determinado manejo como se muestra en la figura 119, y finaliza en la representación grafica de los datos.

Figura 119. Proceso para un histograma



M.2.1 Preparar datos

Consiste en recoger los datos de una variable de falla en forma correcta o asegurarse de la adecuación de los existentes y mostrarlos en forma de tabla o lista.

Los datos deben ser:

- **Objetivos:** Establecidos en hechos, no en supuestos u opiniones.
- **Exactos:** Asegurar que la variabilidad en el proceso de recogida de datos (variabilidad de la medida) no desvirtúa la variabilidad del proceso en estudio.

- Completos: Se debe registrar toda la información relevante asociada a cada factor de falla (máquina, hora del día, empleado, etc.) en previsión de los diferentes análisis que pueden ser necesarios.
- Representativos: Deben reflejar todos los diferentes eventos y circunstancias (tiempo, modo, lugar, condición) que se producen en la realidad.

M.2.2 Determinar el rango

El rango de los datos es la resta de los valores extremos, identificar en la tabla de datos ya seleccionados el valor máximo y el valor mínimo de la variable a analizar, obteniéndose así el rango (R):

$$R = VV_{Max} - V_{Min} \quad (47)$$

Cuando la variable se va a analizar con respecto al tiempo el rango es el tiempo de análisis.

M.2.3 Determinar el número de clases

Las clases son los intervalos en que se divide la variable sobre la que se han tomado los datos. Gráficamente en el histograma el número de barras es el número de clases.

Para obtener el número de clases no se conoce un método exacto, sin embargo existen criterios para determinar el número de clases. Algunos autores recomiendan de cinco a veinte clases, dependiendo de cómo estén los datos y cuántos sean. Un criterio usado frecuentemente es que el número de clases debe ser aproximadamente a la raíz cuadrada del número de datos.

Para obtener el número de clases puede utilizarse el método aproximado de la tabla 83 se recomienda el número de clase para determinado número de datos.

Cuando la variable se va a analizar con respecto al tiempo el número de clases está determinado por el número de periodos del tiempo de estudio (año, semestre, trimestre, mes, día, etc.) y se obvian los siguientes pasos con respecto a la clase.

Tabla 83. Número de clases en un histograma

Número de datos	Número de clases recomendado
20 – 50	6
51 – 100	7
101 – 200	8
201 -500	9
501 – 1000	10
Más de 1000	11 - 20

El mínimo recomendado para la realización de un histograma son 40 datos esto con objeto de no alterar la variabilidad del proceso en estudio.

Amplitud del intervalo de cada clase:

La amplitud aproximada del intervalo se halla dividiendo el rango por el número de clases.

$$A = \frac{R}{N^{\circ}_{clases}} \quad Ec (48)$$

Cuando la variable se va a analizar con respecto al tiempo (ocurrencia de fallas) el número de clases está determinado por el número de periodos del tiempo de estudio entonces la amplitud es el mismo periodo.

Condiciones para la amplitud:

- Todas las clases tendrán el mismo intervalo.
- No habrá sobre posición entre distintas clases.

- La amplitud se redondea posteriormente a un número o cifra decimal conveniente para el manejo de las clases y la proporción del eje horizontal del Histograma.

M.2.4 Construir los intervalos de clase

El intervalo de la primera clase incluye el valor mínimo de los datos y para evitar que algunos datos coincidan con los límites de los intervalos se definen de forma que tengan una cifra más, detrás de la coma.

Si, por ejemplo, los datos tienen dos cifras, detrás de la coma (3,55; 3,78, etc.), se definirán las clases hasta la tercera cifra, detrás de la coma (3,555; 3,785, etc.), si se obtiene una clase más o menos respecto del número recomendado, debido al redondeo posteriormente efectuado, no existe deterioro ni en la sencillez ni en la información.

Si se está analizando una variable respecto al tiempo, los intervalos de clase son el mismo número de periodos, por ejemplo en días, semanas, meses, semestres, años, etc.

M.2.5 Calcular la frecuencia de clase

Calcular la frecuencia de clase es determinar el número de datos que están incluidos en cada una de las clases. Es importante comprobar que el número total de datos es igual a la suma de las frecuencias de cada clase.

Si se analiza una variable respecto al tiempo la frecuencia de clase es la frecuencia de periodo es decir determinar el número de ocurrencia de la falla para cada uno de los periodos.

M.2.6 Graficar el histograma

El histograma es una gráfica que muestra la frecuencia de los datos en cada clase (periodo), el eje horizontal representa intervalos, en tanto que el eje vertical representa la frecuencia. Habitualmente, se dibujan barras rectangulares con sus áreas proporcionales a las frecuencias dentro de los rangos o intervalos. Para graficar histogramas se encuentran muchas herramientas informáticas como el programa Microsoft Excel, Gráfico Histograma de SPSS.

Para dibujar y rotular los ejes se tienen las siguientes pautas:

- El eje vertical representa las frecuencias, por tanto en él se rotularán números naturales, dependiendo del valor y escala del número de datos que se han registrado.
- El eje horizontal representa la magnitud de la variable medida por los datos. Este eje se divide en tantos segmentos iguales como clases (periodos) se hayan definido.
- Rotular los límites de los intervalos de clase (periodo), el eje con la característica representada y las unidades de medida empleadas
- Dibujar las barras verticales correspondientes a cada clase (periodo). Su base está situada en el eje horizontal y su altura corresponderá a la frecuencia de la clase (periodo) representada.
- Características como el título y condiciones en que se han recogido los datos, los límites de tolerancia nominales entre otras, ayudan a los demás a interpretar el gráfico y sirven de recordatorio de la fuente de los datos.

M.3 INTERPRETACIÓN

La interpretación de un Histograma consiste en identificar la pauta de variación del conjunto de datos estudiado (valor medio, rango, forma) y elaborar una explicación

razonable y relevante para dicha pauta, de tal forma que relacione la variación con el proceso o fenómeno en estudio.

La experiencia y habilidad del grupo de trabajo en la interpretación del histograma es fundamental en la utilización de esta herramienta, puesto que no existen reglas fijas que se puedan utilizar para explicar de forma precisa las pautas de variación en cualquier situación. Es por esto que los equipos de trabajo deben profundizar en el conocimiento del proceso en estudio para utilizar esta herramienta de forma eficaz.

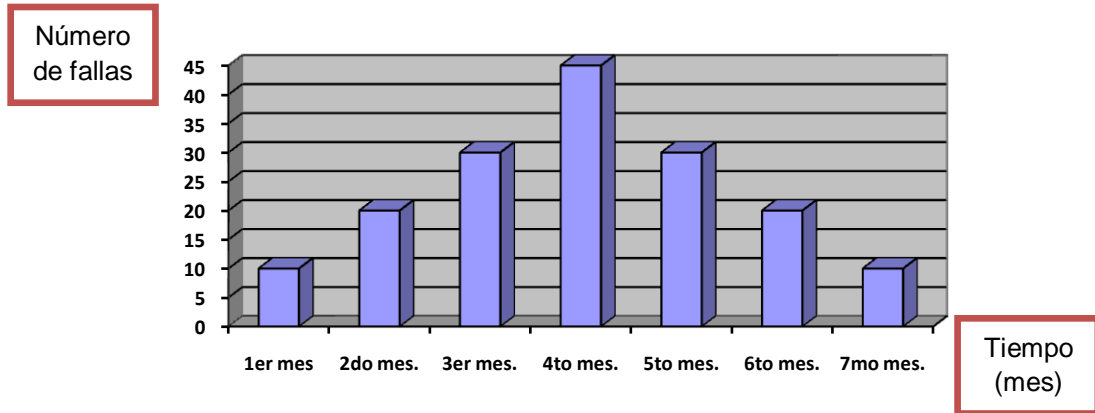
A continuación se presentan modelos de variación que pueden ayudar a clasificar Histogramas y recomendaciones generales sobre posibles explicaciones respecto al análisis de fallas en mantenimiento.

M.3.1 Pautas características de variación

Distribución en forma de campana

Presenta una forma simétrica con un pico en la mitad del recorrido de los datos como se muestra en la figura 120. Pauta de distribución poco probable para sistemas o equipos los cuales se les realiza un análisis de fallas, puede ser el resultado a un análisis de fallas para un equipo el cual ha sido reemplazado, entonces ese pico es debido al gran número de fallas del equipo deteriorado y por otro lado a las fallas que presenta el equipo de reemplazo hasta que alcanza un funcionamiento de vida útil.

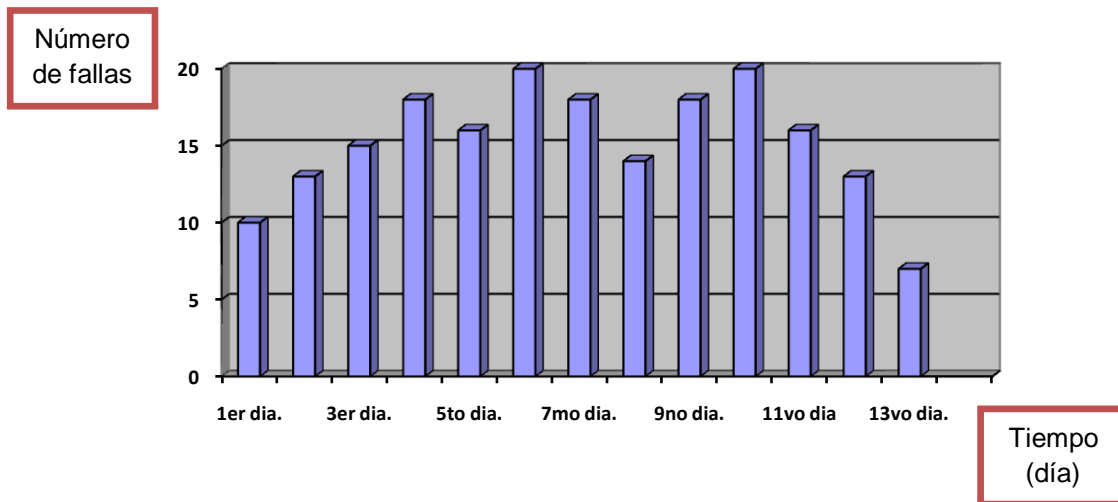
Figura 120. Distribución en forma de campana



Distribución plana

La figura 121 muestra la Pauta de distribución típica en mantenimiento para equipos críticos complejos donde se presenta la frecuencia del evento durante su funcionamiento ó representa la distribución para equipos o sistemas a los cuales se les realiza mantenimiento correctivo.

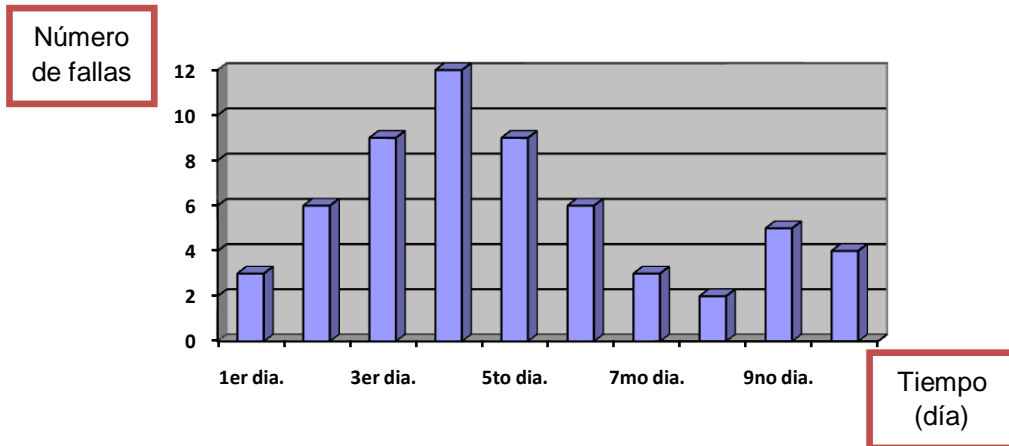
Figura 121: Distribución plana



Distribución con un pico aislado

La figura 122 muestra la típica distribución en mantenimiento cuando la producción es periódica. En algunos meses se incrementa o aumenta la producción y por consiguiente el número de fallas en los equipos varía.

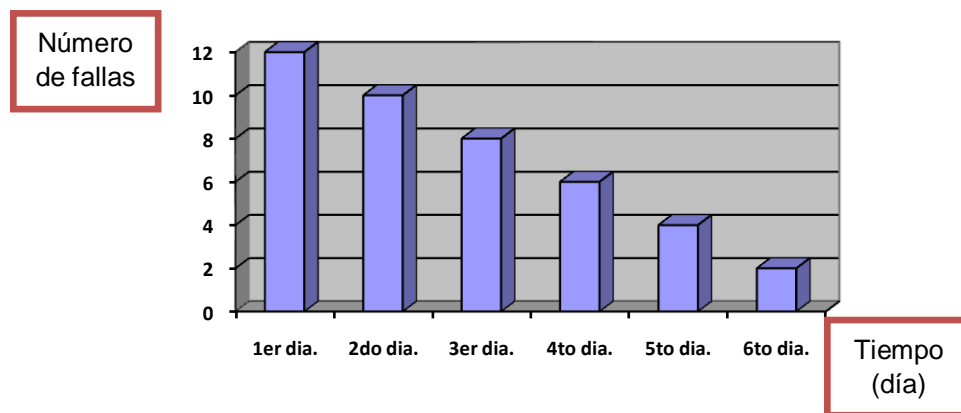
Figura 122: Distribución con un pico aislado



Distribución disminuyendo la frecuencia de falla

La figura 123 muestra la distribución al poco tiempo de aplicar o mejorar un plan de mantenimiento preventivo, disminuyendo así el número de fallas en el transcurso del tiempo, ó equipos que se encuentran en vida infantil los cuales presentan gran número de fallas al comienzo.

Figura 123: Distribución Truncada



Para desarrollar el método se mostrará un ejemplo.

Una empresa fabrica muebles de madera, muebles metálicos y colchones. Ésta desea evaluar el comportamiento de las fallas en el último año, para lo cual cuenta con el historial de fallas respectivo presentadas por mes para cada sección (maderas, metálicas y colchones), como se muestra en la tabla 84.

Tabla 84: Historial de Fallas

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Madera	8	12	15	6	4	6	10	13	16	14	10	8
Metálica	7	8	9	8	6	8	10	8	6	7	5	6
Colchón	4	5	4	10	13	10	7	4	4	10	8	7

Debido a que el ejemplo es una aplicación para análisis de fallas donde se analizan estas con respecto al tiempo, es por esto que se utilizará periodos en vez de clases

Preparar datos

El registro histórico de fallas proporciona los datos de interés.

Determinar el rango

El rango de los datos es la resta de los valores extremos de la variable a analizar.

$$R = VMax - VMin$$

Para el ejemplo en cuestión la frecuencia de falla de los equipos en las 3 secciones, es variable con respecto al tiempo por lo tanto el rango es el tiempo de análisis.

Determinar el número de periodos

Para el ejemplo debido a que la frecuencia de ocurrencia es respecto al tiempo, el número de periodos es igual al número de meses debido a que los datos fueron obtenidos mes a mes, esto hace fácil interpretar la distribución resultante.

Número de periodos = 12

Construir los intervalos de periodo

El eje coordenado representa el tiempo por lo tanto los periodos pueden ser por ejemplo día, semana, mes, semestre, etc. El intervalo de todos los periodos es el mismo debido a que es tiempo calendario.

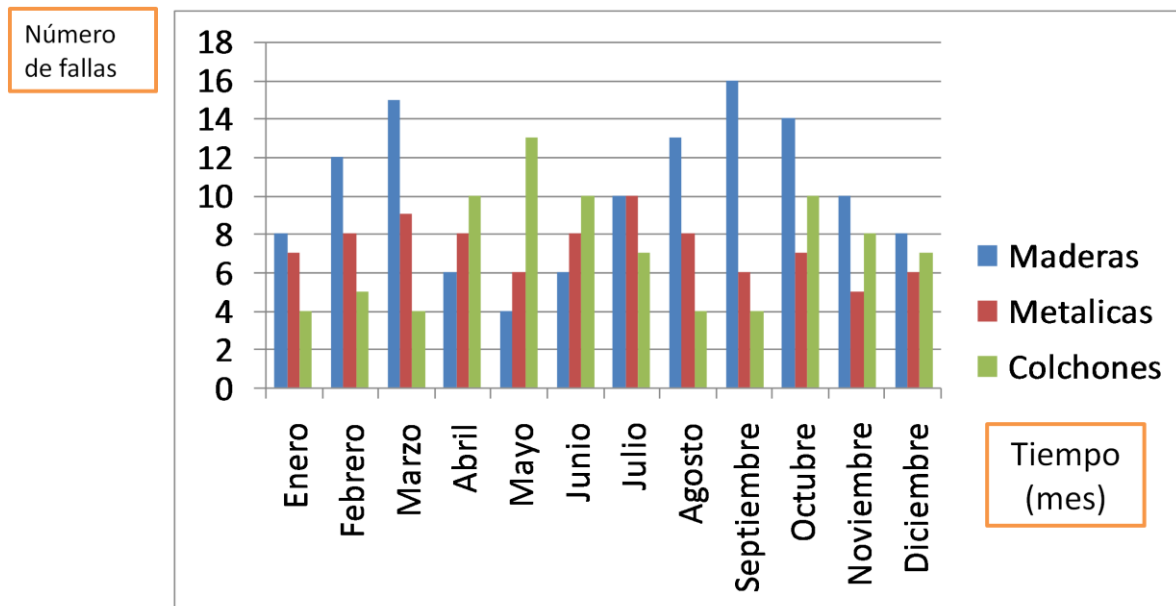
Para el ejemplo los intervalos de periodo son de un mes.

Calcular la frecuencia de periodo

Determinar el número de datos que están incluidos en cada una de los periodos (frecuencia de periodo), esto es lo que se obtiene del registro histórico de las fallas.

Para el ejemplo, la frecuencia de clase la proporciona el registro histórico, donde se muestra el número de fallas por cada mes de producción, como se puede ver en la figura 124.

Figura 124. Histograma para el ejemplo de aplicación.



Interpretación

El histograma Representa las fallas en los equipos de las secciones maderas, metálicas y colchones, el análisis e interpretación debe ser para cada variable de falla, por lo que se tiene:

- Se observa que los equipos en la sección maderas son los que presentan mayor frecuencia de falla en la empresa, con dos picos de alta frecuencia de falla en los meses de marzo y septiembre
- Los equipos en la sección metálicas presentan una distribución casi plana lo cual indica que allí están los equipos más críticos de la empresa.
- Los equipos de la sección colchones presentan una distribución con un pico (Mayo), mantenimiento investigó la causa y encontró que la producción en la sección colchones durante el mes de Mayo fue alta, por lo que se asocia la alta tasa de fallas al incremento en la producción.

- Se observa para el histograma en general que es una empresa donde se presentan irregularidad en la producción donde hubo fuerte producción en la sección maderas y metálicas en el primer y tercer trimestre, y la sección colchones su mayor producción se produjo en el segundo y cuarto trimestre
- El histograma evidencia que es nula o deficiente la gestión de mantenimiento preventivo

ANEXO N

N. DIAGRAMA DE DISPERSIÓN

Es una representación gráfica del grado de asociación y relación entre dos o más variables cuantitativas, en el cual se puede mostrar: la tendencia con respecto al tiempo de una variable la cual puede ser de un equipo o un proceso; la relación causa efecto entre dos o más variables del equipo, del proceso o el entorno.

El objetivo del diagrama de dispersión es que por medio de técnicas estadísticas ajustar un tipo de ecuación al conjunto de datos dado, con el propósito de obtener una ecuación empírica de predicción razonable precisa y que proporcione un modelo teórico que no esté disponible⁷¹, para el posterior análisis del grado de relación y asociación de los datos, los análisis más usados para este tipo de estudios son: el análisis de regresión y el de correlación.

N.1 CARACTERÍSTICAS DE UN DIAGRAMA DE DISPERSIÓN

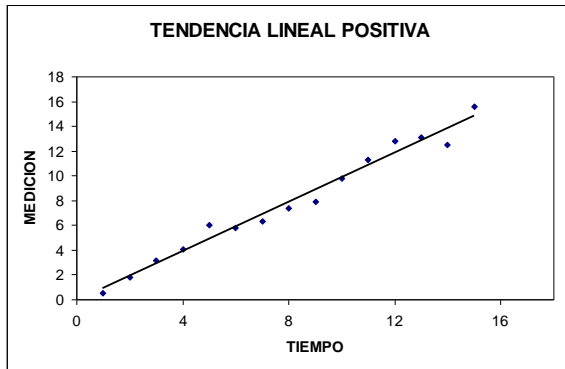
El análisis de datos mediante esta metodología proporciona mayor información que el simple análisis matemático de correlación, sugiriendo posibilidades y alternativas de estudio, con el propósito de controlar o mejorar determinado proceso y, por consiguiente, evitar que falle.

Las características principales de un diagrama de dispersión, se dan dependiendo de la distribución de los valores de las variables X y Y, o sea, la dispersión (nube de puntos) en el diagrama de dispersión influyendo éstos, en la elección del modelo matemático adecuado como se muestra en la figura 125, los cuales, si se pueden describir por una línea recta, se dice que hay una relación lineal, pero puede también describirse mediante una curva y tener una relación curvilínea, de

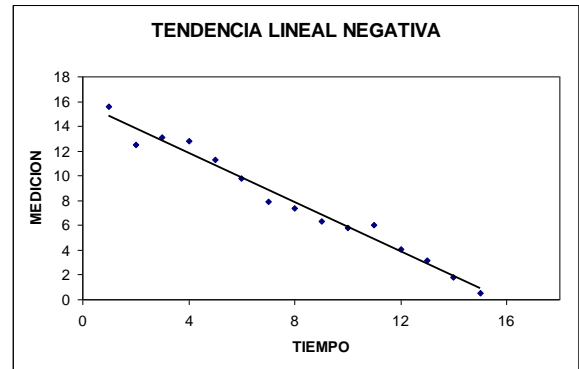
⁷¹ Canavos, George C., Probabilidad y Estadística Aplicaciones y Métodos George, Virginia Commonwealth University, 1998, Pag 459

acuerdo a esto tomar un determinado modelo matemático lineal, logarítmico, exponencial, cuadrático, o polinómico. Se observa directamente en el diagrama, la dirección de la línea o curva, ésta indica si la relación es directa o inversa.

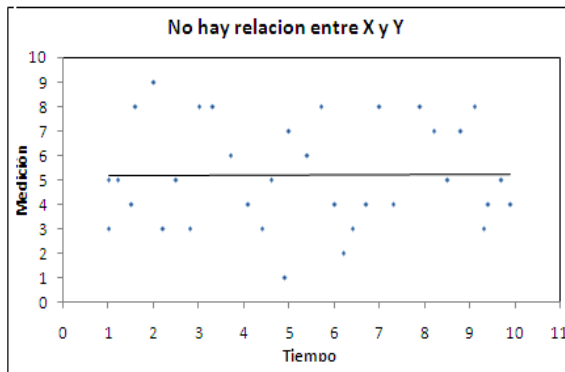
Figura 125 Algunos modelos de relación.



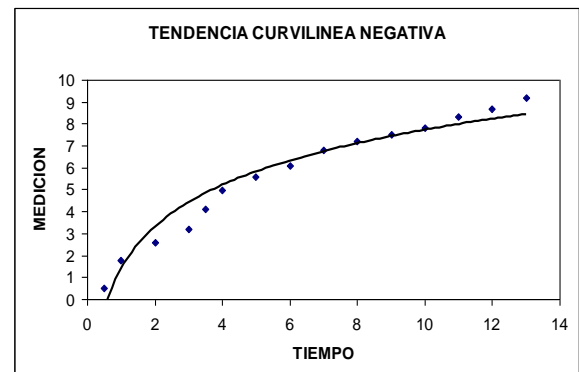
A) Tendencia lineal positiva



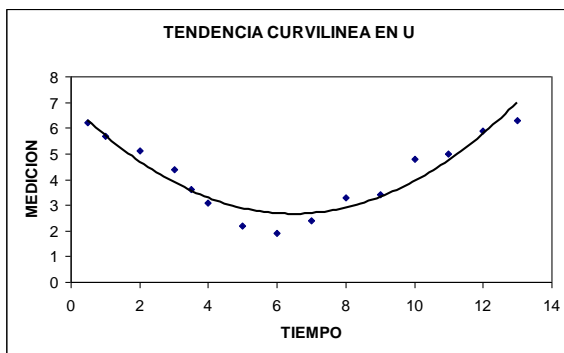
B) Tendencia lineal negativa



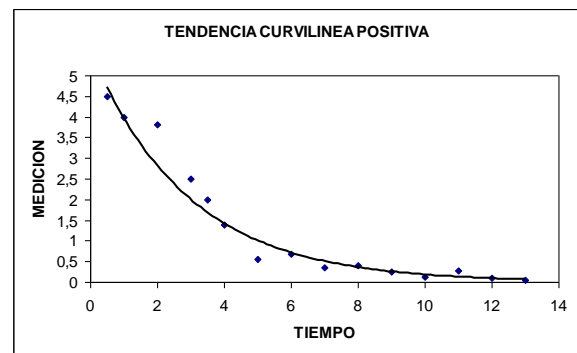
C) No hay relación entre X y Y



D) Tendencia curvilínea negativa



E) Tendencia curvilínea en U



F) Tendencia curvilínea positiva

En las figuras A y B los puntos se agrupan claramente alrededor de una línea recta, estos casos sugieren que el control de una de las variables lleva al control de la otra o tienen esta tendencia en relación al tiempo, puede ocurrir que los puntos no están suficientemente agrupados, como para asegurar que existe la relación, la figura A es un ejemplo de relación lineal positiva, cuando los valores de X crecen los valores de Y también se incrementan. La figura B es un ejemplo de relación lineal negativa, cuando los valores de X crecen los valores de Y decrecen. En la figura C para cualquier valor de la variable X, Y puede tener cualquier valor. Hay poca o ninguna relación entre X y Y, aparecen valores altos y bajos de Y para cada valor de X, se debería analizar mediante un gráfico de control.

En las figuras D, E y F el valor de la variable Y parece estar relacionado con el de la variable X, pero esta relación no es simple o lineal. En este caso se estudia la relación más profundamente ¿Hay alguna ley no lineal que explique esta relación? ¿Es esta relación el resultado de componer varias relaciones? La figura D muestra una relación curvilínea positiva entre X y Y. los valores de Y crecen cuando X crece, pero en ciertos valores de X el aumento de Y va disminuyendo. La figura E conforme crece X al principio Y decrece, pero a medida que X continua creciendo Y no deja solo de crecer sino que, empieza a crecer después de tomar su valor mínimo, esta es una relación parabólica o en forma de U. En la figura F, Y decrece con rapidez en los primeros valores de X, pero luego decrece con menos rapidez a medida que X sigue creciendo, esta es una relación curvilínea, exponencial.

Las utilidades del diagrama de dispersión en el análisis de fallas se listan en la tabla 85, las cuales se utilizarán en las secciones siguientes de este anexo.

Tabla 85. Características principales de un diagrama de dispersión

UTILIDAD DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN EN EL ANÁLISIS DE FALLA
Estudiar y extraer de grandes cantidades de datos las características principales, sugiriendo posibilidades y alternativas de estudio
Estudiar la posible relación entre dos variables, combinando el análisis de regresión con el de correlación, se puede probar relaciones entre causa y efecto
Predecir la tendencia en el tiempo de determinada propiedad o medición de un proceso o equipo
Explicar los valores de una variable en términos de otra o de una tercer variable
Priorizar causas
Mejorar la calidad. Son una técnica excelente para lograr mejorar la calidad
Tomar decisiones de los productos elaborados
Desarrollar programas de inspección basados en alguna condición de la máquina o del producto

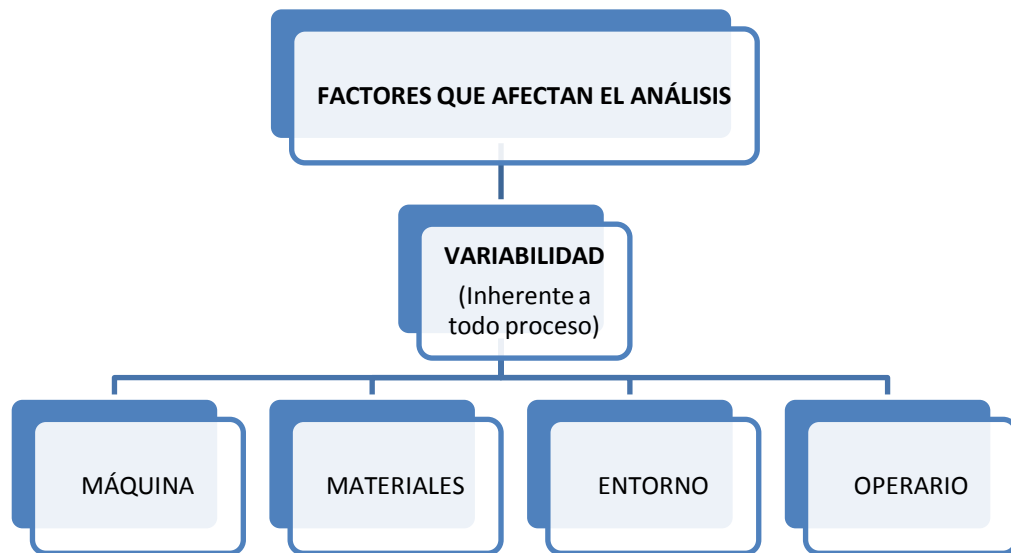
N.2 FACTORES QUE PUEDEN AFECTAR UN DIAGRAMA DE DISPERSIÓN.

Entre los principales factores que afectan este análisis como se ve en la figura 126 se encuentra la variabilidad, la cual es algo inherente a todo proceso, esta es debido al efecto conjunto de máquina, materiales, entorno y operario.

El primer factor de variación es la máquina, en ésta se tiene en cuenta aspectos tales como: el desgaste de la herramienta, las vibraciones de la máquina, el equipo de sujeción de trabajo y del posicionamiento de dispositivos así como las fluctuaciones hidráulicas y eléctricas. Cuando se conjugan todas estas variaciones, el equipo operará dentro de cierta capacidad o precisión. Incluso se afirma que máquinas idénticas tienen capacidades diferentes, algo muy importante que se debe tomar en cuenta cuando se programe la fabricación de piezas importantes.⁷²

⁷² Besterfield, Dale H., Control de calidad. México: Prentice Hall, 1995. p.104.

Figura 126. Factores que afectan un diagrama de dispersión



El segundo factor de variación es debido al material, puesto que se producen variaciones del producto terminado, también deben estar presentes en la materia prima (a su vez, otro producto terminado). Los materiales deben cumplir con los requisitos de calidad exigidos por la empresa, Características relacionadas con la calidad como la resistencia a la tensión, ductilidad, grosor, porosidad y contenido de humedad, es de esperar que contribuyan a la variación total del producto final. El tercer factor de variación es el entorno, la temperatura, la luz, la radiación, el tamaño de las partículas, la presión y la humedad contribuyen todas a las variaciones en el producto, a veces se pueden realizar experimentos en el espacio exterior a fin de tener mayor información sobre el efecto del entorno en las variaciones del producto.

El cuarto factor de variación es el operario, en esta causa figura también el método que emplea el operario para realizar determinada operación. El bienestar emocional y físico del operario también contribuye en la variación. Los errores humanos se pueden clasificar en olvidos, errores debido a desconocimientos, de identificación de elementos, de inexperiencia, voluntarios, por inadvertencia, debidos a lentitud, por sorpresa, debido a la falta de estándares e intencionales, y

estos pueden cometerse en cualquier fase del proceso de fabricación, dicho error puede deberse a diversas causas por ejemplo, dibujos o especificaciones incorrectos o incomprensibles, herramientas inadecuadas, ambiente de trabajo incomodo, mal diseño del puesto de trabajo, etc.

La variabilidad aleatoria, se caracteriza por un patrón de dispersión en torno de una norma deseada, estos errores al azar son en gran parte el resultado de la variabilidad natural del ser humano y pueden ser controlados mediante la selección, capacitación y supervisión del personal.

La variabilidad sistemática, se caracteriza porque la dispersión general es pequeña, pero algún factor está interfiriendo, una vez identificado el factor, el error es corregido.

Siempre que estas fuentes de variación fluctúan de manera natural o prevista, se producirá un patrón estable de diversas causas fortuitas (causas aleatorias) de la variación. No es posible eliminar las causas fortuitas de la variación, debido a que son muchas y cada una de ellas por separado reviste poca importancia, es difícil detectarlas y/o descubrirlas. Aquellas causas de la variación cuya magnitud es grande, gracias a lo cual se les puede identificar fácilmente (mayor dispersión), se les clasifica como causas atribuibles. Cuando en un proceso sólo están presentes causas fortuitas, se considera que se encuentra en estado de control estadístico lo cual significa que es estable y predecible. Sin embargo, si también existen causas atribuibles de variación, esta resultará excesiva y al proceso se le clasifica como fuera de control, o que está más allá de la variación natural esperada.

N.3 TÉCNICAS DE REGRESIÓN

Las técnicas de regresión propician medios legítimos a través de los cuales pueden establecerse asociaciones entre las variables de interés en las cuales la relación usual no es causal. La palabra “regresión” se usó por primera vez en este contexto por Francis Galton (1822-1911) en sus estudios biológicos sobre la herencia. En ellos se notó que las características promedio de la siguiente

generación de un grupo en particular tendían a moverse en la dirección de las características promedios de la población general, más que hacia las de la generación previa de este grupo. Esta tendencia fue referida como una regresión hacia la media de la población⁷³. El análisis de regresión por sí sólo no puede probar una relación causa efecto entre las variables analizadas, algunos ejemplos proporcionarán una idea de por qué obtener una relación causa efecto se encuentra más allá del alcance del análisis de regresión. Existe una relación entre la altura y el peso de los seres humanos, pero ¿implica esta relación, que se pueda cambiar la altura de esta persona si se modifica su peso?, encontramos una relación entre la cantidad de gas bruto que se consume en cierta área de alguna ciudad y la temperatura atmosférica promedio, pero ¿significa esto que es posible aumentar la temperatura mediante la reducción del consumo de gas? El análisis de regresión solo descubre una asociación entre la variable de respuesta (dependiente) y las variables de predicción (independiente), en lugar de detectar una relación causa efecto. Se conoce como análisis de regresión al método estadístico que permite establecer una relación matemática entre un conjunto de variables $X_1, X_2... X_k$ y una variable dependiente Y .

El objetivo de un modelo de regresión es obtener una ecuación que permita "predecir" el valor de Y una vez conocidos los valores de $X_1, X_2... X_k$. Al graficar los datos pueden presentarse una tendencia rectilínea o seguir un patrón curvo, como ya se vio en la figura 125 pueden darse alguna de las siguientes relaciones las cuales se muestran en la tabla 86, Lineal, Logarítmica, Exponencial, Cuadrática, polinómica.

⁷³ CANAVOS , George C., Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos. Virginia Commonwealth University. 1998

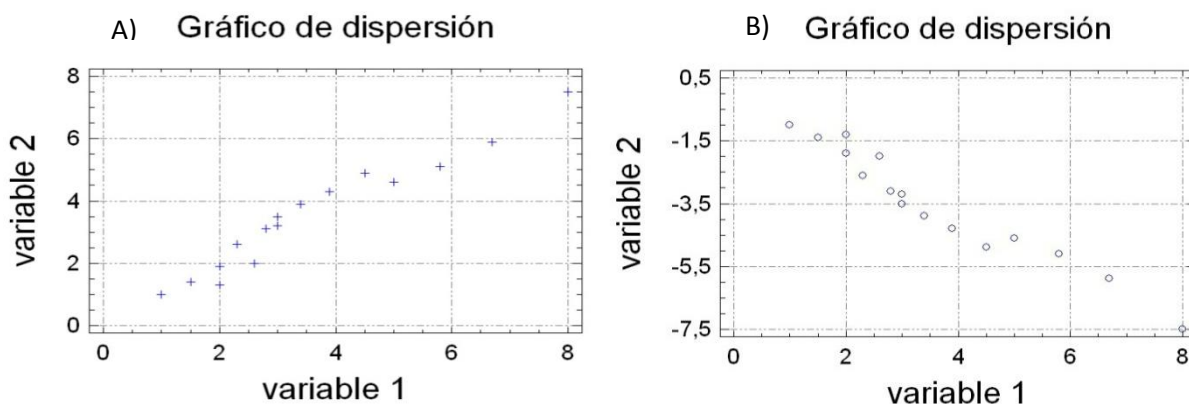
Tabla 86. Ecuaciones de regresión

REGRESIÓN	ECUACIÓN
Lineal	$y = b_0 + b_1x$
Logarítmica	$y = b_0 + b_1 \ln(x)$
Exponencial	$y = b_0 * e^{b_1 * x}$
Cuadrática	$y = b_0 + b_1x + b_2 * x^2$
Polinómica	$y = b_0 + b_1x + \dots + b_n * x^n$

N.3.1 Modelo de regresión lineal

Ésta es la forma más sencilla y fácil de realizar el análisis, se desarrolla una ecuación matemática que describa la relación entre las variables. En la figura 127 las graficas A y B muestran diagramas de dispersión los cuales se pueden modelar mediante una regresión lineal simple.

Figura 127. Modelos para aplicación de regresión lineal simple



Las ecuaciones lineales son útiles porque muchas relaciones se aproximan a la forma lineal, además son relativamente fáciles de trabajar e interpretarlas y

finalmente las otras formas de análisis de regresión son extensiones que se usan de los conceptos que se utilizan en la regresión lineal simple, cuando sólo exista una variable independiente, esto se reduce a una línea recta:

$$y_i = b_0 + b_1 * x_i + \varepsilon_i \quad (49)$$

Donde:

i Va de 1 a n números de valores de X que se están considerando.

Y_i es el valor de la variable respuesta Y .

b_0 = Intercepto real con el eje Y se llama constante de regresión.

b_1 = Pendiente de la recta, representa el cambio unitario en Y , Δy , por cambio unitario en X de Δx , es decir, la cantidad la cantidad de cambio de Y para un cambio unitario particular de X es llamado también coeficiente de regresión.

X_i = Es una constante conocida, o valor i de la variable independiente X .

ε_i = Representa el error aleatorio en Y por cada observación que ocurre. Este término se ha incluido porque el modelo estadístico es una aproximación a la relación exacta entre las dos variables, Este valor de ε es la diferencia entre el valor teórico de Y y el valor de Y_i calculado u observado. Las condiciones de ε son que este parámetro debe estar normalmente distribuido.

Que tanto se ajusta un modelo a una situación real, es decisión que el investigador debe tomar principalmente con base en el conocimiento que tenga de los datos y los procesos por los cuales se generan. Si el modelo lineal que se consideró no es representación razonable de la realidad el investigador puede tener en cuenta otros modelos como los de regresión múltiple o modelos curvilíneos.

N.3.2 Obtención de la ecuación de regresión muestral.

Generalmente la línea de regresión es desconocida, se puede obtener una estimación de la línea a partir de los datos de la muestra. El método que generalmente se emplea para ajustar una línea recta a los datos es el método de

los mínimos cuadrados. La línea que se obtiene por este método es una línea de mejor ajuste a los datos de la muestra.

La ecuación de regresión lineal simple muestral se puede expresar como:

$$y_i = a + b * X + \varepsilon \quad (50)$$

Los valores de a y b se pueden obtener con la solución a las llamadas ecuaciones normales.

$$b = \frac{n * (\sum x * y) - (\sum x) * (\sum y)}{n * (\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (51)$$

$$a = \frac{(\sum y) - b * (\sum x)}{n} \quad (52)$$

ε = error o residual de la muestra denotado por:

$$\varepsilon_i = Y_i - y_i \quad (53)$$

Esta estadística es la estimadora del parámetro ε

N.3.3 Error estándar

Representa el error aleatorio en Y por cada observación que ocurre. Este término se ha incluido porque el modelo estadístico es una aproximación a la relación exacta entre las dos variables.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum y^2 - a * \sum y - b * \sum(x * y)}{n - 2}} \quad (54)$$

Si el error estándar es cero, se espera que la ecuación de estimación sea un estimador perfecto de la variable dependiente. En este caso todos los datos quedarían sobre la línea de regresión y no habrá puntos alrededor de ella.

Si se asume que los puntos observados están distribuidos normalmente alrededor de la línea de regresión, se puede esperar a encontrar 68% de los puntos dentro de $\pm 2 * \varepsilon$ y 99% de los puntos dentro de $\pm 3 * \varepsilon$, de esta forma se utiliza ε para formar los límites alrededor de la línea de regresión.

El siguiente ejemplo para mostrar cómo se obtiene la ecuación de regresión y el cálculo del error estándar, se realizó con el programa Microsoft Excel 2007.

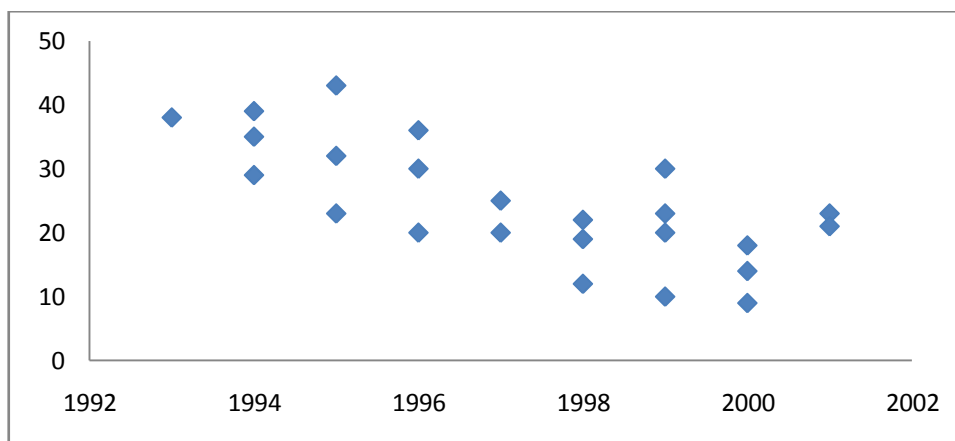
La Dirección de una mina está preocupada por el alto porcentaje de indisponibilidad de sus máquinas cargadoras. Encarga al Jefe de Mantenimiento que analice si está influyendo la antigüedad de dichas máquinas en su porcentaje de indisponibilidad, Para ello, recoge la información de la fecha de compra y del porcentaje de indisponibilidad de cada máquina y la traslada a la tabla 87 como se muestra a continuación.

Tabla 87. Datos de las máquinas presentes en la mina

Máquina	Fecha de compra	% Indisponibilidad	Máquina	Fecha de compra	% Indisponibilidad
C-0037	1993	38	C-0049	1998	12
C-0038	1994	35	C-0050	1998	22
C-0039	1994	29	C-0051	1998	19
C-0040	1994	39	C-0052	1999	23
C-0041	1995	23	C-0053	1999	20
C-0042	1995	32	C-0054	1999	10
C-0043	1995	43	C-0055	1999	30
C-0044	1996	20	C-0056	2000	9
C-0045	1996	36	C-0057	2000	14
C-0046	1996	30	C-0058	2000	18
C-0047	1997	20	C-0059	2001	23
C-0048	1997	25	C-0060	2001	21

Para hallar a solución, como se muestra en la figura 127, representamos los datos en el diagrama de dispersión

Figura 127. Gráfico de dispersión para los datos de las máquinas presentes en la mina



Aplicando el método de los mínimos cuadrados tabla 88 tenemos:

Tabla 88. Aplicación del método de los mínimos cuadrados para calcular la recta de regresión

n	X	y	x ²	y ²	x*y
1	1993	38	3972049	1444	75734
2	1994	35	3976036	1225	69790
3	1994	29	3976036	841	57826
4	1994	39	3976036	1521	77766
5	1995	23	3980025	529	45885
6	1995	32	3980025	1024	63840
7	1995	43	3980025	1849	85785
8	1996	20	3984016	400	39920
9	1996	36	3984016	1296	71856
10	1996	30	3984016	900	59880
11	1997	20	3988009	400	39940
12	1997	25	3988009	625	49925
13	1998	12	3992004	144	23976
14	1998	22	3992004	484	43956
15	1998	19	3992004	361	37962
16	1999	23	3996001	529	45977

17	1999	20	3996001	400	39980
18	1999	10	3996001	100	19990
19	1999	30	3996001	900	59970
20	2000	9	4000000	81	18000
21	2000	14	4000000	196	28000
22	2000	18	4000000	324	36000
23	2001	23	4004001	529	46023
24	2001	21	4004001	441	42021
Σ totales	47934	591	95736316	16543	1180002

$$b = \frac{n * (\Sigma x * y) - (\Sigma x) * (\Sigma y)}{n * (\Sigma x^2) - (\Sigma x)^2}$$

$$b = -2.7713$$

$$a = \frac{(\Sigma y) - b * (\Sigma x)}{n}$$

$$a = 5559.754$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\Sigma y^2 - a * \Sigma y - b * \Sigma (x * y)}{n - 2}}$$

$$\varepsilon = 6.594$$

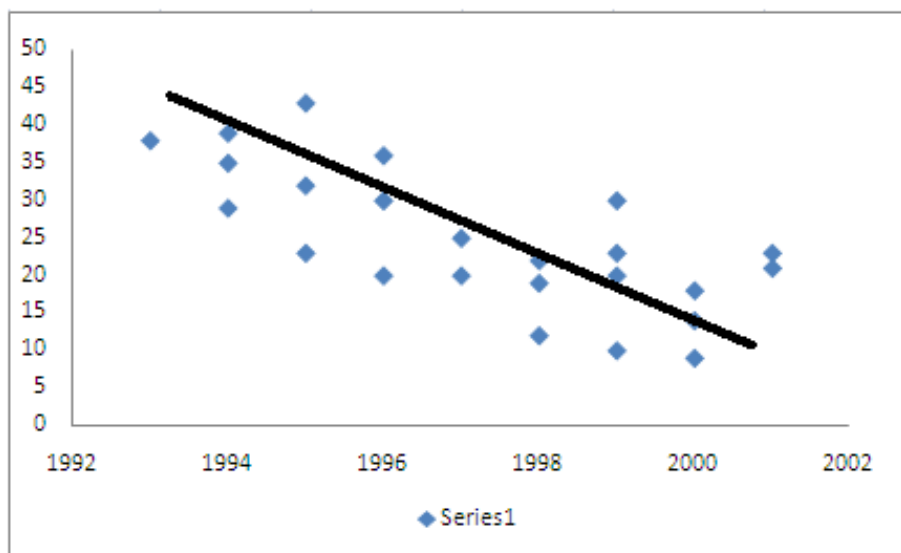
Ecuación de la recta

$$Y = 5559.754 - 2.7713 * X$$

Y = % de indisponibilidad

X = año de compra (en la figura 128 se muestra la gráfica de la ecuación)

Figura 128. Diagrama de dispersión con su ecuación de regresión



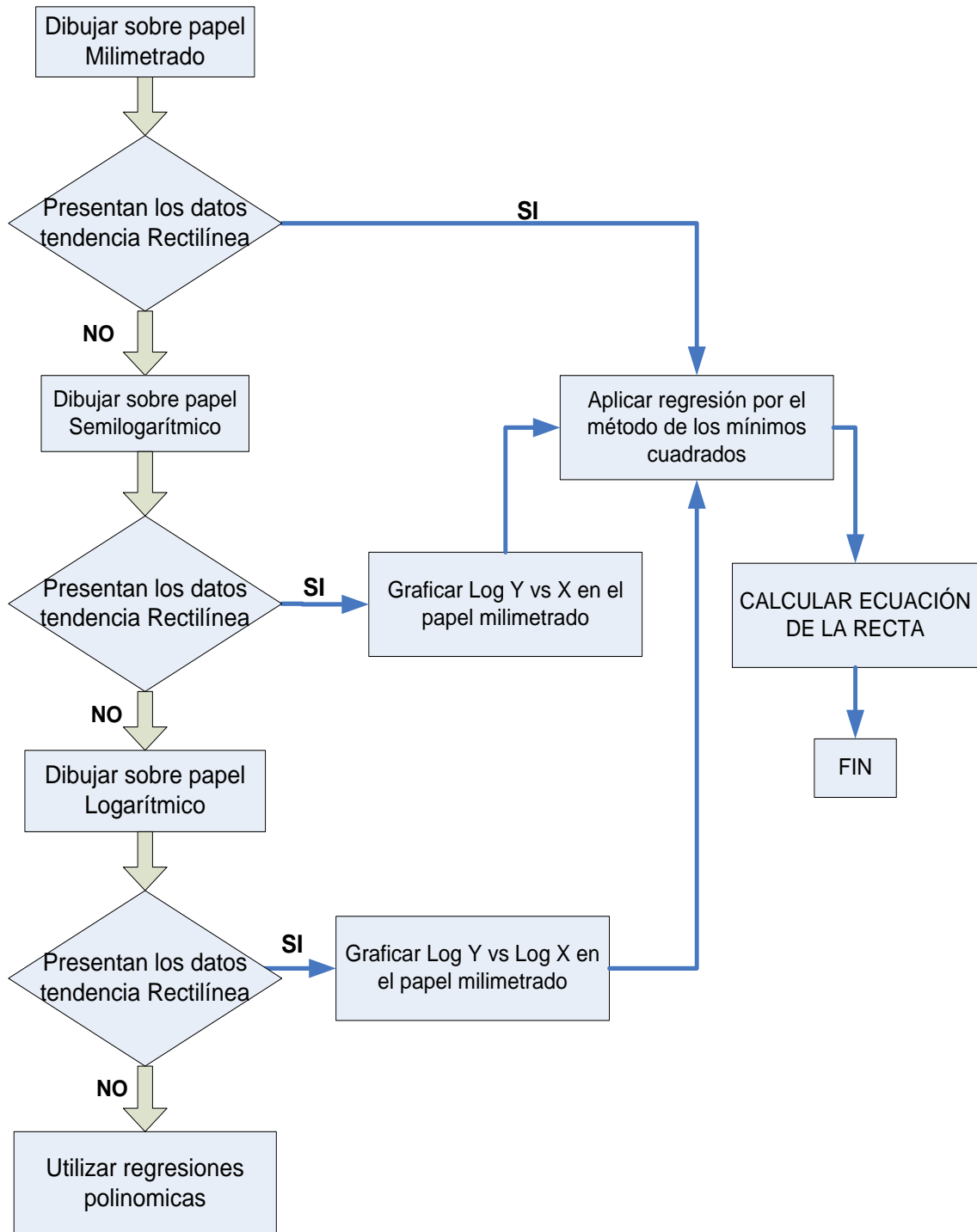
En el caso de que la tendencia sea curva, usualmente se intenta mirar si hay una correspondencia logarítmica (o exponencial) de los datos como se muestra en la figura 129. Esto se hace graficando los datos sobre papel semilogarítmico, y si se obtiene una línea recta no cabe duda que se trata de este tipo de tendencia. Si no se obtiene una recta al graficarse los datos sobre papel semilogarítmico, debe intentarse graficar sobre papel logarítmico. En el caso de que se presente una recta, los datos obedecen a una tendencia polinómica. Si no se presenta una tendencia rectilínea, debe intentarse alguna técnica de linealización, con la ayuda de software especializado se puede realizar fácilmente estas comprobaciones y desarrollar el modelo matemático que se ajuste a los datos de la muestra.

N.4 MODELO DE CORRELACIÓN

Con alguna frecuencia el interés que hay en la relación entre dos variables X y Y se concentra en determinar si están o no relacionados y, en caso afirmativo, en averiguar qué tan fuerte es la relación. La técnica que se empleará en esta situación es el análisis de correlación y se requiere que X e Y sean variables aleatorias y continuas.

El analista que va a emplear el análisis de correlación, toma una muestra aleatoria de unidades y hace dos mediciones una de X y otra de Y y no se debe hacer ningún intento por limitar el análisis o valores preseleccionados de X.

Figura 129 Diagrama de flujo para las diferentes tendencias curvilíneas



Coeficiente de correlación

Proporciona un mecanismo de seguridad a la tendencia de establecer relaciones que no necesariamente existen, las variables que son correlacionadas pueden ser dos variables cuantitativas cualesquiera. El parámetro de interés en la correlación es el coeficiente de correlación ρ , este parámetro es una medida de la relación lineal entre dos variables puede asumir valores entre -1 y 1 es decir:

- ρ Cerca de **-1** \Rightarrow Relación inversamente proporcional
- ρ Cerca de **0** \Rightarrow Ninguna relación lineal
- ρ Cerca de **1** \Rightarrow Relación directamente proporcional

El coeficiente de correlación entre dos variables X e Y tiene el mismo signo de la pendiente de la ecuación de regresión de Y sobre X.

La estimación puntual de ρ es r, el coeficiente de correlación de la muestra, que se puede obtener fácilmente de la siguiente ecuación.

$$r = \frac{n * \sum(x * y) - (\sum x) * (\sum y)}{\sqrt{n * \sum x^2 - (\sum x)^2} * \sqrt{n * \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (55)$$

En la tabla 89 podemos observar una clasificación de el grado de correlación que existe entre las variables de estudio.

Tabla 89. Clasificación del grado de correlación.

CORRELACIÓN	VALOR O RANGO
Perfecta	$ r = 1$
Excelente	$0.9 \leq r < 1$
Buena	$0.8 \leq r < 0.9$
Regular	$0.5 \leq r < 0.8$
Mala	$ r < 0.5$

Un valor más significativo es r^2 que se conoce como coeficiente de determinación y se puede expresar en porcentajes. El coeficiente de determinación está entre 0 y

1, si está cercano a 0, indica que X contribuye muy poco para predecir a Y. por otra parte a medida que se acerca a 1, X será cada vez más útil para predecir Y.

Debe quedar claro que el coeficiente de correlación describe exactamente el grado de asociación entre dos variables sólo cuando están relacionadas linealmente. Por esta razón, cuando la relación entre dos variables no es lineal, el coeficiente de correlación no permite determinar dicha relación.

Para el caso del ejemplo de las máquinas de la mina el valor del coeficiente de correlación es:

$$r = \frac{n \cdot \sum(x \cdot y) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{\sqrt{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad r = -0.72056$$

$$r^2 = 0.5192$$

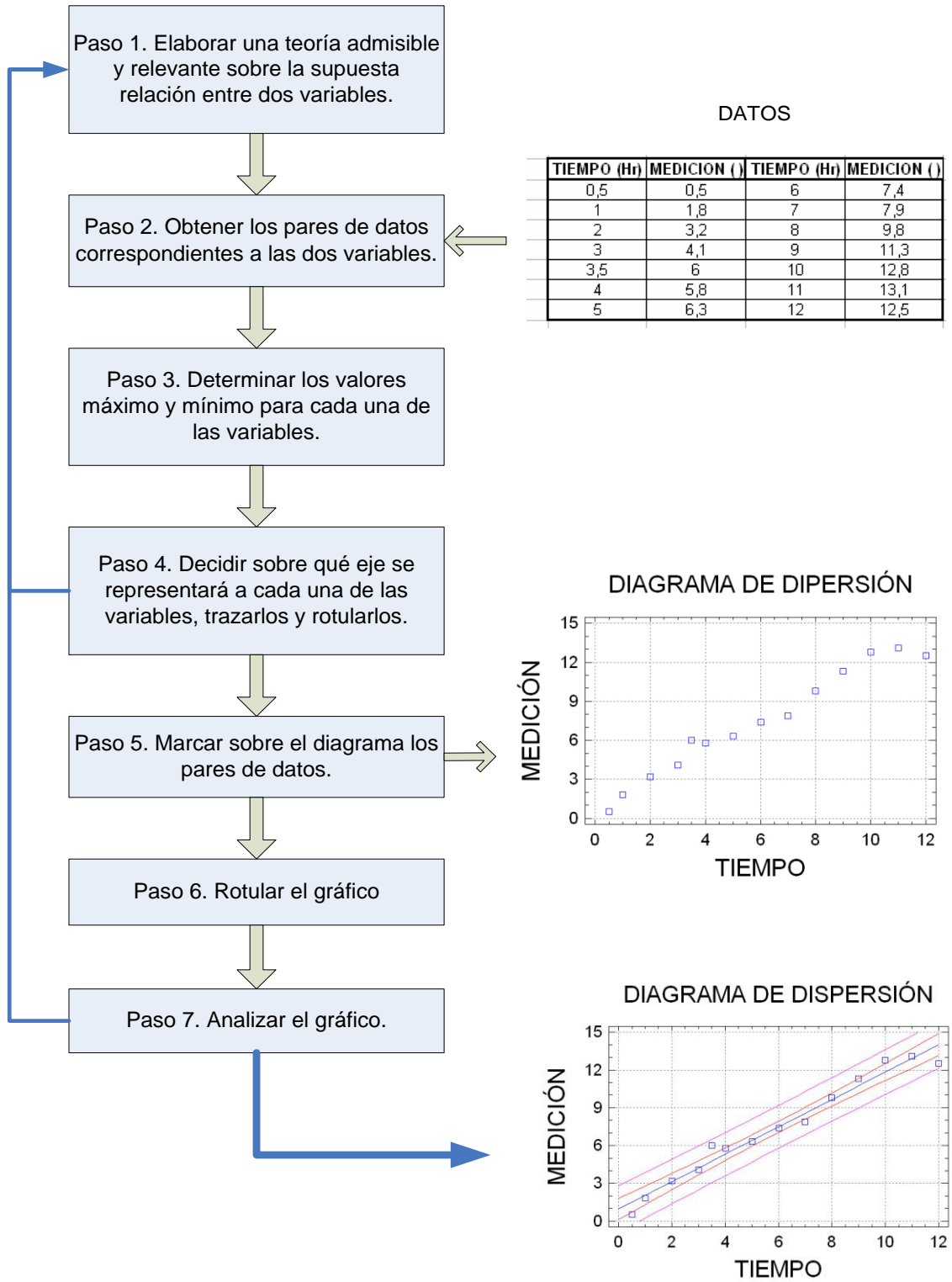
N.5 PASOS PARA DESARROLLAR UN DIAGRAMA DE DISPERSIÓN

En la figura 130 se muestra el diagrama de flujo para desarrollar un diagrama de dispersión, éste consta de 7 pasos, siendo el último paso el más importante, ya que es en éste donde se realiza el análisis de los datos.

Para mayor claridad en el desarrollo del diagrama de flujo se mostrará cada paso con el desarrollo del ejemplo.

La Dirección de una mina está preocupada por el alto porcentaje de indisponibilidad de sus máquinas cargadoras. Encarga al Jefe de Mantenimiento que analice si está influyendo la antigüedad de dichas máquinas en su porcentaje de indisponibilidad, Para ello, recoge la información de la fecha de compra y del porcentaje de indisponibilidad de cada máquina y la traslada a la tabla 3 como se muestra a continuación.

Figura 130. Diagrama de flujo para elaborar un diagrama de dispersión



- **Paso 1 Elaborar una teoría admisible y relevante sobre la supuesta relación entre dos variables o la posible tendencia en el tiempo.** Este paso previo es de gran importancia, puesto que el análisis de un diagrama de Dispersión permite obtener conclusiones sobre la existencia de una relación entre dos variables y su tendencia, no sobre la naturaleza de dicha relación.

Como teoría se plantea que el % de indisponibilidad de las máquinas tiene relación con el tiempo de adquisición de éstas, es decir que con el tiempo estas máquinas se degradan y aumenta su indisponibilidad.

- **Paso 2: Obtener los pares de datos correspondientes a las dos variables.** Al igual que en cualquier otra herramienta de análisis de datos, estos son la base de las conclusiones obtenidas, por tanto cumplirán las siguientes condiciones:
 - En cantidad suficiente: Se consideran necesarios al menos 40 pares de datos para construir un Diagrama de Dispersión.
 - Datos correctamente emparejados: Se estudiará la relación entre ambos.
 - Datos exactos: Las inexactitudes afectan a su situación en el diagrama desvirtuando su apariencia visual.
 - Datos representativos: Asegúrese de que cubren todas las condiciones operativas del proceso.
 - Información completa: Anotar las condiciones en que han sido obtenidos los datos.

Esta adquisición de datos se puede realizar con un sistema de información el cual consiste en medir características especiales que por lo general son críticas de equipos o productos, para poder realizar un control eficiente sobre los procesos. Entre mayor sea la cantidad de pares de puntos tomados (datos), con mas

precisión se podrá hacer el análisis, si se toman pocos datos la relación entre estos debe ser muy alta para poder validar el análisis.

- **Paso 3: Determinar los valores máximo y mínimo para cada una de las variables.** Esto con el fin de utilizar una escala precisa para que el gráfico no quede distorsionado y pueda causar errores de observación, se debe empezar un poco antes del límite inferior y llevar hasta un poco después del límite superior. En la Tabla 90 se aplican los pasos 2 y 3 para el ejemplo.

Tabla 90. Obtención de los datos y determinación de valores máximos y mínimos

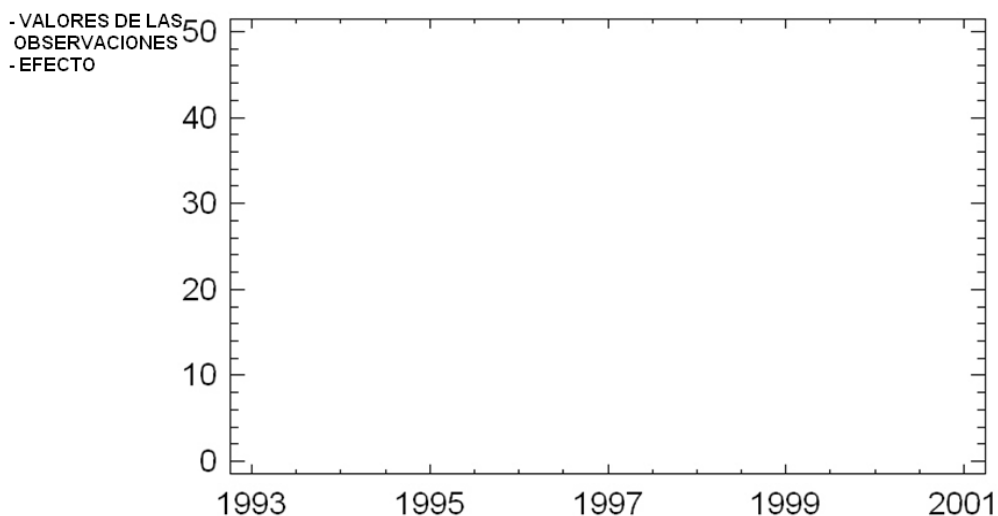
Máquina	Fecha de compra	% Indisponibilidad	Máquina	Fecha de compra	% Indisponibilidad
C-0037	1993	38	C-0049	1998	12
C-0038	1994	35	C-0050	1998	22
C-0039	1994	29	C-0051	1998	19
C-0040	1994	39	C-0052	1999	23
C-0041	1995	23	C-0053	1999	20
C-0042	1995	32	C-0054	1999	10
C-0043	1995	43	C-0055	1999	30
C-0044	1996	20	C-0056	2000	9
C-0045	1996	36	C-0057	2000	14
C-0046	1996	30	C-0058	2000	18
C-0047	1997	20	C-0059	2001	23
C-0048	1997	25	C-0060	2001	21

- **Paso 4: Decidir sobre qué eje se representará a cada una de las variables.** En el eje de las X (abscisas) los valores de la variable, en el eje de las Y (ordenadas) los hallazgos observados, si se analiza en función del tiempo, éste

siempre debe de ir en el eje X, como se muestra en la figura 131. Si se está estudiando una posible relación causa-efecto, el eje horizontal representará la supuesta causa. La construcción de los ejes afecta al aspecto y a la consiguiente Interpretación del diagrama.

- Los ejes han de ser aproximadamente de la misma longitud, determinando un área cuadrada.
- Numerar los ejes a intervalos iguales y con incrementos de la variable constantes.
- Los valores crecientes han de ir de abajo a arriba y de izquierda a derecha en los ejes vertical y horizontal respectivamente.
- Rotular cada eje con la descripción de la variable correspondiente y con su unidad de medida.

Figura 131 Rotular y trazar los ejes con sus respectivas escalas



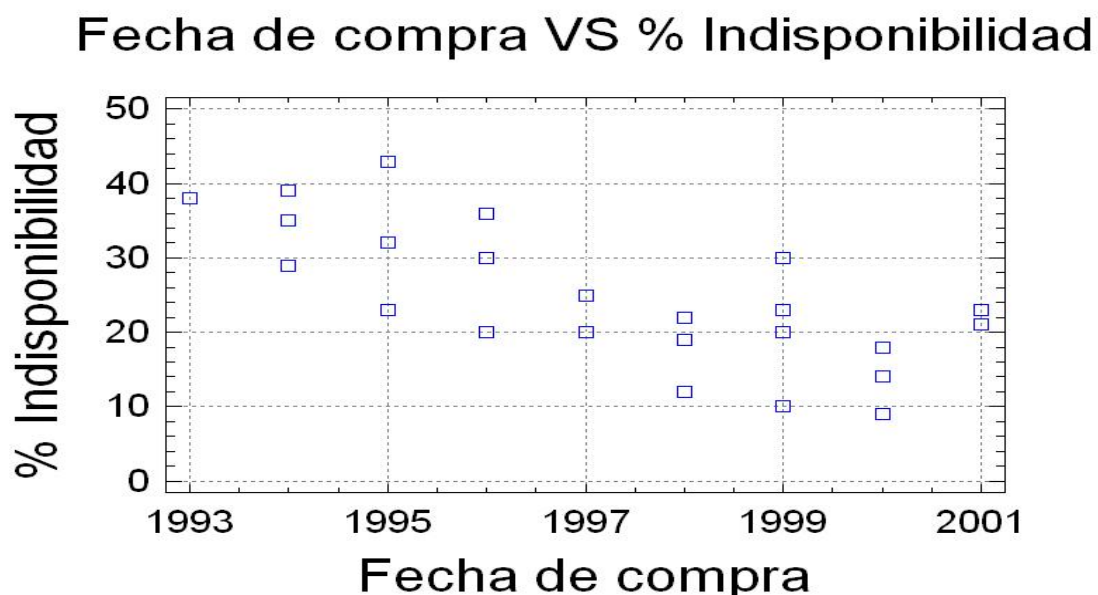
• **Paso 5: Marcar sobre el diagrama los pares de datos.**

- Para cada par de datos localizar la intersección de las lecturas de los ejes correspondientes y señalarlo con un punto o símbolo, como se

muestra en la figura 132. Si algún punto coincide con otro ya existente, se traza un círculo concéntrico a este último.

- Cuando coinciden muchos pares de puntos, el Diagrama de Dispersión puede hacerse confuso. Se puede discriminar los datos, por ejemplo por turnos, operario, tipo de máquina, etc.
 - Para hacer el diagrama de dispersión más claro se puede realizar una estratificación de los pares de datos, por ejemplo, según el turno de trabajo, lote de materia prima, operario de turno, etc. Deben escogerse símbolos que pongan de manifiesto los diferentes grupos de puntos de forma clara.
- **Paso 6: Rotular el gráfico.** Se rotula el título del gráfico y toda aquella información necesaria para su correcta comprensión como se muestra en la figura 132, el tipo de medidas, las condiciones en que se han realizado la toma de datos, alguna característica especial sobre las variables o algo relevante en el proceso, esto queda a consideración de los expertos, ya que esta información puede ayudar en la interpretación del diagrama.

Figura 132. Marcación de los pares de datos en el diagrama y rotulación

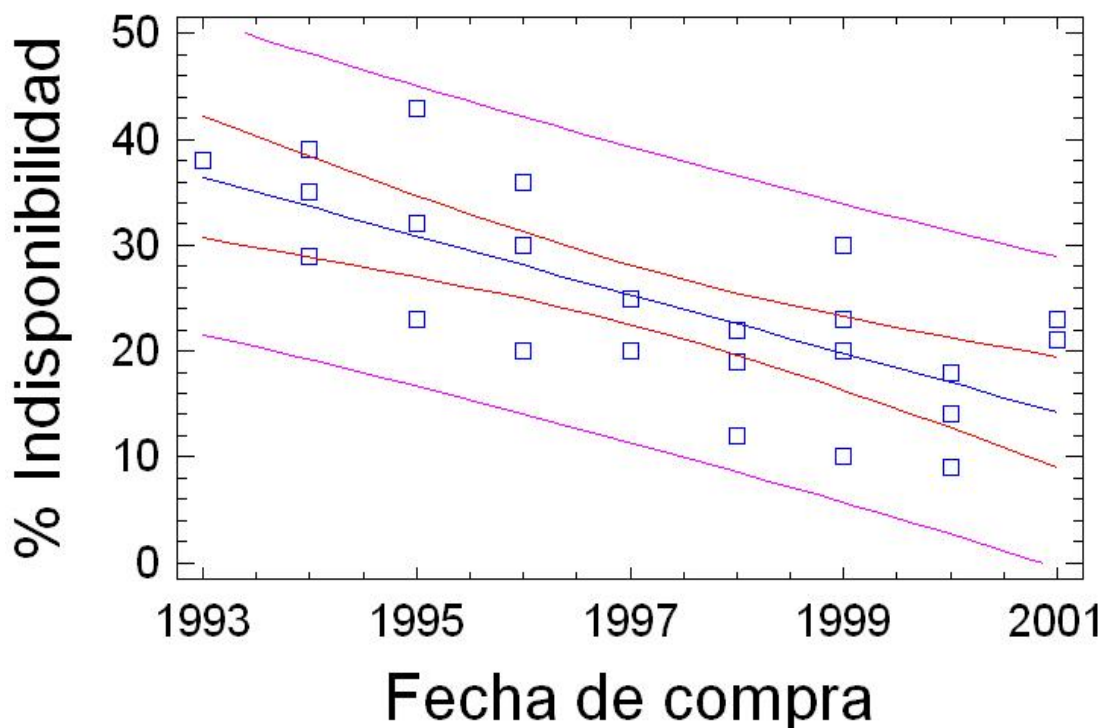


Paso 7: Analizar el gráfico. Una vez obtenido el gráfico procedemos a analizarlo para determinar el grado de asociación y la correlación existente entre las dos variables, se elige el modelo matemático que se va a utilizar para determinar estas relaciones (modelos de regresión lineal simple y modelo de correlación) dependiendo del tipo de dispersión que tengamos, en este paso comprobamos o descartamos la hipótesis inicial.

El siguiente análisis figura 133 es realizado mediante ayuda de un programa de computadora entre los cuales se encuentran STATGRAPHICS PLUS 5, Microsoft Excel, SPSS, etc., en las secciones anteriores analizamos el problema de una forma manual, ahora se realiza mediante la ayuda de software especializado.

Figura 133. Análisis del gráfico de dispersión

Fecha de compra VS % Indisponibilidad



Análisis de Regresión - Modelo Lineal $Y = a + b \cdot X$

Variable dependiente: % Indisponibilidad

Variable independiente: Fecha de compra

Parámetro	Error Estadístico		T	P-Valor
	Estimación	estándar		
Ordenada	5559,75	1135,6	4,89589	0,0001
Pendiente	-2,77138	0,56858	-4,87421	0,0001

Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	1033,03	1	1033,03	23,76	0,0001
Residuo	956,595	22	43,4816		
Total (Corr.)	1989,63	23			

Coefficiente de Correlación = -0,720561

R-cuadrado = 51,9208 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 49,7354 porcentaje

Error estándar de est. = 6,59406

Error absoluto medio = 5,13662

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre % Indisponibilidad y Fecha de compra.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\% \text{ Indisponibilidad} = 5559,75 - 2,77138 * \text{Fecha de compra}$$

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 51,9208% de la variabilidad en % Indisponibilidad.

El coeficiente de correlación es igual a -0,720561, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 6,59406. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones

Conclusiones del ejemplo:

- Aunque los datos muestran una tendencia lineal marcada, esto no asegura que una de las variables sea dependiente de la otra.
- La teoría inicial que el % de indisponibilidad de las máquinas tiene relación con el tiempo de adquisición de éstas, es decir que con el tiempo estas máquinas se degradan y aumenta su indisponibilidad, no es del todo cierta ya que el valor de la correlación es regular ($r^2 = 0.519$) ver tabla 89, por lo que no se puede explicar completamente la hipótesis de que el % de indisponibilidad de los equipos tengan una relación directamente proporcional a la fecha de compra, ya que influyen otras variables como lo son, la mantenibilidad, el tiempo de uso, la gestión de mantenimiento que se le aplique a cada máquina.

ANEXO O

O. GRÁFICOS DE CONTROL

El gráfico de control es una herramienta estadística que detecta la variabilidad, consistencia, control y mejora de un sistema o proceso por medio de la representación, observación y análisis del desempeño de sus datos vitales registrados en orden cronológico durante un periodo de estudio. Estos datos pueden ser los valores del diámetro de piezas fabricadas, la tasa de fallas de un equipo, sistema o proceso, la tasa de accidentes, el rendimiento de un proceso, cualquier indicador de la gestión de mantenimiento o la magnitud de un estándar de funcionamiento estrechamente ligado al control de calidad y asociado a una falla funcional (en adelante se le llamará a estos datos categorías). En la gráfica de control se representa gráficamente esta categoría contra el número de muestra o tiempo.

O.1 CONCEPTOS PREVIOS

Es importante conocer los medios para describir los datos y para hacer inferencias acerca de sus parámetros, teniendo en cuenta que por lo general éstos se desconocen, además dichos parámetros no son estáticos en el tiempo, ya que cambian conforme cambian las condiciones.

O.1.1 Distribución normal

Esta es la distribución continua más importante en el control estadístico. La mayoría de las mediciones que varían alrededor de un valor central siguen esta distribución. Esta distribución tiene dos parámetros, la media μ , y la varianza σ^2 . La función de densidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (56)$$

$$-\infty < x < \infty$$

Donde

$$-\infty < \mu < \infty$$

$$\sigma^2 > 0$$

La función de distribución acumulada de la distribución normal está dada por:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} dt \quad (56)$$

Reemplazando

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Entonces tenemos

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{\left[-\frac{1}{2}z^2\right]} \quad (57)$$

$$-\infty < x < \infty$$

Donde $\mu=0$ y $\sigma^2=1$

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z f(t) dt \quad (58)$$

La cual se encuentra tabulada

0.1.2 Teorema del límite central

El teorema enuncia que si X_1, X_2, \dots, X_n es una serie de n variables aleatorias independientes que proceden de una población que tiene una media finita, μ , y una varianza finita, σ^2 , y $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$, entonces, en condiciones muy generales:

$$Z = \frac{Y - \sum_{i=1}^n \mu_i}{(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2)^{1/2}} \sim N(0,1) \quad (59)$$

O.1.3 Descripción numérica

Consiste en identificar las medidas de ubicación de los conjuntos de datos. Una medida de ubicación es un valor que se calcula para un grupo de datos y que se utiliza para describir los datos en alguna forma. Generalmente se busca que el valor sea representativo de todos los valores del grupo y por lo tanto se desea un estadístico de tendencia central. La tabla 91. Muestra los parámetros que identifican una distribución normal de probabilidad.

Tabla 91. Parámetros de una distribución normal

CONCEPTO	SE MIDE A TRAVÉS DE	SÍMBOLO	ECUACIÓN
TENDENCIA CENTRAL	MEDIA MUESTRAL	\bar{X}	$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$
DISPERSIÓN O VARIACIÓN	VARIANZA MUESTRAL	S^2	$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR MUESTRAL	S	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$

O.2 INFERENCIA ESTADÍSTICA

Es el proceso por medio del cual se utilizan datos para llegar a conclusiones acerca de la población de la que se ha extraído una muestra. La inferencia estadística se divide en dos categorías principales, estimación de parámetros y comprobación de hipótesis.

O.2.1 Estimación de parámetros

La estimación de parámetros se subdivide en estimación por puntos y estimación por intervalos. Una estimación por puntos es un solo valor numérico de un estadístico que corresponde a ese parámetro, La tabla 92. Muestra estimadores para los parámetros que identifican las diferentes distribuciones. En una estimación por intervalo, se toma una muestra y se establece un límite superior y un límite inferior, o sea un intervalo. Se dice que el parámetro a estimar se encuentra dentro del intervalo establecido, con algún nivel de confianza dado por $100(1-\alpha)$ %.

Tabla 92. Estimadores para las diferentes distribuciones

DISTRIBUCIÓN	PARÁMETRO	ESTIMADORES
POISSON	Λ	$\hat{\lambda}$
BINÓMICA	P	$\hat{p} = \bar{X}$
NORMAL	μ, σ^2	$\hat{\mu} = \bar{X}$ $\hat{\sigma}^2 = S^2$

O.2.2 Estimación por intervalo

Se toma una muestra y se establece un límite superior y un límite inferior L y U respectivamente; es decir un intervalo. Se dice que el parámetro a estimar se encuentra dentro del intervalo establecido con un nivel de confianza dado por $100(1-\alpha)$ %. La tabla 93. Resume los intervalos de confianza para las diferentes distribuciones y suposiciones.

Tabla 93. Resumen de los intervalos de confianza.

PARÁMETRO	SUPOSICIONES	PUNTOS FINALES DEL INTERVALO DE CONFIANZA
M	N(μ, σ^2) n Grande σ^2 Conocida	$\bar{X} \pm \frac{Z_{\alpha/2}}{\sqrt{n}}$
$\mu_1 - \mu_2$	Distribuciones independientes σ_1^2, σ_2^2 conocidas n Grandes	$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm Z_{\alpha/2} * \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$
P	Binómica (n, p) n Grande	$\hat{p} \pm Z_{\alpha/2} * \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}}$
M	N(μ, σ^2) σ^2 desconocida	$\bar{X} \pm \frac{t_{\alpha/2, v} * S}{\sqrt{n}}$ u= n- 1
$\mu_1 - \mu_2$	Ambas N(μ, σ^2) σ_1^2, σ_2^2 desconocidas distribuciones independientes $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm t_{\alpha/2, v} * S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$ $S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$
$\mu_1 - \mu_2$	Ambas N(μ, σ^2) σ_1^2, σ_2^2 desconocidas distribuciones independientes $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm t_{\alpha/2, v} * S_p \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}$ $v = \frac{\left[\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right]^2}{\frac{\left[\frac{S_1^2}{n_1}\right]^2}{n_1 + 1} + \frac{\left[\frac{S_2^2}{n_2}\right]^2}{n_2 + 1}} - 2$
σ^2	N(μ, σ^2)	$\frac{(n - 1)S^2}{\chi_{\alpha/2, v}^2}, \quad \frac{(n - 1)S^2}{\chi_{1-\alpha/2, v}^2}$
$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$	Ambas N(μ, σ^2)	$\frac{S_1^2}{S_2^2} F_{1-\frac{\alpha}{2}, v_2, v_1}, \quad \frac{S_1^2}{S_2^2} F_{\frac{\alpha}{2}, v_2, v_1}$ $v_1 = n_1 - 1, \quad v_2 = n_2 - 1$

O.2.3 Comprobación de hipótesis

Gran parte de la inferencia estadística implica rechazar o aceptar proposiciones acerca de los parámetros de una distribución de probabilidad. Las proposiciones se denominan hipótesis

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

La primera proposición $H_0: \mu = \mu_0$ se llama hipótesis nula y la segunda $H_1: \mu \neq \mu_0$ hipótesis alternativa. La prueba de hipótesis está estrechamente relacionada con la estimación por intervalos. Los puntos finales de los intervalos establecidos constituyen el inicio de las regiones de rechazo en la prueba de hipótesis, por lo general se habla de regiones de rechazo en términos estandarizados. La tabla 94. Resume los estadísticos utilizados para la prueba de hipótesis según el caso que se con el que se cuente.

Tabla 94. Resumen de las pruebas de hipótesis

HIPÓTESIS NULA	HIPÓTESIS ALTERNATIVA	CRITERIO PARA EL RECHAZO	ESTADÍSTICO DE PRUEBA
$H_0: \mu = \mu_0$ σ^2 Conocida	$H_1: \mu \neq \mu_0$ $H_0: \mu > \mu_0$ $H_0: \mu < \mu_0$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_{\alpha}$ $Z_0 < -Z_{\alpha}$	$Z_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}}$
$H_0: \mu_1 = \mu_2$ σ_1^2 y σ_2^2 Conocida Independiente	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ $H_0: \mu_1 > \mu_2$ $H_0: \mu_1 < \mu_2$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_{\alpha}$ $Z_0 < -Z_{\alpha}$	$Z_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$
$H_0: p = p_0$ $0,1 \leq p \leq 0,9$ n Grande	$H_1: p \neq p_0$ $H_0: p > p_0$ $H_0: p < p_0$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_{\alpha}$ $Z_0 < -Z_{\alpha}$	$Z_0 = \frac{\hat{p} - p_0}{\sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{n}}}$

Tabla 94. Resumen de las pruebas de hipótesis (Continuación)

HIPÓTESIS NULA	HIPÓTESIS ALTERNATIVA	CRITERIO PARA EL RECHAZO	ESTADÍSTICO DE PRUEBA
$H_0: \mu = \mu_0$ σ^2 Desconocida	$H_1: \mu \neq \mu_0$ $H_0: \mu > \mu_0$ $H_0: \mu < \mu_0$	$ t_0 > t_{\alpha/2, v}$ $t_0 > t_{\alpha, v}$ $t_0 < -t_{\alpha, v}$ $v = n - 1$	$t_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}}$
$H_0: \mu_1 = \mu_2$ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ Desconocida Independiente	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ $H_0: \mu_1 > \mu_2$ $H_0: \mu_1 < \mu_2$	$ t_0 > t_{\alpha/2, v}$ $t_0 > t_{\alpha, v}$ $t_0 < -t_{\alpha, v}$ $v = n_1 + n_2 - 2$	$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$

O.2.4 Tipos de errores.

Se pueden presentar dos tipos de errores cuando se realiza la prueba de hipótesis. El rechazo de una hipótesis nula verdadera constituye un error de tipo I, y la aceptación de una hipótesis falsa es un error de tipo II. Las probabilidades de estos dos tipos de errores se representan por:

$$\alpha = P(\text{error tipo I}) = P(\text{rechazo de } H_0 / H_0 \text{ es verdadera})$$

$$\beta = P(\text{error tipo II}) = P(\text{aceptación de } H_0 / H_0 \text{ es falsa})$$

Con frecuencia se usa la potencia de la prueba más que β . La potencia es el complemento de β ;

$$\text{Potencia} = 1 - \beta$$

La potencia es la probabilidad de rechazar acertadamente una H_0 falsa y se puede expresar como:

$$\text{Potencia} = P(\text{rechazo de } H_0 / H_0 \text{ es falsa})$$

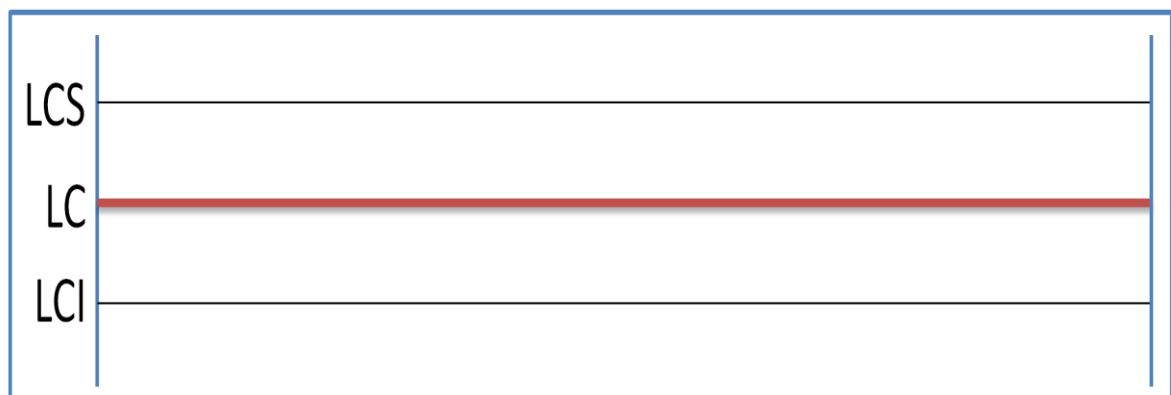
En gráficos de control esto es, un error de tipo I sucede si un valor muestral cae fuera de los límites de control aun cuando el proceso está fuera de control. Un error de tipo II ocurre cuando un valor muestral cae dentro de los límites de control aun cuando el proceso está fuera de control.

0.3 CONSTRUCCIÓN DEL GRÁFICO DE CONTROL

El gráfico de control se construye dibujando una recta vertical en la que se ubicará una escala limitada al rango de valores que se prevé tendrá la categoría analizada. Horizontalmente se dibuja una recta sobre la cual se ubicarán los puntos correspondientes a los valores que se alcanzan para la característica en los números o periodos sucesivos de muestras.

Se dibuja una recta horizontal al nivel correspondiente a valor medio de los valores obtenidos para la categoría analizada para los sucesivos periodos o muestras el cual recibe el nombre de línea central. Se trazan dos líneas paralelas a esta línea central una por encima y otra por debajo correspondientes a los rangos superior e inferior de desviación admisibles. La figura 134. Muestra el esquema de un gráfico de control.

Figura 134. Esquema de un gráfico de control



O.4 PRINCIPIOS DE LOS GRÁFICOS DE CONTROL

O.4.1 Causas de la variación

Siempre existirá una cierta cantidad de variación natural en todo proceso de producción, independientemente del diseño del sistema, proceso o equipo, la operación y el mantenimiento de estos. Esta variación es incontrolable y resulta de muchas pequeñas causas denominadas sistema estable de causas aleatorias; cuando éstas son pequeñas se dice que el proceso opera dentro de control estadístico, y por el contrario, si el proceso está fuera de control opera en presencia de causas de variación asignables, las cuales están intrínsecamente relacionadas con las máquinas, los operarios, los materiales, el entorno o el mantenimiento.

Por lo general, los procesos de producción operan dentro de control estadístico la mayor parte del tiempo; sin embargo, puede aparecer una de las causas asignables y alterar las condiciones de un proceso, de modo que quede fuera de control. Uno de los objetivos principales de la gráfica de control es detectar con prontitud la ocurrencia de estas alteraciones, de manera que se disponga un equipo de investigación que pueda encontrar las causas y tomar las acciones correctivas.

O.4.2 Aspectos estadísticos de la elaboración de gráficas de control

Los límites de control de una gráfica de control se seleccionan de manera que si un proceso está operando dentro de control estadístico, todos los puntos graficados estarán dentro de dichos límites y por el contrario si al menos uno de los puntos graficados se ubica fuera de los límites de control, significa que el proceso está fuera de control estadístico.

En definitiva, un gráfico de control se puede plantear como un contraste de hipótesis en el sentido siguiente:

H_0 : El proceso se encuentra bajo control estadístico

H_1 : El proceso se encuentra fuera de control estadístico

La hipótesis nula se puede referir a la media del proceso, a la dispersión del mismo, o bien a la proporción de unidades defectuosas que origina dicho proceso. Según Shewhart, la forma genérica de un gráfico de control, desde un punto de vista analítico y desde un punto de vista gráfico, es el mostrado en la figura 135.

Figura 135. Vista analítica y gráfica de un gráfico de control



Donde:

T es el estadístico muestral que mide la característica de calidad en estudio (T es el estimador del parámetro del proceso que se desea estimar y controlar).

μ_T es la media del estimador.

σ_T es la desviación típica del estimador.

k es una constante que indica la distancia de los límites de control a la línea central expresada en unidades de desviación típica.

O.4.3 Elección de los límites de control

La posición de los límites de control se determina a partir del valor de la constante k , y de la probabilidad de confundirse al tomar una decisión, es decir, de cometer un error de tipo I, o un error de tipo II. Normalmente se toma k igual a 3, en cuyo caso los límites se denominan límites de control 3-sigma, o límites de acción. Cuando la característica de calidad que se está estudiando sigue una distribución normal, la probabilidad de error de tipo I es de $\alpha=0,0027$. Cuando un punto de la muestra observada se encuentra dentro de los límites de control, no se puede rechazar la hipótesis nula H_0 ; por el contrario si está situado fuera de ellos, entonces se rechazará H_0 . Luego el límite superior e inferior de control corresponde respectivamente a los valores superior e inferior de la región de aceptación de la hipótesis nula, para un nivel de significación dado. Además de los límites 3-sigma, existen otros límites denominados límites de aviso que se encuentran a distancia 2-sigma de la línea central. Como su propio nombre indica sirven de aviso, de modo que si un punto cae entre los límites de acción y los de aviso es posible que el proceso no esté funcionando adecuadamente. Hay que tener en cuenta, que al igual que en una prueba de hipótesis, es posible que un proceso se juzgue fuera de control cuando realmente este bajo control o viceversa. Las consecuencias de dichos errores son importantes ya que si un proceso se declara fuera de control, cuando en realidad no lo está, se buscarán causas inexistentes; por el contrario si un proceso está fuera de control y se acepta que está en control estadístico, no se logrará el estándar de calidad que se ha fijado.

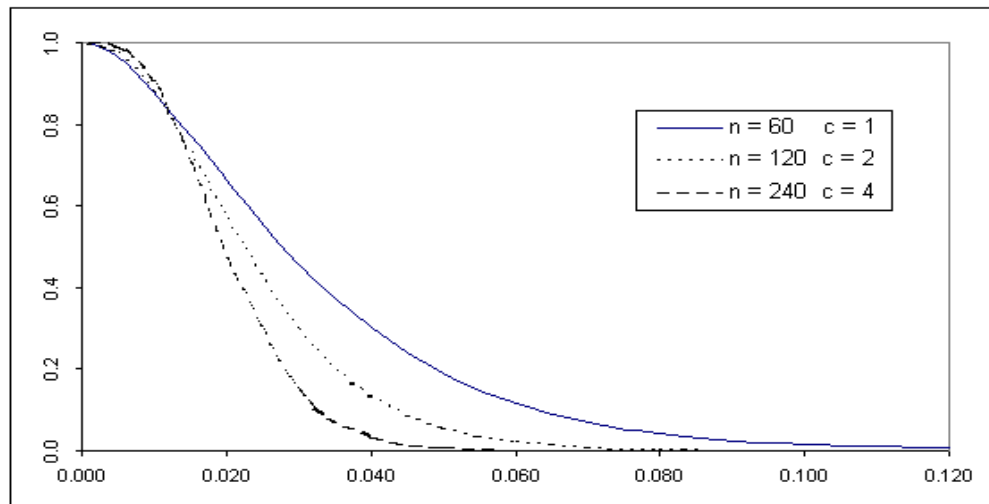
O.4.4 Tamaño de la muestra y frecuencia de muestreo

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de diseñar un gráfico de control es el tamaño de las muestras seleccionadas para llevar a cabo el control del proceso. La decisión sobre el tamaño de muestra se basa en el concepto de "subgrupo

racional" introducido por Shewhart. Según Shewhart los subgrupos o muestras deben ser tan homogéneos como sea posible para que, si hay presentes causas asignables aparezcan como diferencias entre los subgrupos en lugar de cómo diferencias dentro de los subgrupos. Generalmente se toman muestras de tamaño 4 ó 5 unidades aunque hay ocasiones en las cuales se aconsejan otros tamaños.

Un método para calcular el tamaño de muestra es utilizar la Curva Característica de Operación (CO). Dicha curva es una representación gráfica de la probabilidad de error de tipo II, es decir, la probabilidad de no rechazar la hipótesis nula cuando es falsa, que representa el riesgo β . En la figura 136 se puede ver la curva CO para diferentes tamaños de muestra.

Figura 136. Curva CO para diferente tamaño de muestra



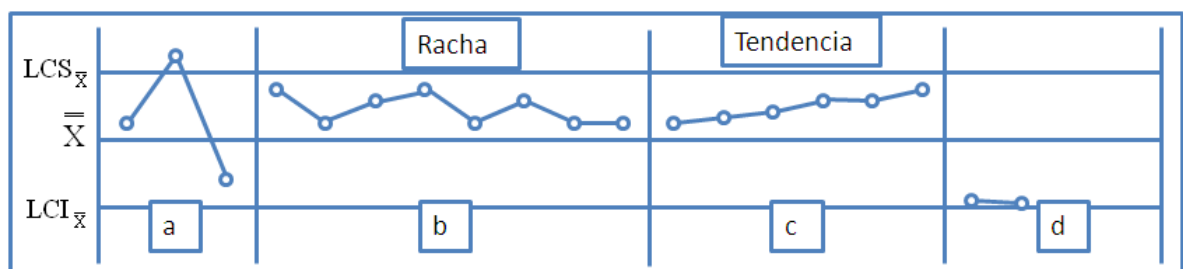
O.4.5 Detección de patrones de la gráfica de control

Hasta ahora sólo se han considerado los puntos fuera de los límites de control. Hay otros indicios de falta de control estadístico.

Un muestreo por subgrupos, con distribución normal, tendrá las siguientes características:

- Ningún punto fuera de los límites de control (menos de 3 de cada mil)
- Pocos puntos próximos a las líneas de los límites de control
- La mayoría de los puntos estarán próximos a la línea central
- Habrá un reparto aleatorio entre puntos por encima y por debajo de la línea central. En la figura 137 se muestra algunas situaciones en las que el proceso se encuentra fuera de control.

Figura 137. Proceso fuera de control



Una o varias de estas situaciones muy poco probables son indicio suficiente de falta de control:

- a) Un punto fuera de los límites de control
- b) Ocho puntos seguidos al mismo lado de la línea central
- c) Seis puntos seguidos ascendentes o descendentes al mismo lado de la línea central
- d) Dos puntos seguidos muy próximos a un límite de control

O.4.6 Tipos de gráficas de control

Según la característica que se desea observar, los gráficos de control se agrupan en dos grandes bloques: gráficos de control para variables, cuando la característica sea cuantitativa y gráficos de control para atributos, en caso de ser cualitativa. Si la característica de calidad es una variable, el control del proceso es equivalente a controlar la media y la desviación de la misma.

O.5 EJEMPLO

Mantenimiento desea estudiar la variabilidad de la reparación de un modo de falla específico frecuente, en determinado tipo de equipo, para establecer protocolos y estándares que faciliten el proceso de recuperación del mismo. Para lo cual establece analizar el tiempo de reparación del equipo con base en el sistema de reporte de fallas y acciones de mantenimiento del último mes.

Se tomarán muestras de tamaño $n=5$ ya que éste es el menor valor de reparaciones de este modo de falla que se hallan en los reportes. En la tabla 95 se resumen los valores a utilizar para realizar el gráfico

Tabla 95. Valore para realizar el gráfico

VARIABLE	TIEMPO DE REPARACIÓN
UNIDADES	MINUTOS
N	5
M	20

En la tabla 96 se muestran los datos registrados de tiempo de reparación del modo de falla en minutos

Tabla 96 tiempo de reparación (minutos)

DÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
TIEMPO DE REPARACIÓN (MIN)	20	18	19	15	15	15	30	35	15	19	20	23	20	24	17	24	21	20	25	19
	18	15	25	18	25	15	35	33	23	22	21	21	22	22	17	23	17	21	18	18
	23	23	24	20	24	21	28	29	22	25	24	15	17	17	23	15	18	17	16	23
	30	19	26	23	22	20	27	26	21	22	16	16	18	19	21	18	19	16	24	22
	19	24	20	22	19	16	32	25	15	16	15	15	19	18	19	25	17	23	21	19

Primero se elaborará la gráfica R, ya que si el proceso está fuera de control la gráfica X tendrá poco significado

Luego se calcula R:

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i = 7,368$$

Para n=5 se encuentra en la tabla D3=0 y D4=2,114. Como se muestra en la tabla 97.

Tabla 97. Valores de las constantes D₃ y D₄ para n=5

	n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{X}-R$	A_2	1,880	1,023	0,729	0,577	0,483	0,419	0,373	0,337	0,308
	d_2	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078
	D_3	0	0	0	0	0	0,076	0,136	0,184	0,223
	D_4	3,267	2,574	2,282	2,114	2,004	1,924	1,864	1,816	1,777

$$LSC = D_4 \bar{R} = 15,58$$

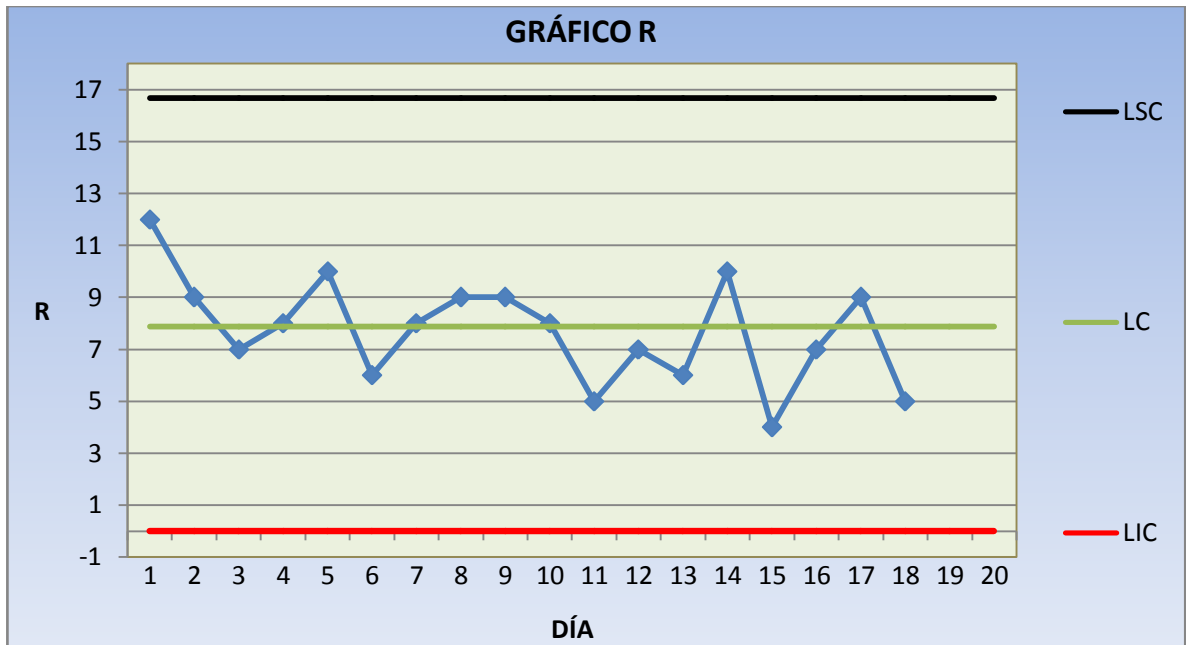
$$LC = \bar{R} = 7,368$$

$$LIC = D_3 \bar{R} = 0$$

Por lo tanto:

Con los valores de la línea de control y de los límites inferior y superior, ya se puede construir el gráfico de control, donde cada punto graficado corresponde al rango de los datos de cada día. En la figura 138 se puede ver el gráfico R

Figura 138. Gráfico R



Puesto que ningún recorrido está fuera de control se puede elaborar la gráfica X. Para lo cual se calcula X como sigue:

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_m}{m} = 20,91$$

Para n=5 se encuentra en la tabla que A2=0,577. En la tabla 98 se muestra el valor de la constante

Tabla 98. Valor de la constante A2 para el gráfico de control

	n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{X} - R$	A_2	1,880	1,023	0,729	0,577	0,483	0,419	0,373	0,337	0,308
	d_2	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078
	D_3	0	0	0	0	0	0,076	0,136	0,184	0,223
	D_4	3,267	2,574	2,282	2,114	2,004	1,924	1,864	1,816	1,777

Por lo tanto se obtienen los valores tanto de los límites inferior y superior como el de la línea de control:

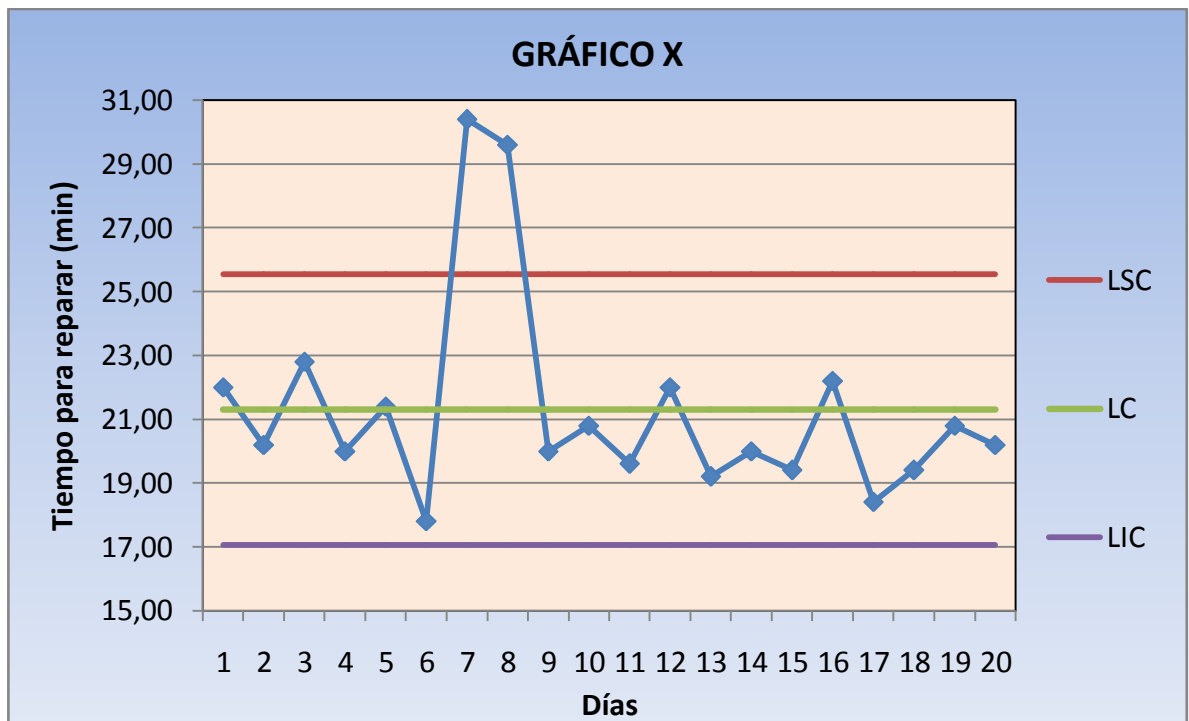
$$LSC = \bar{X} + A_2 \bar{R} = 25,52$$

$$LC = \bar{X} = 21,31$$

$$LIC = \bar{X} - A_2 \bar{R} = 17,06$$

Con los valores de la línea de control y de los límites inferior y superior, se procede a construir el gráfico de control, donde cada punto graficado corresponde al valor medio de la muestra. En la figura 139 se puede ver el gráfico X.

Figura 139. Gráfico de Control X



Se puede ver que los puntos 7 y 8 se encuentran fuera de control, mantenimiento investigó la causa y encontró que en esos días el equipo de técnicos se encontraba incompleto, debido a que uno de ellos se hallaba incapacitado con licencia médica, por lo que mantenimiento decide eliminar dichos puntos.

Ahora, los nuevos valores son:

$$LSC_R = D_4 \bar{R} = 16,66$$

$$LC_R = \bar{R} = 7,882$$

$$LIC_R = D_3 \bar{R} = 0$$

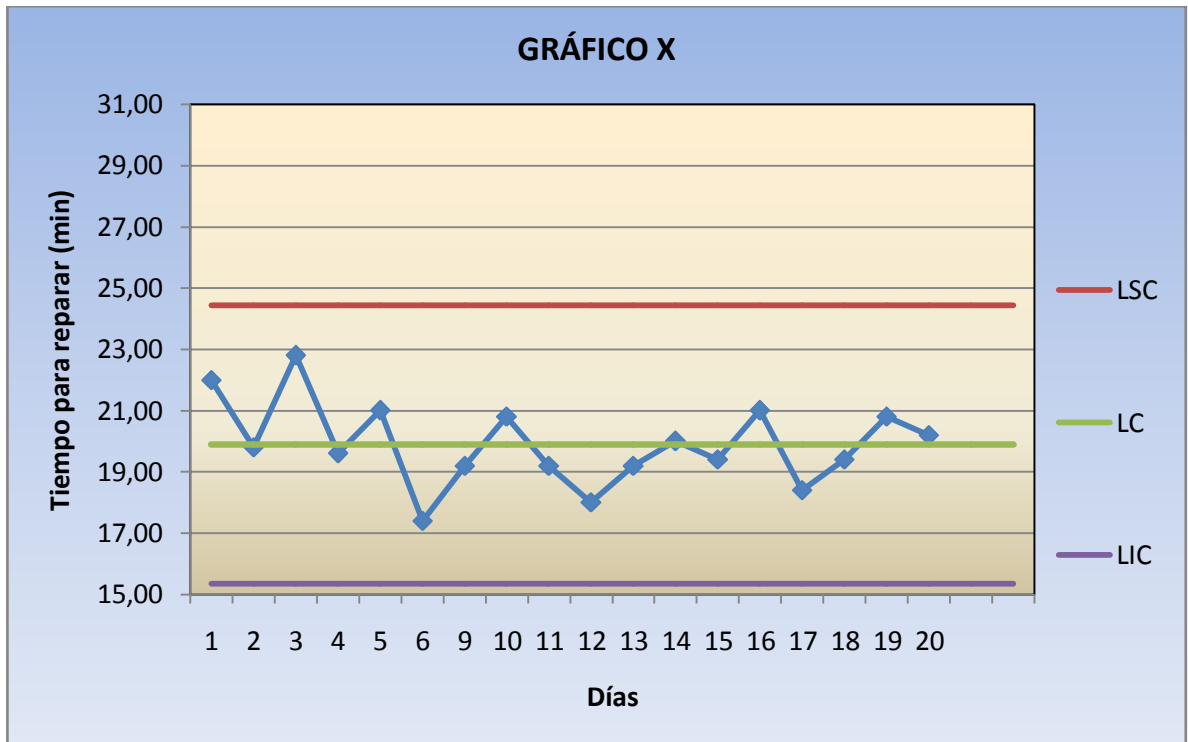
$$LSC_X = \bar{X} + A_2 \bar{R} = 24,45$$

$$LC_X = \bar{X} = 19,90$$

$$LIC_X = \bar{X} - A_2 \bar{R} = 15,35$$

Con estos valores se procede a dibujar el gráfico X el cual se puede ver en la figura 140.

Figura 140 Gráfico X con los valores corregidos



Dado que el proceso está bajo control se acepta estos valores como los estándar y se procede a estimar la desviación estándar:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} = 3,389$$