

**METODOLOGÍA DE SEIS SIGMA APLICADA A LA GESTIÓN DEL
MANTENIMIENTO EN LA EMPRESA DRUMMOND LTD.**

JEINER EDUARDO LÓPEZ LARA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2007**

**METODOLOGÍA DE SEIS SIGMA APLICADA A LA GESTIÓN DEL
MANTENIMIENTO EN LA EMPRESA DRUMMOND LTD.**

JEINER EDUARDO LÓPEZ LARA

**Monografía de Grado presentada como requisito para optar el título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

**Director: MILTON VILLAMIL SIMANCA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECANICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2007**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento:

A Dios por sus Bendiciones, a mi madre por su Inagotable Apoyo.

A Luna Sofía como Ejemplo, a mi Familia por creer en mí.

A mis amigos por toda su comprensión y apoyo que siempre me han brindado.

A Dios por sus Bendiciones.

A Mi madre por su Inagotable Apoyo.

A Luna Sofía como Ejemplo.

A mi Familia por creer en mí y,

A mis amigos por toda su comprensión y apoyo que siempre me han brindado

Al ingeniero Carlos Ramón González, por todo el empeño y compromiso que le imprime al programa.

A todos los profesores, porque me enseñaron la importancia de mejorar cada día y estar constantemente buscando ideas nuevas.

A todos mis compañeros, por compartir conmigo todas sus experiencias y haberme dado la oportunidad de compartir tantos momentos de alegría.

A la compañía Drummond Ltd., por su aporte y apoyo en la investigación sobre la aplicación de la metodología seis sigma a la gestión de mantenimiento.

A Milton Villamil Simanca, Ingeniero Mecánico y director de la siguiente monografía, por su orientación y aporte al conocimiento de la gestión del mantenimiento

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA | 21 |
| 1.1. RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA DRUMMOND COMPANY | 21 |
| 1.2. DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO EQUIPO MÓVIL CAT | 25 |
| 1.3. PERSONAL DE MANTENIMIENTO | 26 |
| 1.4. CLASE DE MANTENIMIENTO QUE SE REALIZA | 27 |
| 1.4.1. Planeación del Mantenimiento | 27 |
| 1.4.2. Ejecución del Mantenimiento | 27 |
| 1.4.3. Verificación del Mantenimiento | 28 |
| 1.4.4. Análisis del Mantenimiento | 28 |
| 1.5. INSTALACIONES DE LOS TALLERES | 28 |
| 1.6. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA QUE SE ESTÁ PRESENTANDO EN EL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO MÓVIL DE DRUMMOND LTD. | 30 |
| 1.7. EQUIPO | 40 |
| 1.7.1. Tractor de Oruga D11R-CAT | 40 |
| 1.8. FALLAS MÁS REPETITIVAS EN LA FLOTA DE TRACTORES D11R QUE OCASIONAN LA MALA DISPONIBILIDAD | 41 |
| 2. METODOLOGÍA SEIS SIGMA Y GESTIÓN DE MANTENIMIENTO | 52 |
| 2.1. SIGNIFICADO DE CALIDAD Y DE MEJORAMIENTO DE CALIDAD | 52 |
| 2.1.1. Dimensiones de la Calidad | 52 |
| 2.1.2. Terminología de la Ingeniería de Calidad | 58 |
| 2.1.3. La Ingeniería de Calidad | 58 |
| 2.2. BREVE HISTORIA DEL CONTROL Y MEJORAMIENTO DE CALIDAD | 61 |
| 2.2.1. Cronología de los Métodos de Calidad | 62 |
| 2.3. MÉTODOS DE CONTROL Y DE MEJORAMIENTO DE CALIDAD | 67 |
| 2.4. OTROS ASPECTOS DE CONTROL Y MEJORAMIENTO DE CALIDAD | 76 |
| 2.4.1. Filosofía de Calidad y Estrategias de Administración | 76 |
| 2.4.2. W. Edwards Deming | 76 |
| 2.5. SEIS SIGMA COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN DE CONTROL Y MEJORAMIENTO DE CALIDAD | 80 |
| 2.5.1. Historia de la Metodología Seis Sigma | 81 |
| 2.5.2. Los grandes cambios de Seis Sigma | 88 |
| 2.5.3. El nivel de Seis Sigma | 90 |
| 2.6. FILOSOFÍA Y ESTRATEGIA DEL SEIS SIGMA | 95 |
| 2.6.1. Equipo de Mejoramiento Continuo | 95 |
| 2.6.2. El Cinturón Negro (Black Belts) | 96 |

| | |
|---|-----|
| 2.6.3. El Cinturón Verde (Green Belts) | 96 |
| 2.6.4. El Primer Dan (Master Black Belts) | 96 |
| 2.6.5. Esponsor o Champions | 97 |
| 2.6.6. Líder de Implementación o Chief Executive Officer (CEO) | 97 |
| 2.7. ESTRATEGIAS DEL SEIS SIGMA | 97 |
| 2.7.1. Disposición de Cambio | 98 |
| 2.7.2. Despliegue de Objetivos | 98 |
| 2.7.3. Desarrollo del Proyecto | 99 |
| 2.7.4. Evaluación de Beneficios | 99 |
| 2.8. MÉTODOS ESTADÍSTICOS ÚTILES EN EL CONTROL Y MEJORAMIENTO DE CALIDAD CON EL ENFOQUE SEIS SIGMA | 100 |
| 2.8.1. Diagrama de Tallo y Hoja | 101 |
| 2.8.2. Variantes del Diagrama de Tallo y Hoja | 105 |
| 2.8.3. Distribución de Frecuencia y el Histograma | 108 |
| 2.8.4. Resumen numérico de datos | 112 |
| 2.8.5. Diagrama de Caja | 116 |
| 2.8.6. Distribuciones de Probabilidad | 120 |
| 2.8.7. Distribuciones discretas importantes | 127 |
| 2.8.8. Distribuciones Continuas importantes | 136 |
| 2.8.9. Algunas aproximaciones útiles | 155 |
| 2.9. MAIC (Medir, Analizar, Mejorar, Controlar) | 159 |
| 2.10. CONTROL DE LOS RESULTADOS | 163 |
| 2.11. GERENCIA DE MANTENIMIENTO | 167 |
| 2.11.1. Mantenimiento | 169 |
| 2.11.2. Mantenimiento Correctivo | 169 |
| 2.11.3. Mantenimiento Preventivo | 170 |
| 2.11.4. Mantenimiento Predictivo | 170 |
| 2.11.5. Gestión de Mantenimiento | 170 |
| 3. GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN EL MEJORAMIENTO DE LA DISPONIBILIDAD DE LOS EQUIPOS D11R-CAT EN LA EMPRESA DRUMMOND LTD. | 172 |
| 3.1. IMPORTANCIA DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO | 172 |
| 3.2. ENFOQUE DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO | 174 |
| 3.2.1. Programa de Reducción de Fallas por fugas hidráulicas | 175 |
| 3.2.2. Programa de Reducción de Fugas y Consumo de Refrigerante | 177 |
| 3.2.3. Disminuir las Fallas ocasionadas por desgaste de la Baquelita del Soporte del Capot de los D11R | 179 |
| 3.2.4. Disminuir el número de Fallas por Caída de las Bases del Sistema Supresor de Incendios | 179 |
| 3.2.5. Disminuir el número de Fallas por Caída de las Bases de las Luces de los Cilindros de Levante | 180 |
| 3.2.6. Ejecución de Programas de Trabajo en los PM | 181 |

| | |
|---|-----|
| 3.2.7. Aumentar vida útil de los Motores | 181 |
| 3.2.8. Programa de Control de Contaminación | 183 |
| 3.2.9. Mejora en los sellos frontal y trasero del aftercooler | 183 |
| 3.2.10. Mejora en los sellos de las bombas principal y auxiliar de refrigerante | 184 |
| 3.2.11. Fuga por los sellos de los radiadores | 184 |
| 3.2.12. Mejoras en los sellos de los cilindros de levante del Dozer | 185 |
| 3.2.13. Disminución de las fugas de gases de escape por tornillos de culata del manifold de escape | 185 |
| 3.2.14. Mejoras en los remaches de los soportes laterales en los condensadores del aire acondicionado | 186 |
| 3.2.15. Medición de los tiempos utilizados en los mantenimientos preventivos de los D11R y cálculo del MTBS | 186 |
| 3.2.16. Mejoras realizadas para lograr alcanzar los tiempos requeridos en el mantenimiento preventivo de los D11R | 190 |
| 4. ELEMENTOS PARA EL DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA | 192 |
| 4.1. ETAPA DE DEFINICIÓN DEL PROYECTO | 192 |
| 4.2. CRITERIOS DE LA ETAPA DE DEFINICIÓN | 192 |
| 4.3. ETAPA DE MEDICIÓN DEL PROYECTO | 196 |
| 4.3.1. Medición de la Organización | 196 |
| 4.3.2. Medida del nivel de Seis Sigma | 198 |
| 4.3.3. Evaluación de la medida de desempeño | 200 |
| 4.4. ETAPA DE MEJORAMIENTO DEL PROYECTO | 206 |
| 4.4.1. Análisis del modo y efectos de fallas potenciales | 206 |
| 4.4.2. Diseño experimental unifactorial | 207 |
| 4.4.3. Ajuste superficial de respuesta | 211 |
| 4.5. ETAPA DE ANÁLISIS DEL PROYECTO | 217 |
| 4.5.1. Diagrama de Pareto | 218 |
| 4.5.2. Diagrama de Causa y Efecto | 219 |
| 4.5.3. Prueba de Normalidad | 220 |
| 4.5.4. Prueba de Normalidad mediante el Método de Kolmogorov Smirnov Lilliefors | 220 |
| 4.6. ETAPA DE CONTROL DEL PROCESO | 223 |
| 4.6.1. Gráficos de Control univariados | 224 |
| 4.6.2. Fundamentos teóricos de los gráficos de control univariados por variables | 224 |
| 4.6.3. Recalculo de los límites de control | 229 |
| 4.6.4. Estimación de la desviación estándar de la población | 230 |
| 4.6.5. La FASE II o determinación de los límites de Control Estándar | 231 |
| 4.6.6. Longitud promedio de Corrida ARL | 233 |
| 4.6.7. Estados fuera de control | 236 |
| 4.6.8. Capacidad del proceso | 242 |
| 4.6.9. Fundamentos de los Gráficos de Control por atributos | 247 |

| | |
|---|-----|
| 4.6.10. Gráfico del Control Multivariado | 257 |
| 4.6.11. Gráfico de Control Multivariado para observaciones individuales | 259 |
| 4.6.12. Procedimiento por su elaboración | 259 |
| CONCLUSIONES | 273 |
| BIBLIOGRAFÍA | 278 |
| ANEXOS | 281 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Principales productores y exportadores de carbón del mundo | 24 |
| Tabla 2. Costos (USD\$) del mantenimiento y reparación de la flota D11R-CAT desde enero – julio 2007 | 37 |
| Tabla 3. Placa Tractor D11R-CAT | 40 |
| Tabla 4. Conversión: nivel en Sigma a partir de los DPMO | 94 |
| Tabla 5. Rendimiento semanal de una motoniveladora CAT-24H utilizada en las operaciones de minería del carbón a cielo abierto | 104 |
| Tabla 6. Diámetro interior de los anillos forjados para pistones (mm) | 110 |
| Tabla 7. Distribución de frecuencia del diámetro de los anillos para pistones | 111 |
| Tabla 8. Diámetros de las perforaciones (mm) del soporte del frame de un tractor de llanta 834B-Caterpillar | 117 |
| Tabla 9. Promedio de consumo de refrigerante | 178 |
| Tabla 10. Muestras de diferentes tiempos utilizados en la realización de los mantenimientos de los D11R en el mes de junio 2007 | 187 |
| Tabla 11. Diferentes tipos de mantenimientos preventivos utilizados en los D11R | 189 |
| Tabla 12. Cuadro Medidas del nivel de Seis Sigma | 202 |
| Tabla 13. Cuadro Información del tiempo de los tipos de mantenimiento preventivo de los equipos con diferentes grupos de técnicos | 205 |
| Tabla 14. Información de los tiempos en los mantenimientos preventivos de los equipos | 213 |
| Tabla 15. Asignación de los coeficientes de los contrastes ortogonales | 214 |
| Tabla 16. Análisis de varianza para el modelo polinomial | 215 |
| Tabla 17. Información de los tiempos en minutos de duración del mantenimiento con un grupo de cinco técnicos | 221 |
| Tabla 18. Construcción de la prueba de Kolmogorov Smirnov Lilliefors KSL | 222 |
| Tabla 19. Tiempos de los mantenimientos de los D11R | 232 |
| Tabla 20. Observaciones obtenidas para realizar control tomando como referencia los límites estándar del proceso | 239 |
| Tabla 21. Número de unidades no conforme por exceso de tiempo | 250 |
| Tabla 22. Número de unidades no conforme por exceso de tiempo | 252 |
| Tabla 23. Costos (USD\$) del mantenimiento y reparación de la flota D11R-CAT desde enero – agosto 2007 | 271 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Talleres de Mantenimiento de Equipo Móvil en la Mina Pribbenow | 29 |
| Figura 2. Tractor de Oruga D11R en Mantenimiento Preventivo | 30 |
| Figura 3. Disponibilidad de los D11R durante el período de Julio de 2006 a Junio de 2007 | 32 |
| Figura 4. Porcentaje de efectividad de los mantenimientos preventivos de la flota de los D11R desde julio 2006 – junio 2007 | 32 |
| Figura 5. Pareto de distribución de los tiempos Down en junio 2007 de los D11R | 33 |
| Figura 6. MTBS y MTTR de los D11R durante el período de junio 2006 a Junio 2007 | 35 |
| Figura 7. Costos de mantenimiento y reparación de la flota D11R-CAT. Enero a Julio 2007 | 38 |
| Figura 8. Tractor de Oruga D11R-Caterpillar utilizado en la minería del Carbón | 41 |
| Figura 9. Tubo de llenado del sistema del refrigerante en los D11R | 41 |
| Figura 10. Sellos de polímeros para los radiadores de los D11R | 42 |
| Figura 11. Esquema de la base del Capot de los D11R | 42 |
| Figura 12. Base del Capot de los D11R | 43 |
| Figura 13. Base de los pre-cleaner en los D11R | 43 |
| Figura 14. Esquema del soporte de las bases de las lámparas en los D11R | 44 |
| Figura 15. Soporte de las bases de las lámparas para los D11R | 44 |
| Figura 16. Esquema del manifold de escape para los D11R | 45 |
| Figura 17. Fuga por el manifold de Escape del motor de los D11R | 45 |
| Figura 18. Desgaste presente en los brazos de empuje y el trunnion D11R | 46 |
| Figura 19. Limalla presente en filtros y bombas hidráulicas en los D11R | 46 |
| Figura 20. Pines de los bastidores de los D11R | 47 |
| Figura 21. Foto de una fuga de gases de escape presente en un motor de D11R | 47 |
| Figura 22. Foto de un motor en reparación por fuga de gases de escape | 48 |
| Figura 23. Esquema de la base de los filtros de aceite motor D11R | 48 |
| Figura 24. Base de los filtros de aceite motor de los D11R | 49 |
| Figura 25. Condensador de A/C para los D11R | 49 |
| Figura 26. Manguera hidráulica D11R en mal estado | 50 |
| Figura 27. Las mangueras mal erutadas presentan roce con la estructura | 50 |
| Figura 28. Base del sistema contra-incendios de los D11R | 51 |
| Figura 29. Costos de la garantía de las transmisiones | 55 |

| | |
|---|-----|
| Figura 30. Distribuciones de las dimensiones críticas de las transmisiones | 57 |
| Figura 31. Entradas y salidas de un proceso de producción | 69 |
| Figura 32. Una carta de control típica | 69 |
| Figura 33. Diseños factoriales para el proceso de la figura 31 | 70 |
| Figura 34. Variantes del muestreo de aceptación | 73 |
| Figura 35. Diagrama de fase del uso de los métodos de la ingeniería de calidad | 74 |
| Figura 36. Aplicación de las técnicas de la ingeniería de calidad y la reducción sistemática de la variabilidad del proceso | 75 |
| Figura 37. Ciclo de Deming | 83 |
| Figura 38. Operacionalización del DMAMC | 83 |
| Figura 39. El concepto de Seis Sigma de Motorola | 86 |
| Figura 40. Cantidad Seis Sigma vs Rendimiento del proceso | 91 |
| Figura 41. Cuadro comparativo de la calidad tradicional, ISO9000 y el Método Seis Sigma | 99 |
| Figura 42. Diagrama de tallo y hoja de los datos del rendimiento de la motoniveladora CAT-24H de 450 HP de la tabla 5 | 103 |
| Figura 43. Diagrama de tallo y hoja ordenado para los datos del rendimiento de la motoniveladora CAT-24H | 105 |
| Figura 44. Gráfica punto-dígito de los datos del rendimiento de la motoniveladora CAT-24H | 108 |
| Figura 45. Histograma de los datos del diámetro de los anillos para pistones | 111 |
| Figura 46. Diagrama de caja de los datos del diámetro de las perforaciones de los alojamientos del frame de un tractor de llanta 834B-CAT de la tabla 8 | 117 |
| Figura 47. Diagramas de caja comparativos del índice de calidad para productos fabricados en tres plantas | 119 |
| Figura 48. Histograma generado por computadora de los datos de los anillos para pistones de la tabla 6 a) 20 clases b) 10 clases | 119 |
| Figura 49. Distribuciones de probabilidad: a) Caso discreto, b) Caso continuo | 120 |
| Figura 50. La distribución uniforme del ejemplo | 123 |
| Figura 51. La media de una distribución | 125 |
| Figura 52. Dos distribuciones de probabilidad con medias diferentes | 125 |
| Figura 53. Dos distribuciones de probabilidad con la misma media pero desviaciones estándar diferentes | 126 |
| Figura 54. Distribuciones binomiales para valores seleccionados de n y p | 130 |
| Figura 55. Distribuciones de probabilidad de Poisson para valores seleccionados de λ | 134 |
| Figura 56. La distribución normal | 138 |
| Figura 57. Áreas bajo la distribución normal | 138 |
| Figura 58. Cálculo de $p(x \leq 35)$ en el ejemplo ilustrativo | 140 |
| Figura 59. Distribución del diámetro de los ejes | 142 |
| Figura 60. Distribuciones exponenciales para valores seleccionados de λ | 145 |

| | |
|---|-----|
| Figura 61. La función de distribución exponencial acumulada | 147 |
| Figura 62. Distribuciones gamma para valores seleccionados de r y $\lambda = 1$ | 150 |
| Figura 63. Sistema redundante en estado de espera | 151 |
| Figura 64. Distribuciones de Weibull para valores seleccionados del parámetro de forma β y el parámetro de escala $\theta = 1$ | 153 |
| Figura 65. Aproximaciones de distribuciones de probabilidad | 158 |
| Figura 66. MAIC | 161 |
| Figura 67. Capacidad de proceso | 162 |
| Figura 68. Una manguera bien erutada puede durar hasta 10.000 horas | 175 |
| Figura 69. Esquema de enrutamiento de las mangueras para los D11R | 176 |
| Figura 70. Equipo para recuperar refrigerante | 178 |
| Figura 71. Soporte del capot del D11R | 179 |
| Figura 72. Bases de los tanques del sistema contra-incendios | 179 |
| Figura 73. Esquema de las bases de las luces de los cilindros de levante | 180 |
| Figura 74. Prueba de hermeticidad de los motores para los D11R | 182 |
| Figura 75. Filtro separador de agua | 182 |
| Figura 76. Respiradero del tanque del combustible | 183 |
| Figura 77. Condensador del sistema de aire acondicionado D11R | 186 |
| Figura 78. Cuadro Planeación de actividades | 193 |
| Figura 79. Cuadro Caracterización de un proceso | 194 |
| Figura 80. Cuadro Planeación del Proyecto del Departamento de Mantenimiento | 195 |
| Figura 81. Cuadro Mediciones de las diferentes actividades de la Organización | 197 |
| Figura 82. Proceso cuyo índice de capacidad $C_p = 2$ | 199 |
| Figura 83. Cuadro Plan de recolección de la información | 201 |
| Figura 84. Cuadro Criterios para determinar el valor del nivel Seis Sigma | 202 |
| Figura 85. Cuadro Variable problema y su caracterización | 203 |
| Figura 86. Cuadro Criterios del nivel de Seis Sigma | 204 |
| Figura 87. Cuadro Análisis del modo y efecto de falla potencial | 207 |
| Figura 88. Análisis de varianza para un diseño unifactorial | 209 |
| Figura 89. Diagrama de pareto | 218 |
| Figura 90. Histograma de frecuencia | 220 |
| Figura 91. Gráficos de control para la media, el rango de los tiempos del mantenimiento preventivo en los D11R-CAT | 235 |
| Figura 92. Límites de control una vez detectados los subgrupos con causas asignables en su comportamiento. Proceso bajo control estadístico | 237 |
| Figura 93. Gráfico del control del promedio | 240 |
| Figura 94. Gráfico de control del rango | 241 |
| Figura 95. Gráfico de control para la desviación estándar | 241 |
| Figura 96. Esquema de la capacidad de un proceso | 242 |

| | |
|---|-----|
| Figura 97. Límites de control inicial para las unidades no conformes | 251 |
| Figura 98. Información sometida a control tomando los límites estándar como referencia | 253 |
| Figura 99. Regiones de control elípticas y rectangulares para dos características de calidad evaluada en forma simultánea | 258 |
| Figura 100. Disponibilidad de los D11R durante el período de Septiembre 2006 y Agosto 2007 | 265 |
| Figura 101. MTBS y MTTR de los D11R durante el período de Agosto 2006 y Agosto 2007 | 266 |
| Figura 102. Serviré Accuracy de los D11R durante el período de Agosto 2006 y Agosto 2007 | 267 |
| Figura 103. Pareto distribución de los tiempos Down en agosto 2007 de los D11R | 268 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| ANEXO A. DISTRIBUCIÓN DISCRETA MÁS APLICADA | 282 |
| ANEXO B. DISTRIBUCIÓN CONTINUA MÁS UTILIZADAS | 283 |
| ANEXO C. TABLA DE KOLMOROV SMIRNOV LILLIEFORS | 285 |
| ANEXO D. DISTRIBUCIÓN DE MUESTREO | 286 |
| ANEXO E. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MODELO DE REGRESIÓN | 287 |
| ANEXO F. DISTRIBUCIÓN JI-CUADRADA | 288 |

RESUMEN

TITULO: METODOLOGÍA DEL SEIS SIGMA APLICADA A LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN LA EMPRESA DRUMMOND LTD.*

AUTOR: JEINER EDUARDO LOPEZ LARA**

PALABRAS CLAVES: Seis Sigma, Gestión, Mantenimiento, Modelo, Calidad.

DESCRIPCION O CONTENIDO: La presente Monografía contiene una propuesta para implementar un nuevo procedimiento, que permita llevar un efectivo control sobre las labores de mejoramiento continuo, en la gestión del Mantenimiento llevadas a cabo al interior de una empresa. La metodología propuesta es aplicable a cualquier empresa, y permite Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar las actividades del área del mantenimiento, bajo los lineamientos planteados por la metodología del seis sigma.

El procedimiento de investigación que sigue, empieza con la identificación de alguna ventana de oportunidad de mejoramiento de un proceso y la adquisición de información en alguna empresa, Lo cual permite concluir que efectivamente, se requiere la implementación de un modelo para optimizar la gestión de mantenimiento.

Posteriormente, esta información es tabulada e interpretada, para detectar el estado actual de la empresa analizada y confirmar la conveniencia de la aplicación de la metodología. Luego, y con base en los términos establecidos por el Seis Sigma, se elabora el modelo de aplicación, procurando cumplir las necesidades propias de cada empresa, pero respetando siempre sus políticas administrativas y técnicas ya establecidas. Además como complemento importante del modelo, se hace un análisis sobre las opciones disponibles para apoyarse en los sistemas de información, que permitan una más eficiente y confiable ejecución de la metodología.

Finalmente, y a manera de ejemplo se muestra la forma como se complementa el modelo en un caso hipotético pero concreto de una empresa aplicando el modelo.

* Monografía.

** Facultad de ingenierías Físico mecánicas, escuela de ingeniería mecanica, Especialización en gerencia de mantenimiento.

SUMMARY

TITLE: Six sigma apply to maintenance management in the company DRUMMOND LTD.*

AUTHOR: JEINER EDUARDO LOPEZ LARA**

MAIN WORDS: Six sigma, Management, Example, Quality.

DESCRIPTION OR CONTAINED: The following Monograph contains a proposal to implement a new procedure, which allows carrying an effective control about the task of continuous improvements in maintenance Management develops in a company.

The methodology suggest can be used in any company, and allows, to measure, to analyze, to improve and control the activities in Maintenance Area, under the Six Sigma Methodology.

The next following research, beings with the identification for an opportunity to improve a procedure and the information collect in any company, which definitely will allow concluding, needs to implement a model to make better the Maintenance Management.

Later, this information will be tabulated and read, to detect how the company is analyzed in this moment, to confirm the convenience for the company to implement this methodology. Then, based on Six Sigma terms, an application model is created, taking in to account the necessities of each company, and always keeping in mind the technical rules and administrative politics that the company has now.

Besides as an important model complement, an analysis is made using the system information as a resource to obtain the available options to allow a reliable performance of the methodology.

At the end, as an example it shows hypothetically the way to use this model in a company.

* Monograph.

** Facultad de ingenierías físico mecánicas, escuela de ingeniería mecanica, Especialización en gerencia de mantenimiento.

INTRODUCCIÓN

En la década de los ochenta, las empresas comenzaron a interesarse por el concepto de cero defectos como objetivo para el control de calidad. Este enfoque establece la meta de resultados que carezcan de error al 100 por ciento. La idea de un porcentaje de error aceptable es un paradigma remanente de la era del control de calidad.

En aquellos tiempos, se podían encontrar formas que justificaban estadísticamente las naturales fallas humanas, con la idea que nadie podía ser posible perfecto. De manera que si el 100% es inalcanzable, se conformaban con un 95%, entonces el alcanzar un 96% era motivo de celebración por haber superado los objetivos. Esto significaba que de 100 clientes que utilizan los servicios o productos variantes 5 quedaban por fuera del porcentaje de operaciones perfectas, convirtiéndose en clientes insatisfechos que no regresarían jamás.

Las empresas de finales de los ochenta han visto perder competitividad, mercado y utilidades día a día por haber estado anclada a paradigmas que ya no son validas dentro del nuevo esquema mundial.

La competencia desenfrenada de un mundo más interconectado e interdependiente, la velocidad tecnológica en la renovación informática y la difusión de la información en todas las organizaciones han puesto a los management acerca de la necesidad de adoptar una nueva mentalidad en la gestión de las empresas para hacer posible su continuidad y crecimiento y preocuparse más por sus clientes que por sí misma.

La llegada de una economía globalizada, con la participación de competidores nuevos hace acabar a las empresas no competitivas y obliga a todas aquellas que quieran sobrevivir a apoyar su actividad sobre una vigilancia atenta y permanente del mercado para ajustar siempre mejor la calidad de la respuesta que se le pide.

Desde que existe un proceso de calidad total y que ciertas economías lo han adoptado, todas aquellas que no lo han hecho han visto abrirse aceleradamente un abismo en su competitividad. Para ello, es bueno mencionar que el costo de la no-calidad en las economías occidentales están en el orden del 20% de su facturación, en tanto que la economías orientales se encuentran en el 12% no reducir rápidamente esta brecha y ante el crecimiento económico de países del sudeste asiático preanuncian inevitables derrotas a occidente.

Ante la circunstancia descrita, las empresas se han visto en la necesidad imperiosa de realizar un cambio total en su manera de gestionar los negocios, dando lugar ello a la metodología de Seis Sigma.

Seis sigma es una filosofía de trabajo de una estrategia de negocios, la cual se basa en el enfoque hacia el cliente, en un manejo eficiente de los datos y metodología y diseño robusto, que permite eliminar la variabilidad en los procesos y alcanzar un nivel de defectos menor o igual a 3.4 defectos por millón, reducción de los tiempos de ciclo, reducción de los costos, alta satisfacción de los clientes y más importante aun, efectos dramáticos en el desempeño financiero de la organización.

Aquellas empresas que han adoptado la metodología de Seis Sigma han alcanzado de manera significativa el alcance de sus metas financieras a través de la reducción de costo y una mejora en las utilidades usando técnicas estadísticas para reducir la variación de sus procesos por lo que el efecto obtenido es minimizar los errores y defectos virtualmente a cero.

Seis sigma no solo es una metodología que se aplique al mundo de la manufactura, esta metodología se puede aplicar a diferentes áreas y esto hará que se ahorren costos y que se mejore la calidad de los servicios y se propicia la mejora continúa.

A pesar de que estas normas no mencionan en concreto su aplicación en las actividades de mantenimiento, son perfectamente aplicables, pues el mantenimiento es un proceso, que podrá ser más eficiente y productivo mientras mejor sea la gestión que sobre él se haga.

El presente trabajo consiste en proponer una serie de acciones que permitan que las labores de mantenimiento puedan ser definidas, medida, analizada, mejorada, controlada bajo los lineamientos de la metodología de Seis Sigma. No se pretende forzar a las empresas cambiar su filosofía general, ni tampoco su filosofía de mantenimiento, se pretende que cada empresa implante este modelo de gestión de mantenimiento a su propio entorno, a su propia filosofía y a sus propias necesidades, cualquiera que sea su tamaño o su tipo de actividad.

Se pretende ser preciso y consistente en las propuestas genéricas y la vez flexible para que el modelo pueda ser adecuado a cada caso particular. Se pretende aportar una herramienta que ayude a un mejor desarrollo y control de las actividades, sin que exija a las empresas que renuncien a sus principios ni a sus procesos ya consolidados.

Esta monografía presenta una descripción de la situación que esta ocurriendo en el departamento de mantenimiento de la empresa DRUMMOND LTD, Colombia, en la cual la baja disponibilidad de la flota de los D11R-CAT produjo un efecto negativo en el desempeño de las actividades del departamento de mantenimiento y como esta situación afecto directamente otras áreas de la compañía.

En los primeros capítulos se hace una descripción de la empresa, su origen y sus inicios en la minería colombiana, donde se hace referencia del papel tan que ha desempeñado la compañía en el desarrollo de este sector de la economía. Posteriormente se identifican las oportunidades de mejoras presentes dentro de la empresa en su departamento de mantenimiento y la importancia de trabajar en soluciones y cambios para estas oportunidades.

La importancia de la metodología Seis Sigma y su relación con la Gestión de Mantenimiento es abordada en el capítulo dos, mostrándose las estrategias importantes para tener en cuenta en su aplicación.

Los métodos estadísticos utilizados en el control de los procesos y en el mejoramiento de la calidad, se desarrolla dentro de la monografía de una manera práctica y van enfocados a la aplicación de la gestión del mantenimiento.

La metodología de Seis Sigma aplicada a la gestión de mantenimiento dentro de la compañía DRUMMOND LTD, utilizando las herramientas que ofrecen los métodos estadísticos para su medición, análisis, mejora, y control de sus procesos de mantenimiento en la flota de los D11R – CAT, es lo que se quiere mostrar a manera de información didáctica de como es su aplicación y la importancia que esta metodología tiene en el mundo moderno.

1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

1.1. RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA DRUMMOND COMPANY

Drummond Company Inc., es una compañía familiar de naturaleza limitada fundada en 1935 por H. E. Drummond, un empresario emprendedor de Sipse (Alabama) que comenzó a operar su primera mina de carbón utilizando solo una mula y una vagoneta. Las primeras explotaciones tuvieron una producción inferior a 50.000 toneladas al año. Después del fallecimiento de H. E. Drummond a finales de los años 50, la dirección de la empresa paso a sus hijos, quienes se encargaron de llevarla hacia la visión y las metas que su padre tenía de ellas.

A comienzo de los años 70, la compañía empezó a penetrar en el mercado internacional y abrió oficinas comerciales en Japón, Italia, Gran Bretaña y Holanda. Drummond Company Inc. realizó importantes esfuerzos de expansión hasta convertirse en la mayor compañía minera de carbón a cielo abierto en Alabama (EEUU) y en una de las más grandes del mundo.

Drummond Company es el mayor productor de carbón coque comercial para fundición de los Estados Unidos, con una capacidad de producción de 750 mil toneladas anuales. Este mineral es utilizado en su gran mayoría para la producción de aceros usados en la industria automotriz y el sector de la construcción.

A mediados de los años 80, Drummond Company Inc. tomó la decisión de invertir en Colombia después de evaluar diversos proyectos carboníferos en el mundo. En 1989 su filial, Drummond Ltd; obtuvo del gobierno colombiano los derechos para la

exploración, explotación y exportación del carbón producido en el proyecto La Loma, en el área comprendida entre los municipios de El Paso, La Jagua de Ibérico y Chiriguana, ubicados en el departamento del Cesar, en la costa norte de Colombia. A esta área de explotación se le denomina Mina Pribbenow.

Sumando todas sus operaciones, la producción anual de Drummond Company Inc. superó los 20 millones de toneladas de los cuales más del 80 por ciento son de carbón colombiano. La empresa figura como una de las más grandes del mundo en movimiento de materiales, al extraer más de 120 millones de metros cúbicos de material estéril por año, una cantidad superior a la tierra removida para construir dos veces el Canal de Panamá.

El principal factor que determina la calidad del carbón esta directamente relacionada con su poder calorífico y asu vez con su proporción de contenido de carbono. De esta manera, los tipos de carbón se pueden calificar de menor a mayor contenido de carbono así: turbas, lignitos, subbituminosos, bituminosos térmicos, bituminosos coquizables y antracitas.

Dadas las condiciones de sedimentación, el carbón se encuentra en forma de capas o mantos intercalados con otros tipos de rocas como areniscas o arcillositas. Para efectos de la minería, estas intercalaciones entre mantos de carbón explotables se denominan material estéril.

Dependiendo de las características de las formaciones geológicas, la explotación del carbón puede llevarse a cabo mediante minería subterránea (en la que se extrae solo el carbón) o mediante minería a cielo abierto (en el que se extrae el mineral y el material estéril asociado). Este último tipo de explotación permite generalmente mayores volúmenes de producción a un menor costo.

El carbón ha sido una fuente de energía hace miles de años y ha sido comercializado internacionalmente desde la época del imperio romano. Su principal utilidad es la generación de calor, tanto en procesos productivos, en residencias y en usos comerciales, como para su transformación en energía eléctrica.

Muchos países dependen actualmente del carbón como fuente de aprovisionamiento de energía, debido a las siguientes características favorables como:

- **ABUNDANCIA:** El carbón es el combustible fósil con mayores reservas en el mundo.
- **SEGURIDAD:** El carbón es el combustible fósil mas seguro tanto para su transporte como para su almacenamiento y utilización.
- **PRECIO:** La abundancia garantiza la seguridad de los suministros del recurso a precios competitivos.
- **IMPACTO AMBIENTAL:** Con las tecnologías disponibles en la actualidad, puede quemarse el carbón limpiamente en todo el mundo.

Frente a la creciente demanda de energía en el mundo y en comparación con los demás combustibles fósiles, el carbón colombiano tiene perspectivas interesantes, dada la magnitud de sus reservas, su poder calorífico y sus niveles de azufre y cenizas.

Colombia registraba en el 2002 unas reservas probadas de carbón de 6267 millones de toneladas, lo que representa cerca de 80% de las reservas probadas de toda Suramérica. Parte de estos yacimientos se encuentran en zonas de montaña y su explotación se debe hacer mediante minería subterránea, pero debido a la forma artesanal como son explotadas, la mayoría de estas minas no

llegan a tener una producción de mil toneladas al año. Este carbón se extrae principalmente para satisfacer las necesidades energéticas de algunas industrias de las zonas aledañas, y en menor medida, para la generación eléctrica.

Por su parte, la casi totalidad del carbón que el país exporta está ubicado en el norte del país, en los departamentos de La Guajira y Cesar. En el centro de este último se encuentra el proyecto La Loma, explotado por Drummond Ltd.

Tanto las explotaciones de La Guajira como las del Cesar son minas a cielo abierto, comunicadas con los puertos de exportación por vía férrea. En el Cesar, también hay explotaciones diferentes a las de Drummond Ltd., que transportan el mineral por carretera.

El desarrollo de estos grandes proyectos mineros en esta área del país, destinados fundamentalmente a la exportación, permitieron que la producción de carbón en Colombia pasara de menos de cinco millones de toneladas al año antes de 1980 a cerca de 40 millones de toneladas en 2003. Este rápido crecimiento ha permitido que Colombia sea hoy uno de los principales exportadores de carbón en el mundo (ver tabla 1).

Tabla 1. Principales productores y exportadores de carbón del mundo.

| Year: 2006 | | | |
|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| Country | Consumption (Million Short Tons) | Production (Million Short Tons) | Difference |
| Australia | 150.1 | 391.0 | 240.9 |
| Indonesia | 23.9 | 142.3 | 118.4 |
| South Africa | 195.1 | 267.7 | 72.5 |
| China | 2,062.4 | 2,156.4 | 94.0 |
| Colombia | 3.2 | 59.2 | 56.0 |

Energy Information Administration
International Energy Annual 2006

Se realizaron todos los estudios geológicos, geotécnicos y de ingeniería necesarios para determinar la ubicación, inclinación, espesor, calidad de los mantos de carbón. Posteriormente, se empezó la parte de la planeación del desarrollo minero y la parte de la extracción del mineral.

En una etapa inicial, se delimitaron las áreas a intervenir, el frente de explotación, las maquinarias requeridas, la zona de ubicación de estéril y se programó la construcción de vías, campamentos y talleres de Mantenimiento.

Hoy en día la operación minera se desarrolla con una combinación de equipos y metodologías que continuamente se están mejorando e innovando para aumentar la eficiencia del ciclo productivo.

Para toda la operación minera se cuenta con equipos de avanzada tecnología Caterpillar que son utilizados para la remoción de material estéril y manipulación del carbón mineral, estos equipos son de vital importancia y su mantenimiento es responsabilidad del departamento de Mantenimiento de equipo móvil CAT (Caterpillar) de la empresa.

Debido al acelerado crecimiento en su capacidad de producción de 16 Millones de toneladas de carbón en el 2004 a 23 millones de toneladas en el 2007, por el aumento de la demanda del carbón en el mercado global, la compañía Drummond se ha visto en la obligación de incrementar el número de equipos, recursos humanos e infraestructura.

1.2. DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO EQUIPO MÓVIL CAT

El departamento de mantenimiento tiene la responsabilidad de todo el mantenimiento de los diferentes modelos y tipos de equipos Caterpillar que se utilizan en la mina.

El departamento esta dividido por tres grandes áreas como son:

- Camiones de Acarreo 777C, 785, 793B , 793C y 793D
- Equipos de Orugas D6, D9L, D10, D11N y D11R
- Equipos de Llantas 16G, 16H, 24H, 834,980G, 988B Y 992C

Cada área está conformada por personal especializado en los diferentes sistemas de los equipos que realizan todas las actividades del mantenimiento.

1.3. PERSONAL DE MANTENIMIENTO

Actualmente, DRUMMOND LTD. cuenta con tres turnos de trabajos integrados por personal técnico responsables del mantenimiento de los equipos: un superintendente del departamento de equipo móvil CAT, un asistente del superintendente, tres lideres de flotas dirigiendo cada una de las áreas en que esta dividido el departamento, varios planeadores encargados de la planeacion de los trabajos y el manejo de la información de los equipos y un grupo de supervisores senior y de líneas que coordinan todo el personal técnico que ejecuta la parte operativa del mantenimiento. La gran mayoría con conocimientos y experiencia en el campo de la minería.

Los responsables del mantenimiento de los equipos se encargan de realizar todas las reparaciones dentro de la empresa, de estructuras, mecánicas y eléctricas que se presenten. Los trabajos especializados (montajes, reparaciones) son contratadas con terceros.

La jornada de trabajo es 24 horas todos los días, incluyendo domingos y festivos y horas nocturnas porque la empresa trabaja los 30 días del mes, en dos turnos de 12 horas.

1.4. CLASE DE MANTENIMIENTO QUE SE REALIZA

Actualmente, se está llevando a cabo mantenimientos correctivos, preventivos y algo de predictivos para todos los equipos. Se realiza una descripción de los aspectos identificados, los cuales pueden servir para evaluar y presentar el modelo de gestión del mantenimiento con el enfoque de la metodología Seis Sigma.

1.4.1. Planeación del Mantenimiento

Situación actual:

- Se realiza programas de lubricación.
- Hay cronograma de paro de equipos.
- Hay instructivos de trabajo como manuales.
- Se cuenta con las herramientas necesarias para realizar los trabajos.
- Se analizan costos y tiempos de mantenimiento.
- Se realizan trabajos con planos y muestras originales para las medidas necesarias.
- Se tiene en cuenta a mantenimiento para la compra de equipos nuevos.

1.4.2. Ejecución del Mantenimiento

Situación actual:

- Hay tres grupos de técnicos de mantenimiento donde la gran mayoría tienen buena capacitación en equipos Caterpillar y una buena experiencia.
- Hay orden y aseo en la preparación del sitio de trabajo.
- Se cuenta con los elementos de protección personal (protección auditiva, guantes, protección visual y casco).
- Se presentan reportes escritos del estado de los equipos, y listas de chequeo (Revisión Pre-operacional).

- El área de trabajo cuenta con adecuada iluminación para realizar los trabajos.
- Hay un adecuado manejo de materiales y cargas.

1.4.3. Verificación del Mantenimiento

Situación actual:

- Se realizan auditorias de mantenimiento a terceros de los trabajos realizados.
- La información técnica, tal como catálogos y tablas técnicas, existe para los equipos más importantes.
- Se llevan indicadores de gestión de mantenimiento.
- Se usan formatos y sistemas de información de mantenimiento.
- Se realiza mantenimiento predictivos (únicamente análisis de aceites).
- Mucho personal de mantenimiento de la empresa no tiene conocimiento de programas de gestión de mantenimiento como TPM, RCM.
- No se cuenta con un programa de calibración de instrumentos de medición.

1.4.4 Análisis del Mantenimiento

Situación actual:

- No se realiza un diagnóstico e interpretación de la causa de las fallas.
- Se llevan registros de los trabajos realizados.
- Se realiza un seguimiento a la calidad y comportamiento de los repuestos.
- Existen hojas de vida de equipos.
- Hay realimentación de los trabajos realizados ya sea por el personal de la empresa o por terceros.

1.5. INSTALACIONES DE LOS TALLERES

- En la planta física hay buena disposición espacial de la maquinaria y espacio para circulación como se ve en la Figura 1.

- Se cuenta con un almacén para la distribución de herramientas y repuestos.
- El ambiente para el trabajo es aceptable; se cuenta con buena iluminación y ventilación. Como se ve en la Figura 2.
- No se cuenta con señalización para evacuación en casos de emergencia.

Figura 1. Talleres de Mantenimiento de Equipo Móvil en la Mina Pribbenow



Figura 2. Tractor de oruga D11R en Mantenimiento Preventivo



1.6. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA QUE SE ESTÁ PRESENTANDO EN EL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO MÓVIL DE DRUMMOND LTD.

La exportación de carbón representa para el país un posicionamiento en los mercados internacionales y un flujo importante de divisas. Drummond Ltd. ha sido, durante los últimos años, protagonista de la incursión de Colombia en los mercados de este mineral energético, ofreciendo un carbón de alta calidad, a un precio competitivo, y llevando a cabo inversiones en Colombia con el objetivo de ampliar su producción y hacerla más eficiente.

De esta manera, se espera que el país pueda seguir incrementando su participación en el mercado mundial con mayores beneficios, tanto para su economía como para sus clientes, quienes podrán contar con mayor disponibilidad de carbón de altas especificaciones.

El aumento en los programas de producción, conlleva a una reestructuración interna de los procesos, cambios en los procedimientos y formas de realizar las tareas, tanto del área de producción como en el departamento de mantenimiento, respuestas más rápidas del servicio de mantenimiento de los equipos, conservación de los estándares exigidos de calidad y la necesidad de buscar una nueva metodología de aplicación de mejoramiento continuo.

Debido a que éste es un negocio donde es primordial el tiempo de entrega del producto y con las calidades exigidas por el cliente, es obvio pensar que todo lo que ocurre dentro de una compañía, se ve reflejado en sus resultados en el mercado global.

Durante los años 2006 y 2007, se viene presentando un problema de baja disponibilidad en la flota de los D11R (ver figura 3). Esto ha afectado enormemente la producción de la compañía debido a la falta de utilización de estos equipos en la manipulación de material estéril dentro del proceso.

La baja confiabilidad de los tractores ha traído insatisfacción de los clientes internos que son los ingenieros de producción por que han tenido atrasos en sus programas de producción y se ha originado una mala imagen del Departamento de Mantenimiento en su eficiencia y eficacia en la realización de sus trabajos.

Figura 3. Disponibilidad de los D11R durante el período de julio 2006 – junio 2007

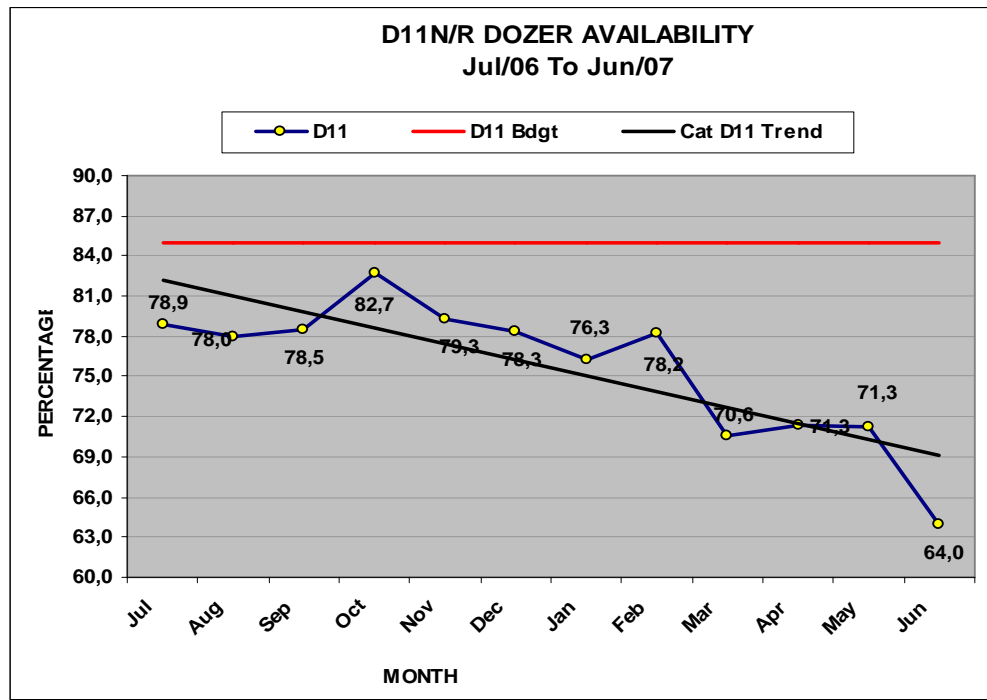
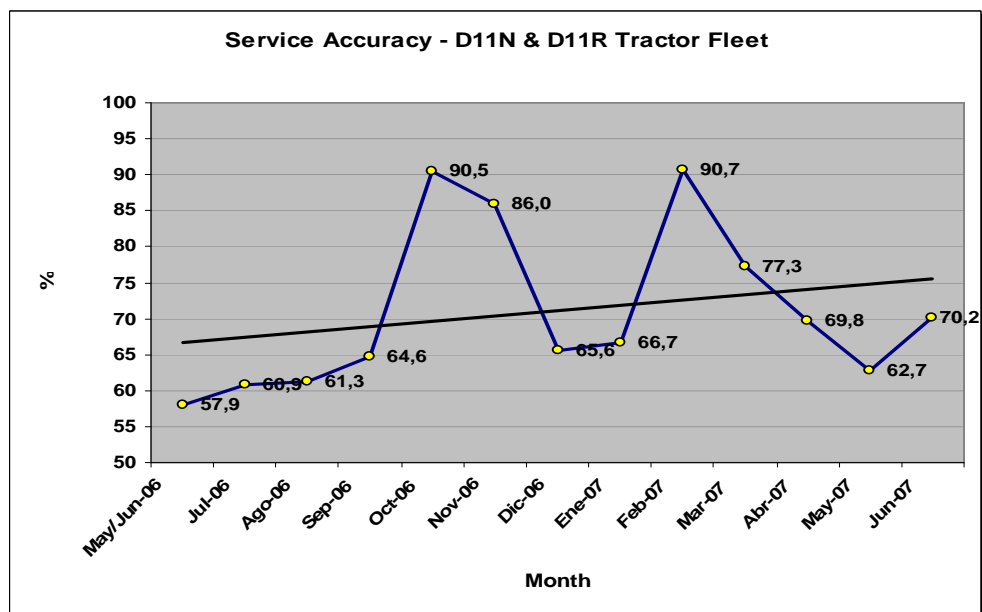


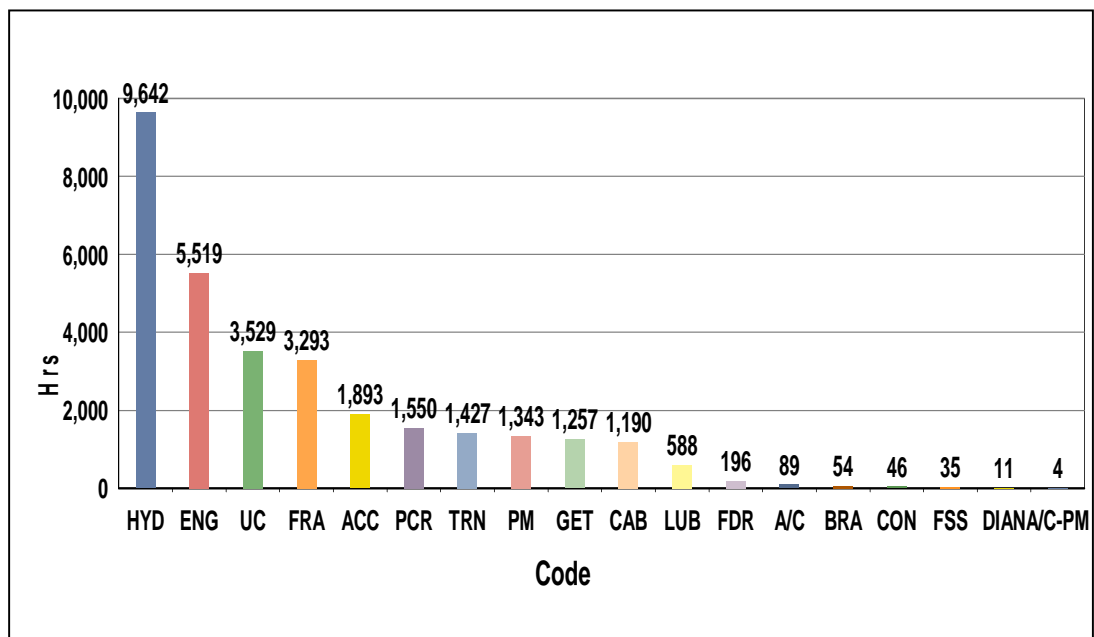
Figura 4. Porcentaje de efectividad de los mantenimientos preventivos de la flota de los D11R desde junio 2006 – junio 2007



Preocupados por descubrir las causas principales que originan esta disminución en la disponibilidad de la flota de los D11R-CAT, se procedió a utilizar la metodología de diagramas de Pareto cuyo objetivo principal es separar las razones que generan el ochenta por ciento (80%) de los problemas de calidad en los sistemas y las fallas asociadas a esos sistemas (Ver figura 5).

Esta situación es nada deseable para el departamento de Mantenimiento y afecta directamente el objetivo primordial de la compañía de cumplir su programa de producción de carbón.

Figura 5. Pareto de distribución de los tiempos Down en junio 2007 de los D11R



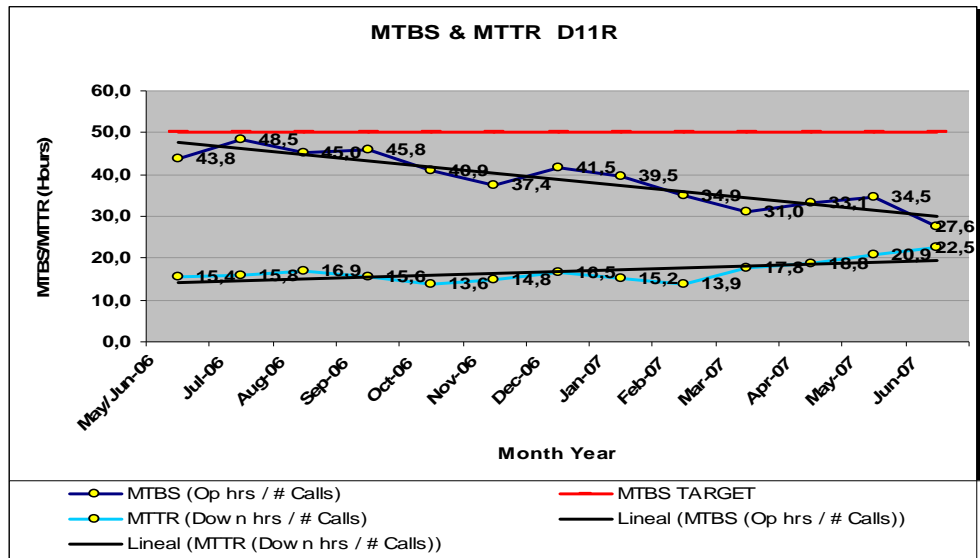
Haciendo un análisis detallado de los resultados del diagrama de Pareto (figura 5), se puede ver que el sistema que está ocasionando más fallas en los D11R, es el sistema hidráulico, seguido del motor, rodaje, grietas en las estructuras de los equipos y accidentes.

Las actividades como el programa de cambios de componentes (PCR) y los mantenimientos preventivos, ocupan lugares secundarios, situación indeseada para el departamento de mantenimiento en su filosofía de trabajos planeados.

Un departamento de Mantenimiento debe trabajar continuamente para que todas sus actividades se lleven de manera programada y las únicas actividades planeadas verdaderamente en el diagrama de Pareto son los mantenimientos preventivo (PM) y los cambios de componentes (PCR), el resto de fallas mostradas en el diagrama, son mantenimientos correctivos que han ocasionado pérdida de tiempo, retrabajos, aumento de los costos y una caída enorme de la disponibilidad de toda la flota, perjudicando a la producción de carbón directamente.

La oficina de planeación de mantenimiento debe tener el control de las actividades que se deben realizar a los equipos de forma preventiva y no tanto correctivas, podemos tener un gran departamento de planeación, con unas herramientas y software excelentes y con un grupo de profesionales capacitados con amplios conocimientos, pero si la calidad de los trabajos que fueron programados no son ejecutados por el personal de mantenimiento de forma adecuada, todos los esfuerzos por mantener indicadores ideales de mantenimiento como: disponibilidad, confiabilidad, tiempo medido entre fallas (MTBS), tiempo medido para reparaciones (MTTR), se convertirán en un gran esfuerzo perdido y conllevará a la situación que se presenta actualmente en la compañía.

Figura 6. MTBS Y MTTR de los D11R durante el período de Junio 2006 – Junio 2007



Analizando las fallas presentes en todos los sistemas, pudimos notar que la mayoría se presentan por trabajos que no fueron realizados cuando el equipo llegó para el mantenimiento preventivo y para la ejecución de sus Backlogs, en los talleres de mantenimiento.

Muchas veces, en revisiones Pre-operacionales que realiza el operador del equipo antes de iniciar sus labores cotidianas, encuentra fallas presentes que reporta al Departamento de Planeación para su futura reparación o si lo amerita la criticidad de la falla, se realiza inmediatamente por parte de técnicos mecánicos que llegan al área donde está el equipo y corrigen el defecto para que el equipo pueda operarse.

Como dijimos anteriormente, el departamento de mantenimiento realiza actividades que son programadas con anterioridad y es donde se le solicita el equipo al Departamento de Producción con suficiente tiempo para que ellos puedan programar los cambios necesarios en su programación y el equipo pueda

ser enviado sin ningún problema a la hora y fecha estipulada por el departamento de Mantenimiento para la realización ya sea del mantenimiento preventivo o para algún PCR pendiente de componentes.

Al momento de llegar el equipo a los talleres para su mantenimiento preventivo, muchas de las actividades que habían sido programadas por la oficina de planeación no pueden ser ejecutadas por varios motivos entre los cuales tenemos:

- Falta de técnicos suficiente para realizar el mantenimiento.
- Poco o demasiado tiempo para el mantenimiento, no se tiene un tiempo claro de ejecución para cada una de las tareas.
- Inadecuado distribución de las pautas o Check list para las actividades asignadas a cada técnicos, trabajan descoordinados. Unos con mayores tareas para ejecutar que otros.
- Existen 8 tipos de PM que se les realiza a los equipos D11R dependiendo las horas de trabajo de los aceites en los sistemas de los equipos, todos con diferentes actividades y diferentes tiempos. Estos tipos de PM son muy imprácticos y no van con la evolución del mantenimiento y las formas de hacer las cosas mejor. Fueron pautas que llevan mucho tiempo de aplicación y no han sido modificadas y modernizadas para su ejecución, y que puedan quedar acorde con las filosofías necesarias hoy en día.
- El incremento de equipos down por fallas imprevistas (mantenimiento correctivo) en diferentes áreas de trabajo en la mina, obligaba a suspender actividades en los equipos que se encuentran en los talleres en PM para poder suplir la necesidad de técnicos en esas áreas.
- Cuando el departamento de Producción tiene muchos equipos down, no entrega los equipos programados para el mantenimiento preventivo, ocasionando mayor desgaste e incremento de los riesgos de fallas en los componentes de estos equipos.

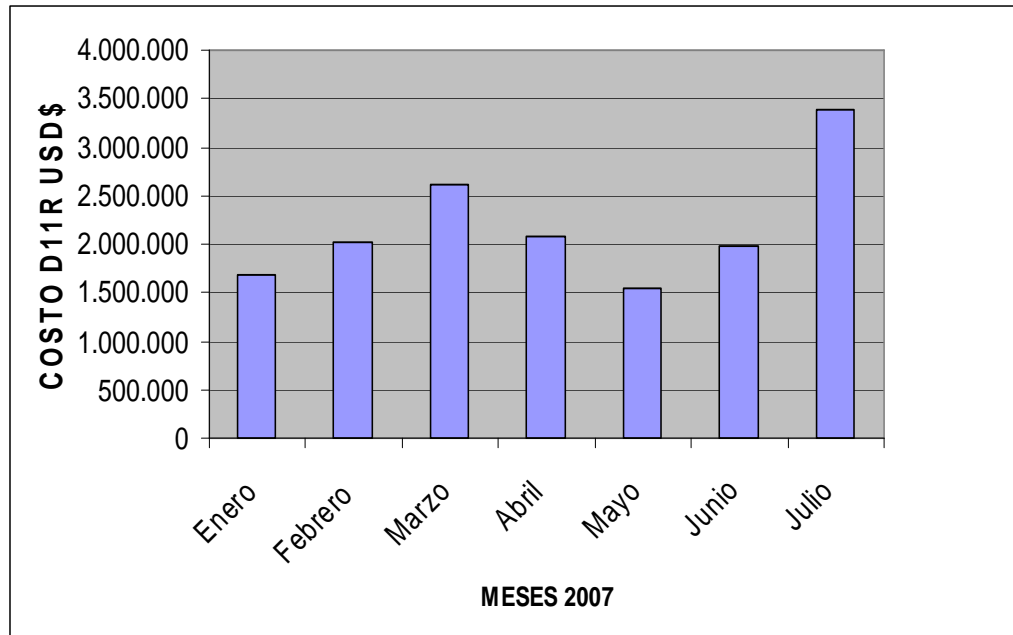
- Hay que suspender la totalidad de ejecución de tareas y backlogs de equipos que están en proceso del mantenimiento preventivo, para poder enviarlos a trabajar al área de producción del carbón, y así poder suplir la necesidad de cumplir con el programa de producción por la falta de equipos disponibles.
- La falta de partes y componentes en stock, también es un factor determinante para que no se puedan realizar los backlogs pendientes en los equipos. Muchas veces llegan los equipos y el repuesto solicitado con anterioridad, no ha llegado aun almacén y se obliga a mandar el equipo con el riesgo de que la pieza o el componente que no se cambio falle en plena operación del equipo, afectando la confiabilidad y la disponibilidad de la flota de los D11R.

Además de la mala disponibilidad presente en los D11R y la dificultad para cumplir con los programas de producción de carbón y con los compromisos adquiridos con los clientes externos, tenemos otra consecuencia preocupante debida a todos esos factores (causas) que acabamos de describir, como es el incremento de los costos del departamento de mantenimiento, desde el mes de enero a julio del 2007 (ver figura 7).

Tabla 2. Costos (USD\$) del mantenimiento y reparación de la flota D11R-CAT desde enero – julio 2007

| MESES 2007 | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| COSTOS D11R MANTENIMIENTO USD\$ | 1.679.955 | 2.025.723 | 2.610.686 | 2.087.694 | 1.540.639 | 1.982.995 | 3.386.850 |

Figura 7. Costos de mantenimiento y reparación de la flota D11R-CAT. Enero – Julio 2007



Como pueden notar, en el mes de julio se presentó el mayor incremento de los costos de todo el año, situación que preocupó demasiado a los inversionistas de la compañía a buscar las causas principales y darle soluciones a todos estos problemas presentes en el departamento de mantenimiento.

Formulación del problema presente:

¿Qué pasará si la disponibilidad continua disminuyendo y se sigue incrementando los costos de mantenimiento?

Toda actividad productiva genera unos impactos sobre la economía en la que se desarrolla. En general, la producción implica la utilización de mano de obra, equipos, materia prima (insumos) y medio ambiente. A su vez, los bienes producidos pueden tener como destino el mercado nacional o ser orientados hacia la exportación. Esta actividad comercial genera unos ingresos, que una vez cubiertos los costos, generan el valor agregado de la actividad productiva.

Siguiendo este orden de ideas, la actividad productiva de Drummond Ltd. se enmarca en este esquema.

Haciendo una comparación válida con el departamento de mantenimiento de la compañía en su participación en la economía de la empresa podemos formular la siguiente situación:

El incremento de los costos del departamento de mantenimiento en los meses de enero a julio del 2007, el riesgo de no corregir a tiempo las causas que están ocasionando la disminución de la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos D11R, equipos vitales para la producción de carbón en la compañía, y el atraso en el programa de producción de carbón para poder cumplir las exigencias del mercado, están poniendo en apuro el buen comportamiento que viene mostrando la compañía desde comienzo de sus operaciones en Colombia y puede llegar a tener dificultades en los mercados internacionales donde estos tipos de factores son vitales para medir que tan competitiva es la empresa.

Si las causas principales de las fallas presentes en los equipos que son las razones que ocasionan la baja disponibilidad de estos, no son corregidas en el mantenimiento preventivo, entonces se seguirá con el incremento de reportes de fallas en el campo (fallas imprevistas), retrabajos, aumento de horas down, paradas innecesarias, y utilización de hombres en trabajos no programados, etc.

Nuevamente al final del mes cuando el departamento de planeación haga el análisis de los indicadores de gestión del mantenimiento, se dará cuenta que la disponibilidad sigue disminuyendo, que los costos de mantenimiento están disparados y que las quejas por parte del departamento de producción se incrementan ostensiblemente.

Se esta en riesgo de perder clientes importantes en el mercado, porque sencillamente el atraso en los programas de producción evita cumplir con los requerimientos de los clientes siendo estos suplidos por la competencia.

Es a esta consecuencia que en un mercado global y competitivo, la empresa no se puede darse el lujo de ser permisible con esta situación porque llega a ser improductiva y con alto riesgo de quedar por fuera del mercado.

Es importante comentar que estos indicadores son analizados por los inversionistas de la compañía que seguramente estarán insatisfecho por la gestión de mantenimiento y bastante preocupados por el futuro que se espera.

Recordemos que la importancia del mantenimiento preventivo se fundamenta en que el equipo es detenido de forma programada y es llevado al taller bajo condiciones de tiempo y espacios controladas, garantizando que el equipo pueda trabajar en las condiciones requeridas para aumentar su confiabilidad y disponibilidad.

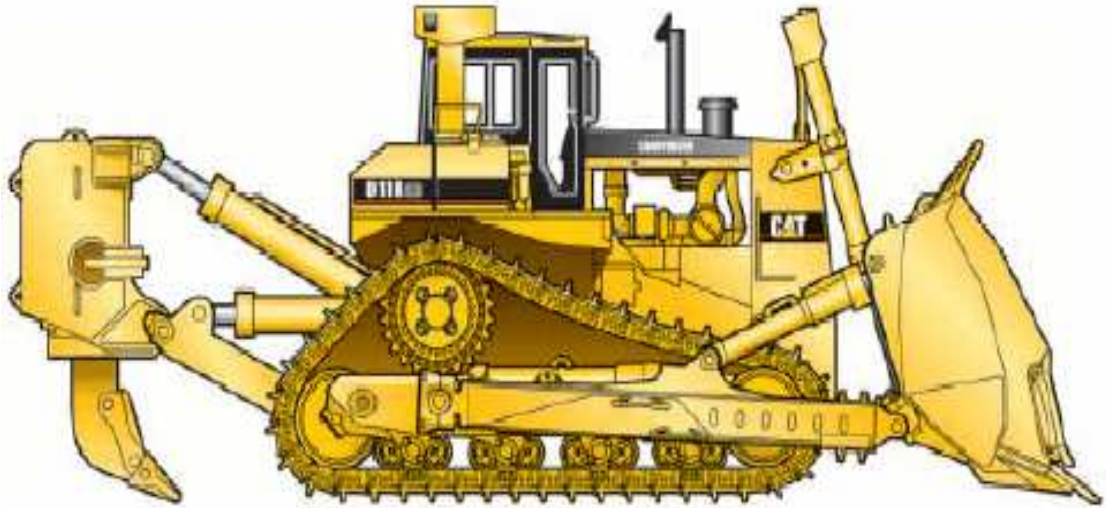
1.7. EQUIPO

1.7.1. Tractor de Oruga D11R-CAT

Tabla 3. Placa Tractor D11R-CAT

| | |
|-------------|-----------------------------|
| Marca | Caterpillar |
| Modelo | D11R |
| Tipo | Tractor de Oruga (buldózer) |
| Potencia | 935 hp |
| Capacidad | 34.4 m3 cúbicos |
| Combustible | Diesel |
| motor | 3508B |
| peso | 74182 Kg. |

Figura 8. Tractor de Oruga D11R-Caterpillar utilizado en la minería del carbón



1.8. FALLAS MÁS REPETITIVAS EN LA FLOTA DE TRACTORES D11R QUE OCASIONAN LA MALA DISPONIBILIDAD

- Fuga por sello frontal y trasero del aftercooler
- Fugas por tubo de llenado de Refrigerante.

Figura 9. Tubo de llenado del sistema del Refrigerante en los D11R



- Fuga por Bomba de Agua Principal y Auxiliar.
- Fugas por Sellos de Radiadores.

Figura 10. Sellos de polímeros para los Radiadores de los D11R



- Fugas por sellos de Cilindros de Levante del Dozer.
- Daño de la base del soporte del capot y precleaners.

Figura 11. Esquema de la Base del capot de los D11R

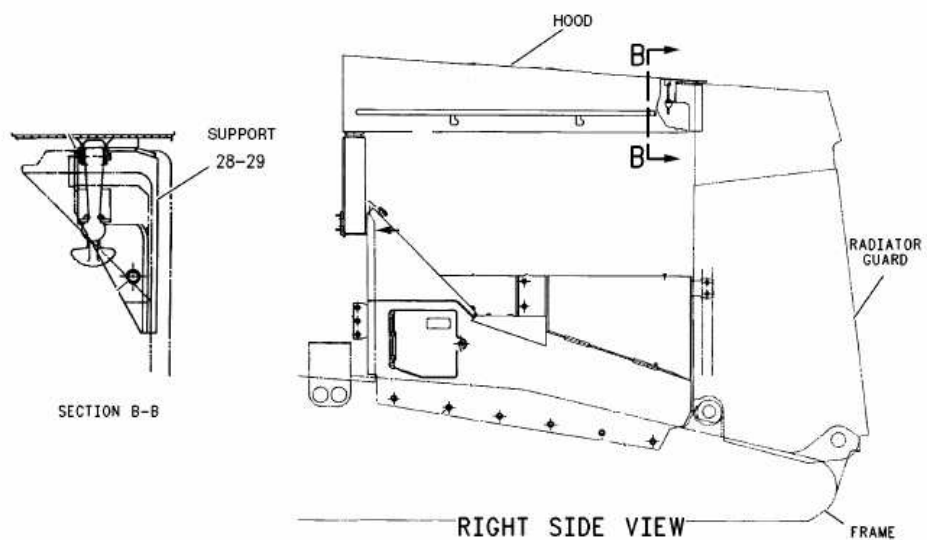


Figura 12. Base del capot de los D11R



Figura 13. Base de los pre-cleaner en los D11R



- Base de las lámparas de los cilindros de levante, se parten los tornillos debido a que la base es muy pesada.

Figura 14. Esquema del soporte de las Bases de las lámparas en los D11R

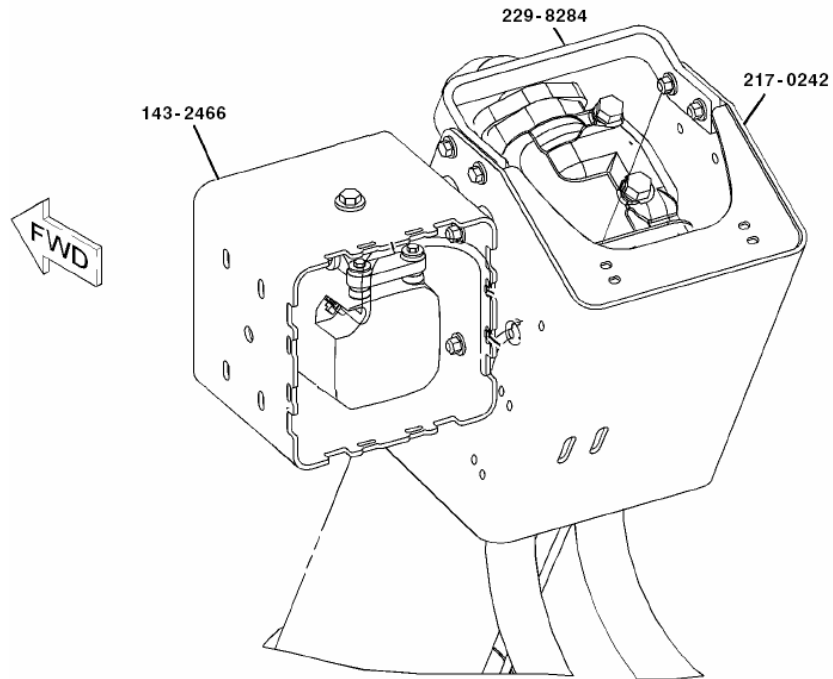
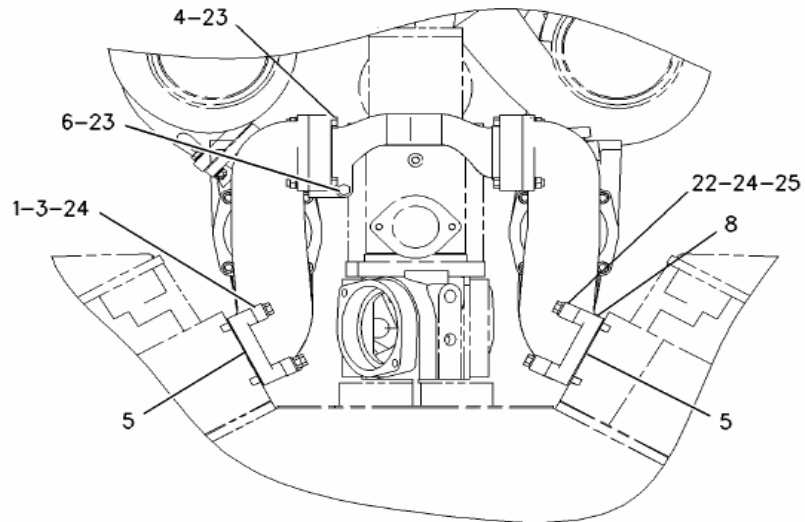


Figura 15. Soportes de las bases de las lámparas para los D11R.



- Fugas de Gases de Escape por Tornillos de culata del Manifold de Escape y causa la activación del sistema supresor de incendios

Figura 16. Esquema del manifold de escape para los D11R



FRONT VIEW

| REF NO | PART NUMBER | QTY | PART NAME |
|--------|-------------|-----|-----------------------|
| 3 | 5P-3961 | 4 | BOLT (3/8-16X2.5 IN) |
| 25 | 5P-3875 | 28 | BOLT (3/8-16X2.75 IN) |

Figura 17. Fuga por el manifold de Escape del motor de los D11R



➤ Desgaste excesivo de Brazos de Empuje y Trunnion

Figura 18. Desgaste presente en los brazos de empuje y el trunnion D11R.



- Problemas de contaminación del sistema hidráulico

Figura 19. Limalla presente en filtros y bombas hidráulicas en los D11R.



- Tiempo de vida de los Pines de los Bastidores reducidos en un 50%

Figura 20. Pines de los bastidores de los D11R



- Fuga por sellos de la barra equalizadora y/o sellos de eje pivote.
- Fuga de gases de Escape del motor

Figura 21. Foto de una fuga de gases de escape presente en un motor de D11R



Figura 22. Foto de un motor en reparación por fuga de gases de escape



- El Adapter de los filtros de aceite de motor se suelta y causa fuga de aceite por el filtro y se queda sin aceite el motor.

Figura 23. Esquema de la base de los filtros de aceite motor D11R

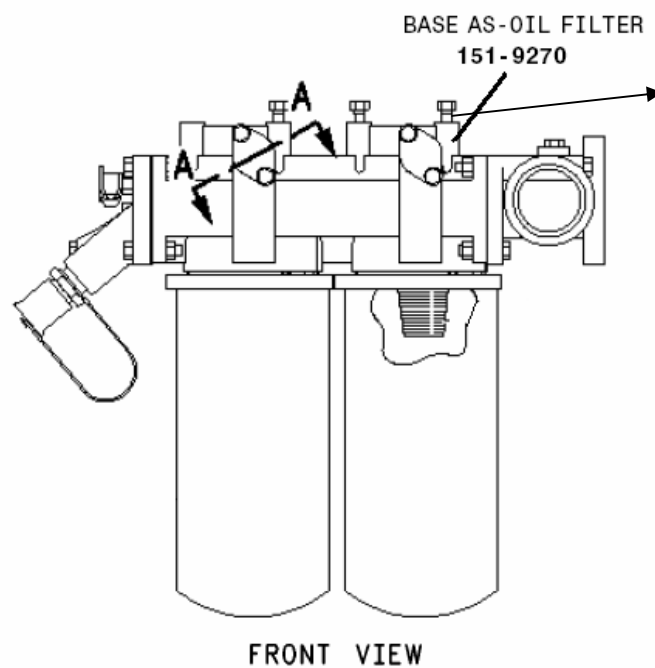
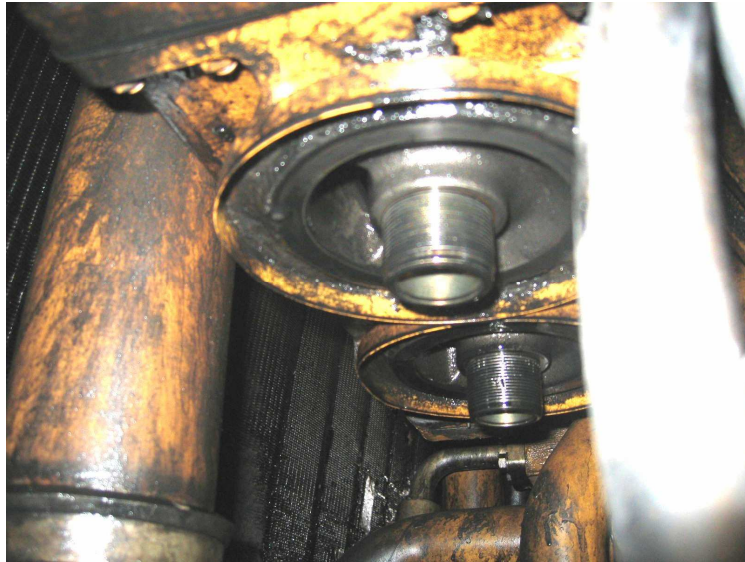
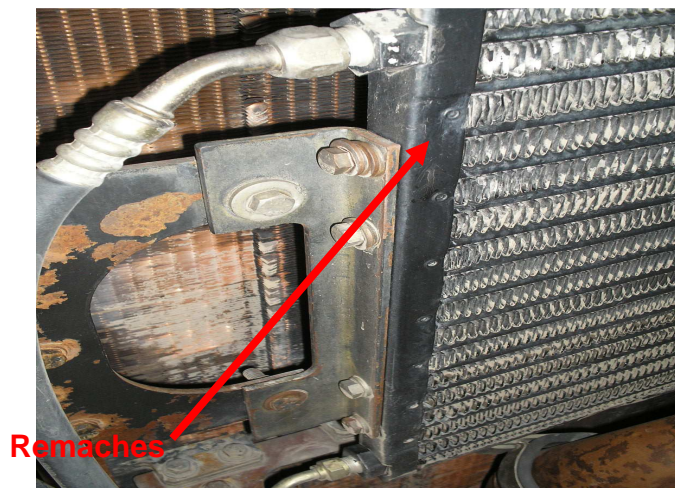


Figura 24. Base de los filtros de aceite motor de los D11R



- Fallas en los condensadores de Aire Acondicionado, con la vibración los remaches de los soportes laterales fallan, se golpean el serpentín y este se rompe.

Figura 25. Condensador de A/C para los D11R



- Una manguera mal erutada puede durar solamente 120 horas.

Figura 26. Manguera hidráulica D11R en mal estado



Figura 27. Las mangueras mal erutadas presentan roce con la estructura



- Disminuir el número de Fallas por Caída de las Bases del Sistema Supresor de Incendios.

Figura 28. Base del sistema contra-incendio de los D11R



2. METODOLOGÍA SEIS SIGMA Y GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

2.1. SIGNIFICADO DE CALIDAD Y DE MEJORAMIENTO DE CALIDAD

Hay muchas maneras de definir calidad. El concepto de calidad que se forma la mayoría de las personas se relaciona con una o más características deseables que debería poseer un producto o servicio. Aun cuando esta comprensión conceptual es ciertamente un buen punto de partida, se dará una definición más precisa y útil.

La calidad se ha convertido en uno de los factores de decisión más importantes de los consumidores para elegir entre productos y servicios que compiten. El fenómeno es generalizado, sin importar si el consumidor es un individuo, una organización industrial, una tienda, minorista o un programa de defensa militar. Por consiguiente, entender y mejorar la calidad es un factor clave que lleva al éxito de los negocios, al crecimiento y a una posición competitiva fortalecida. La calidad mejorada y la utilización exitosa de la calidad como una parte integral de la estrategia de negocios global redundan en un retorno sobre la inversión sustancial.

2.1.1. Dimensiones de la Calidad

Existen varias maneras de evaluar la calidad de un producto. Con frecuencia, es de suma importancia distinguir las diferentes dimensiones de la calidad. Resumiendo los puntos claves de estas dimensiones tenemos:

➤ **Desempeño** ¿Servirá el producto para el fin proyectado?

Los clientes potenciales suelen hacer la evaluación de un producto para determinar si puede desempeñar ciertas funciones específicas y qué tan bien

lo hace. Por ejemplo, podría hacerse la evaluación de varios paquetes de software de hojas de cálculo para PC a fin de determinar qué operaciones de manipulación de datos realizan. Podría descubrirse que uno de ellos tiene un desempeño superior con respecto a la velocidad de ejecución.

➤ **Confiabilidad** ¿Con qué frecuencia falla el producto?

Productos complejos, tales como muchos aparatos domésticos y de oficina, automóviles o aviones, generalmente requerirán alguna reparación en el curso de su vida de servicio. Por ejemplo, deberá esperarse que un automóvil necesite una reparación ocasional, pero si el automóvil requiere reparaciones frecuentes se dice que no es confiable. Se trata de una industria donde la dimensión de la confiabilidad en la calidad tiene un efecto muy importante sobre la percepción de la calidad por parte del cliente.

➤ **Durabilidad** ¿Cuánto tiempo dura el producto?

Se trata de la vida de servicio efectivo del producto. Los clientes quieren, obviamente, productos que tengan un desempeño satisfactorio durante un periodo de tiempo prolongado. De nueva cuenta, las industrias automotrices y de aparatos domésticos y de oficina son ejemplos de negocios en los que esta dimensión de la calidad es muy importante para la mayoría de los consumidores.

➤ **Facilidad de servicio** ¿Qué tan fácil es reparar el producto?

Hay muchas industrias en las que la percepción del cliente sobre la calidad recibe la influencia directa de la rapidez y la economía con que puede llevarse a cabo una actividad de mantenimiento de rutina o una reparación. Ejemplos incluyen las industrias de aparatos domésticos y de oficina y la automotriz así como muchos tipos de industrias de servicios (¿Cuánto tiempo le toma a una compañía de tarjetas de crédito corregir un error en una cuenta?).

➤ **Estética** ¿Cómo luce el producto?

Se trata del atractivo visual del producto con frecuencia tomando en consideración factores tales como el estilo, color, forma, alternativas del empaque, características táctiles y otros aspectos sensoriales. Por ejemplo, los fabricantes de refrescos se han apoyado en el atractivo visual de sus envases para diferenciar su producto de la competencia.

➤ **Características incluidas** ¿Qué hace el producto?

En general, los clientes asocian la alta calidad con los productos que tienen incluidas características adicionales es decir que tienen características que superan el desempeño básico de la competencia. Por ejemplo, podría considerarse que un paquete de software de hoja de cálculo es de calidad superior si tiene integradas funciones de análisis estadístico mientras que sus competidores no las incluyan.

➤ **Calidad percibida** ¿Cuál es la reputación de la compañía o de su producción?

En muchos casos, los clientes se basan en la reputación pasada de la compañía respecto de la calidad de sus productos. En esta reputación influyen de manera directa las fallas del producto que son muy visibles para el público o que requieren la devolución del mismo, así como el trato que recibe el cliente cuando informa de un problema relacionado con la calidad del producto. La calidad percibida, la lealtad del cliente y los negocios repetidos están estrechamente interconectados. Por ejemplo, si uno hace viajes de negocios regulares utilizando una aerolínea particular, y el vuelo casi siempre llega a tiempo y el personal de la aerolínea no extravía ni daña el equipaje, uno probablemente preferirá volar en esa compañía que con sus competidores.

➤ **Conformidad con los estándares** ¿El producto se fabrica exactamente como lo proyectó el diseñador?

Es común considerar que un producto es de alta calidad cuando cumple puntualmente con los requerimientos que se le asignan. Por ejemplo, ¿Es adecuado el ajuste del cofre de un automóvil nuevo? ¿Su nivelación con la altura de las salpicaderas es perfecta, y el espacio entre el cofre y las salpicaderas es exactamente el mismo en todas partes? Las partes manufacturadas que no cumplen de manera exacta con los requerimientos del diseñador pueden causar serios problemas de calidad cuando se usan como componentes de un ensamblaje más complejo. Un automóvil se compone de varios miles de partes. Si cada una de ellas es un poco más grande o más pequeña, muchos de los componentes no encajarán entre sí adecuadamente, y el vehículo (o sus subsistemas principales) quizá no tengan el desempeño proyectado por el diseñador.

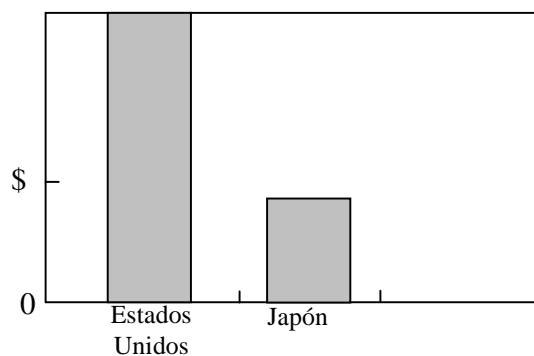
Definición

Calidad significa adecuación para uso.

Definición

La **calidad** es inversamente proporcional a la variabilidad.

Figura 29. Costos de la garantía de las transmisiones.



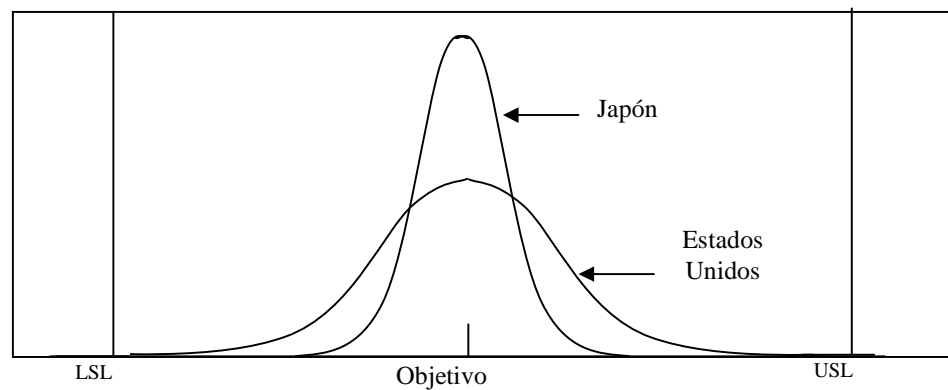
Obsérvese que esta definición implica que si la variabilidad de las características importantes de un producto disminuye, la calidad del producto aumenta. Como un ejemplo, de la efectividad operativa de esta definición, hace algunos años, una de las compañías automotrices de Estados Unidos realizó un estudio comparativo de una transmisión que se fabricaba en una planta local y la de un proveedor japonés. Un análisis de las garantías reclamadas y los costos de la reparación indicó que había una notable diferencia entre las dos fuentes del producto, siendo mucho menores los costos de las transmisiones fabricadas en Japón, como se muestra en la figura 29. Como parte del estudio para descubrir la causa de esta diferencia en el costo y el desempeño, la compañía seleccionó muestras aleatorias de transmisiones de cada planta, las desarmó y midió varias características críticas de la calidad.

La figura 30 es, en términos generales representativa de los resultados de este estudio. Obsérvese que la distribución de las características críticas de las transmisiones fabricadas en Estados Unidos ocupa casi 75% de la anchura de las especificaciones, lo cual implicaría que se producirían muy pocas unidades disconformes. De hecho, la planta estaba operando en un nivel de calidad que era bastante bueno, basado en la idea de calidad aceptada generalmente en la compañía. Sin embargo, la planta japonesa producía transmisiones para las que las mismas características críticas ocupaban apenas 25% de la banda de las especificaciones. Como resultado, existe una variabilidad sensiblemente menor en las características críticas de la calidad de las transmisiones fabricadas en Japón en comparación con las fabricadas en Estados Unidos.

Hay dos preguntas obvias aquí: ¿Por qué obraron así los japoneses? ¿Cómo lo hicieron? La respuesta de la pregunta “por qué” es evidente al examinar la figura 29. La variabilidad reducida se induce directamente en costos más bajos. Además, las transmisiones fabricadas en Japón hacían los cambios de velocidades con

mayor suavidad, operaban con menos ruido, y el cliente las percibía como superiores a las fabricadas en Estados Unidos. Menos reparaciones y menos garantías reclamadas significan menos **reprocesamiento** y la reducción del tiempo, esfuerzo y dinero desperdiciados. Por tanto, la calidad en realidad es inversamente proporcional a la variabilidad. Además, puede comunicarse con mucha precisión en un lenguaje que todos entienden, a saber, dinero.

Figura 30. Distribuciones de las dimensiones críticas de las transmisiones.



¿Cómo lograron hacer esto los japoneses? La respuesta se encuentra en el uso sistemático y efectivo de los métodos que se describen a continuación, la cual lleva también a la siguiente definición de mejoramiento de calidad. El mejoramiento de calidad es la reducción de la variabilidad en procesos y productos.

Definición

El **mejoramiento de calidad** es la relación de la variabilidad en proceso y producto

La variabilidad excesiva en el desempeño de los procesos suele resultar en desperdicio. Por ejemplo, considérese el desperdicio de dinero, tiempo y esfuerzo que se asocia con las reparaciones representadas en la figura 29. Por lo tanto,

una definición alternativa y de gran utilidad es que el mejoramiento de calidad es la reducción del desperdicio. Esta definición es particularmente efectiva en las industrias de servicios, donde quizás no haya tantos elementos que puedan medirse directamente (como las dimensiones críticas de las transmisiones de la figura 30). En las industrias de servicios, un problema de calidad puede ser un error o una equivocación, cuya corrección requiere esfuerzo y gastos. Mediante el mejoramiento del proceso del servicio pueden evitarse estos esfuerzos y gastos desperdiciados.

2.1.2. Terminología de la Ingeniería de Calidad

Todo producto posee varios elementos que describen en conjunto la idea que se forma el usuario o consumidor de la calidad. Es común llamar a estos parámetros características de la calidad. Las características de la calidad pueden ser de varios tipos:

- **Físicas:** Longitud, peso, voltaje, viscosidad.
- **Sensoriales:** Sabor apariencia, olor.
- **Orientadas al tiempo:** Confiabilidad, durabilidad, facilidad de servicio.

2.1.3. La Ingeniería de Calidad

Es el conjunto de actividades operativas, administrativas y de ingeniería que emplea una compañía a fin de asegurar que las características de la calidad de un producto se encuentran en los niveles nominales o requeridos. Las técnicas discutidas constituyen una gran parte de la metodología básica que utilizan ingenieros y otros profesionales técnicos para alcanzar estas metas.

La mayoría de las organizaciones encuentran difícil (y costoso) ofrecer al cliente productos con características de la calidad que sean siempre idénticas de una unidad a otra o que estén en niveles que cumplan con las expectativas del consumidor. La razón principal de ello es la variabilidad. En cualquier producto hay

cierta cantidad de variabilidad; por consiguiente, dos productos no siempre son idénticos. Por ejemplo, el espesor de los alabes del impulsor de un motor de turbina no es idéntico ni siquiera en el mismo impulsor. El espesor de los alabes siempre diferirá entre un impulsor y otro. Si esta variación en el espesor de los alabes es pequeña, quizás no tenga ningún impacto sobre el consumidor. Sin embargo, si la variación es grande, el cliente puede percibir la unidad como indeseable e inaceptable. Las fuentes de esta variabilidad incluyen las diferencias en los materiales, las diferencias en el desempeño y operación del equipo de manufactura y las diferencias en la manera en que los operadores realizan sus trabajos. Esta línea de pensamiento llevó a la definición anterior de mejoramiento de calidad.

Puesto que la variabilidad sólo puede describirse en términos estadísticos, los métodos estadísticos juegan un papel central en los esfuerzos de mejoramiento de calidad. Cuando se aplican métodos estadísticos en la ingeniería de calidad, es muy común clasificar los datos sobre las características de la calidad como datos de atributos o bien de variables. Los datos de variables son, por lo general, mediciones continuas como longitudes, voltajes o viscosidades. Por otra parte, los datos de atributos son por lo general datos discretos, que asumen con frecuencia la forma de conteos. Se describirán las herramientas de la ingeniería de calidad basadas en la estadística que se utilizan para trabajar con ambos tipos de datos.

Frecuentemente las características de la calidad se evalúan con relación a especificaciones. Para un producto manufacturado, las especificaciones son las mediciones deseadas de las características de la calidad en los componentes y subensamblajes que constituyen el producto, así como los valores deseados para las características de la calidad en el producto final. Por ejemplo, el diámetro de una flecha usada en una transmisión automotriz no puede ser demasiado grande porque no cabrá en el cojinete de acoplamiento, y tampoco puede ser demasiado

pequeño, porque resultará en un ajuste holgado que producirá vibración, desgaste y una falla prematura del ensamblaje. En las industrias de servicios, es típico hacer las especificaciones en términos de la cantidad máxima de tiempo para procesar un pedido o proporcionar un servicio dado.

Al valor de una medición que corresponde con el valor deseado para esa característica de la calidad se le llama el valor objetivo o nominal de dicha característica. Estos valores objetivos suelen estar acotados por un rango de valores que, la mayoría de las veces, se considera que estarán lo suficientemente cerca del objetivo como para no impactar el funcionamiento o desempeño del producto si la característica de la calidad se encuentra en ese rango. Al valor máximo permitido de una característica de la calidad se le llama el límite superior de la especificación (USL, por sus siglas en inglés) y al valor mínimo permitido de una característica de la calidad se le llama el límite inferior de la especificación (LSL, por sus siglas en inglés). Algunas características de la calidad tienen límites de las especificaciones en un solo lado del objetivo. Por ejemplo, es probable que la resistencia a la compresión de un componente usado en la defensa de un automóvil tenga un valor objetivo y un límite inferior de la especificación, pero no un límite superior de la especificación.

Las especificaciones son generalmente el resultado del proceso de diseño de ingeniería del producto. Tradicionalmente, los ingenieros de diseño llegan a una configuración del diseño del producto mediante el uso de los principios científicos de la ingeniería, lo cual suele resultar en la especificación por parte del diseñador de los valores objetivo de los parámetros críticos del diseño. Se procede entonces a la construcción y prueba del prototipo. Esta prueba con frecuencia se hace de manera no estructurada, sin el uso de procedimientos de diseño experimental con una base estadística y sin mucha interacción o conocimiento de los procesos de manufactura que deben producir las partes componentes y el producto final. Sin

embargo, mediante este procedimiento general, el ingeniero de diseño determina generalmente los límites de las especificaciones. Entonces, el producto final se libera para su fabricación. Hacemos referencia a este enfoque del diseño como el enfoque asistemático.

Los problemas con la calidad del producto suelen ser mayores cuando se utiliza el enfoque asistemático en el diseño. Sin este enfoque, las especificaciones con frecuencia se establecen sin tomar en consideración la variabilidad inherente que existe en materiales, procesos y otras partes del sistema, lo cual resulta en componentes o productos que son disconformes; es decir, que dejan de cumplir con una o más de sus especificaciones. A un tipo específico de falla se le llama disconformidad. Un producto disconforme no es necesariamente inapropiado para su uso; por ejemplo, un detergente puede tener una concentración del ingrediente activo que esté abajo del límite inferior de la especificación, pero aún así puede tener un desempeño aceptable si el consumidor utiliza una cantidad mayor del producto. Un producto disconforme se considera defectuoso si tiene uno o más defectos, que son disconformidades que son suficientemente graves para afectar de manera importante la seguridad o el uso efectivo del producto. Obviamente, el fracaso por parte de la compañía para mejorar sus procesos de manufactura también puede causar disconformidades y defectos.

2.2. BREVE HISTORIA DEL CONTROL Y MEJORAMIENTO DE CALIDAD

La calidad ha sido siempre parte integral de virtualmente todos los productos y servicios. Sin embargo, nuestra conciencia de su importancia y la introducción de métodos formales de control y mejoramiento de calidad han tenido un desarrollo evolutivo. En la siguiente tabla, se presenta la cronología de algunos hitos importantes en este proceso de evolución. Se discutirán brevemente algunos de los eventos de esta cronología.

2.2.1. Cronología de los métodos de calidad

- 1700-1900 La calidad se determina en gran medida por los esfuerzos de los artesanos individuales. Eli Whitney introduce las partes estandarizadas intercambiables para simplificar el ensamble.
- 1875 Frederick W. Taylor introduce los principios de la 'Administración científica' para dividir el trabajo en unidades más pequeñas que pueden llevarse a cabo con mayor facilidad, el primer enfoque para abordar los productos y procesos más complejos. El interés se tentaba en la productividad Gilbreth y Gantt hicieron aportaciones posteriores.
- 1900-1930 Henry Ford introduce, con la línea de ensamblaje, un refinamiento adicional con los métodos de trabajo a fin de mejorar la productividad y la calidad; Ford desarrolló conceptos de ensamblaje a prueba de errores, la autoverificación y la inspección dentro del proceso.
- 1901 Se establecen en Gran Bretaña los primeros laboratorios de estándares.
- 1907-1908 AT & T inicia la inspección y prueba sistemática de productos y materiales.
- 1908 W. S. Gosset (bajo el seudónimo "Student") introduce la distribución t , resultado de su trabajo en el control de calidad en la Cervecería Guinness.
- 1915-1919 WWI; el gobierno británico inicia un programa de certificación de proveedores.
- 1919 Se funda en Inglaterra la Asociación de Inspección Técnica; posteriormente se convierte en el Instituto de Aseguramiento de Calidad.
- 1920 Los Laboratorios Bell de AT & T forman un departamento de calidad, centrándose en la calidad, la inspección y las pruebas, y en la confiabilidad del producto.

- B. P. Dudding emplea métodos estadísticos en General Electric de Inglaterra para controlar la calidad de las bombillas eléctricas.
- 1922-1923 R. A. Fisher publica una serie de escritos fundamentales sobre experimentos diseñados y su aplicación en las ciencias agrícolas.
- 1924 W. A. Shewhart introduce el concepto de carta de control en un memorándum técnico de los Laboratorios Bell.
- 1928 H. F. Dodge y U. G. Romig desarrollan y perfeccionan la metodología del muestreo de aceptación en los Laboratorios Bell.
- 1931 W. A. Shewhart publica *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, donde se describen métodos estadísticos para usarlos con los métodos de cartas de producción y control.
- 1932 W. A. Shewhart dicta conferencias sobre métodos estadísticos de cartas de producción y control en la Universidad de Londres.
- 1932-1933 La industria textil y de la lana en Gran Bretaña y la industria química en Alemania inician el uso de experimentos diseñados para el desarrollo de productos y procesos.
- 1933 La Real Sociedad de Estadística instituye la Sección de Investigación Industrial y Agrícola.
- 1938 W. E. Deming invita a Shewhart a presentar seminarios sobre las cartas de control en la Escuela de Graduados del Departamento de Agricultura de Estados Unidos.
- 1940 El Departamento de Guerra de Estados Unidos publica una guía para usar cartas de control en el análisis de datos de procesos.
- 1940-1943 Los Laboratorios Bell desarrollan los precursores de los planes de muestreo "military standards" para el ejército estadounidense.
- 1942 Se funda en Gran Bretaña el Ministerio de Servicios de Asesoría en Métodos Estadísticos y Control de Calidad para Suministros.
- 1942-1946 Se imparten con la industria cursos de capacitación sobre control estadístico de calidad

- 1944 Inicia sus publicaciones *Industrial Quality Control*.
- 1946 Se funda la Sociedad Americana de Control de Calidad (ASQC) como una fusión de diferentes sociedades de calidad.
Deming es invitado a Japón por la Sección de Servicios Económicos y Científicos del Departamento de Guerra de Estados Unidos para ayudar a las fuerzas de ocupación a reconstruir la industria japonesa.
Se funda la Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros (BISE).
- 1946-1949 Deming es invitado a dar seminarios de control estadístico de calidad en la industria japonesa.
- 1948 El profesor G. Taguchi inicia el estudio y aplicación del diseño experimental.
- 1950 Deming inicia la educación de administradores industriales japoneses; se inicia la enseñanza generalizada de los métodos de control estadístico de calidad en Japón.
El profesor K. Ishikawa introduce el diagrama de causa y efecto.
- 1950 Se publican los textos clásicos de control estadístico de calidad de Eugene Grant y A. Duncan.
- 1951 El Dr. A. V. Feigenbaum publica la primera edición de su libro *Total Quality Control*.
La IUUSE establece el "Premio Deming" para los logros importantes en el control de calidad y en la metodología de calidad.
- 1951 G. E. P. Box y K. B. Wilson publican obras fundamentales sobre el uso de los experimentos diseñados y la metodología de superficies de respuesta para la optimización de procesos; el interés se centra en la industria química. Las aplicaciones de los experimentos diseñados en la industria química crecen de manera sostenida después de esto.
- 1954 El Dr. Joseph M. Juran es invitado por los japoneses a dictar algunas conferencias sobre administración y mejoramiento de calidad.

- El especialista en estadística británico E. S. Page introduce la carta de control de suma acumulada (CUSUM, por sus siglas en inglés).
- 1957 Se publica la primera edición de *Quality Control Handbook* de J. M. Juran y E. M. Gryna.
- 1959 Se funda *Technometrics* (una revista de estadística para las ciencias físicas, químicas y de ingeniería); J. Stuart Hunter es el editor fundador.
- S. Roberts introduce la carta de control del promedio móvil ponderado exponencialmente (EWMA, por sus siglas en inglés). El programa de vuelos espaciales tripulados de Estados Unidos hace consciente a la industria de la necesidad de productos confiables; este es el punto de partida para el desarrollo del campo de la ingeniería de confiabilidad.
- 1960 G. E P. Box y J. S. Hunter escriben trabajos fundamentales sobre los diseños factoriales 2^{k-p}
- El concepto de círculo de control de calidad es introducido en Japón por K. Ishikawa
- 1961 Se funda en Gran Bretaña el Consejo Nacional de Calidad y Productividad (NCQP) como parte del Consejo Británico de Productividad.
- 1960 Los cursos de control estadístico de calidad se generalizan en los programas académicos de Ingeniería industrial.
- Se introducen programas de cero defectos (ZD) en algunas industrias estadounidenses.
- 1969 Deja de publicarse *Industrial Quality Control*, es reemplazada por *Quality Progress* y *Journal of Quality Technology* (el Dr. Lloyd S. Nelson es el editor Fundador de JQT).

- 1970 En Gran Bretaña se fusionan el NCQP y el Instituto de Aseguramiento de Calidad para formar la Asociación Británica de Calidad.
- 1975-1978 Empiezan a aparecer libros sobre experimentos diseñados dirigidos a ingenieros y científicos. Empieza el interés por los círculos de calidad en Norteamérica, el cual crece hasta formar el movimiento de la administración de calidad total (TQM, por sus siglas en inglés).
- 1980 Se introducen y son adoptados los métodos del diseño experimental en un grupo más amplio de organizaciones, incluyendo las industrias electrónicas, aeroespacial, de semiconductores y automotriz. Se publican por primera vez en Estados Unidos los trabajos del profesor G. Taguchi sobre experimentos diseñados.
- 1984 La Asociación Americana de Estadística (ASA, por sus siglas en inglés) establece el Comité Ad Hoc sobre Calidad y Productividad; este comité se convierte más tarde en una sección completa de la ASA.
- 1986 Box y otros especialistas visitan Japón, donde observan el uso generalizado de los experimentos diseñados y otros métodos estadísticos.
- 1988 El Congreso de Estados Unidos establece el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige.
- 1989 Aparece la revista *Quality Engineering*.
Nace la iniciativa **seis sigma** de Motorola.
- 1990 Se incrementan las actividades de certificación ISO 9000 en la industria estadounidense; los candidatos para el premio Baldrige aumentan de manera sostenida; muchos estados patrocinan premios de calidad basados en los criterios del premio Baldrige.

- 1995 Muchos programas de postgrado en ingeniería exigen cursos formales en técnicas estadísticas, enfocándose en los métodos básicos para la caracterización y mejoramiento de procesos.
- 1997 El enfoque **seis sigma** de Motorola se extiende a otras industrias.
- 1998 La Sociedad Americana de Control de Calidad se convierte en la Sociedad Americana de Calidad (ASQ, por sus siglas en ingles), en un intento por señalar los aspectos más amplios del campo del mejoramiento de calidad.

Desde 1989 ha habido un profundo crecimiento en el uso de los métodos, estadísticos y la metodología seis sigma para el mejoramiento de calidad en Estados Unidos. Esto ha sido motivado, en parte, por la amplia pérdida de negocios y mercados sufridos por muchas compañías estadounidenses que se inició durante los años 1970. Por ejemplo, la industria automotriz de Estados Unidos prácticamente fue destruida por la competencia extranjera durante este período. Una compañía automotriz estadounidense estimaba sus pérdidas de operación en cerca de un millón de dólares por hora en 1980. La adopción y el uso de métodos estadísticos y seis sigma han jugado un papel central en el resurgimiento de la industria estadounidense. También han surgido varias estructuras de administración como marcos en los cuales implementar el mejoramiento de calidad.

2.3. MÉTODOS DE CONTROL Y DE MEJORAMIENTO DE CALIDAD

La tecnología estadística y la ingeniería útil en el mejoramiento de la calidad, Específicamente se enfocan en tres áreas principales; el control estadístico de procesos, el diseño de experimentos y (en menor grado) el muestreo de aceptación. Además de estas técnicas, varias otras herramientas estadísticas son útiles para analizar los problemas de calidad y para mejorar el desempeño de los

procesos de producción y de servicio. El papel de alguna de estas herramientas se ilustra en la figura 31, donde se presenta un proceso de producción como un sistema con una serie de entradas y una salida. Las entradas x_1, x_2, \dots, x_p son factores controlables, tales como temperaturas, presiones, velocidades de alimentación y otras variables de procesos. Las entradas z_1, z_2, \dots, z_4 son entradas no controlables (o difíciles de controlar), tales como los factores ambientales o las propiedades de las materias primas suministradas por el proveedor. El proceso de manufactura transforma estas entradas en un producto terminado que tiene varias características de la calidad. La variable de salida es una medida de calidad del proceso. La carta de control es una de las principales técnicas del control estadístico de procesos o SPC (por sus siglas en inglés). En la figura 32 se muestra una carta de control típica. En esta carta los promedios de mediciones de una característica de calidad hechas en muestras tomadas del proceso grafican contra el tiempo (o el número de muestra). La carta tiene una línea central (CL, por sus siglas en inglés) y los límites de control superior e inferior (UCL y LCL, por sus siglas en inglés, en la figura 32). La línea central representa el sitio donde debería localizarse esta característica del proceso en caso de no estar presentes fuentes inusuales de variabilidad. Los límites de control se determinan a partir de consideraciones estadísticas simples que se discutirán más adelante. De manera típica, las cartas de control se aplican a la o las variables de salida en un sistema como en la figura 32. Sin embargo, en algunos casos también se han aplicado con buenos resultados en las entradas.

La carta de control es una técnica de monitoreo del proceso muy útil; cuando están presentes fuentes inusuales de variabilidad, los promedios muestrales graficados se encuentran fuera del límite de control. Esta es una señal de que deberá hacerse cierta investigación del proceso y emprenderse una acción correctiva para eliminar estas fuentes inusuales de variabilidad. El uso sistemático de una carta de control es una excelente manera de reducir la variabilidad. Un

experimento diseñado es de suma utilidad para descubrir las variables claves que influyen en las características de la calidad que son de interés del proceso. Un experimento diseñado es un enfoque para hacer variar de manera sistemática los factores de entrada controlables del proceso y determinar el efecto que tienen estos factores sobre los parámetros del producto de salida. Los experimentos diseñados estadísticamente son invaluable para reducir la variabilidad de las características de la calidad así como para determinar los niveles de las variables controlables que optimizan el desempeño del proceso.

Figura 31. Entradas y salidas de un proceso de producción.

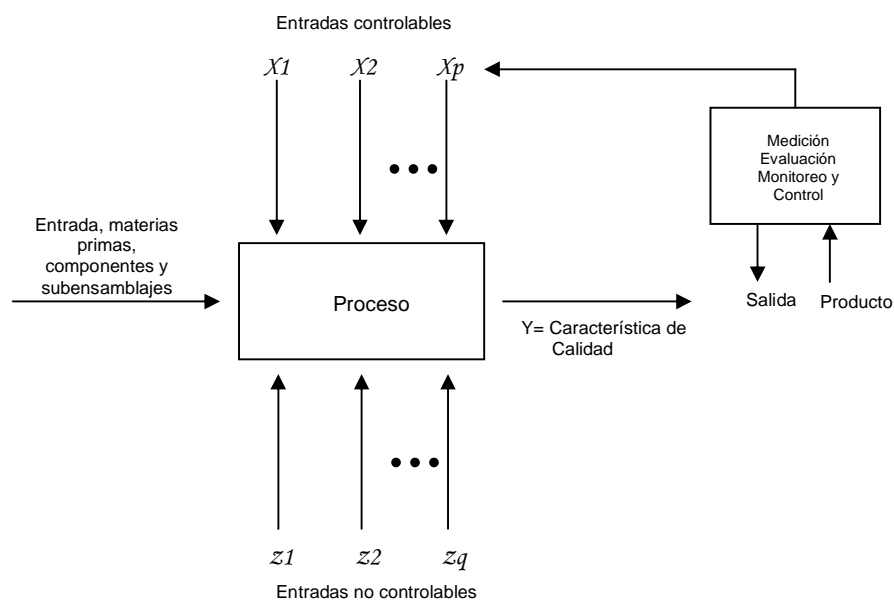
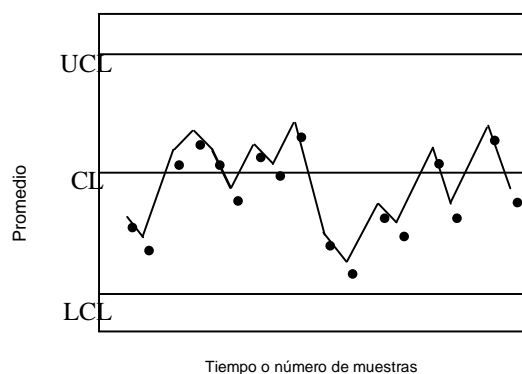
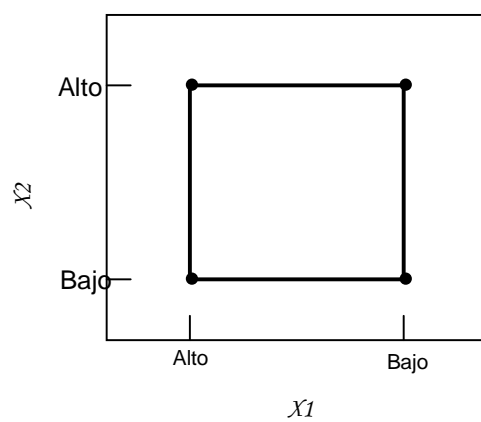


Figura 32. Una carta de control típica.

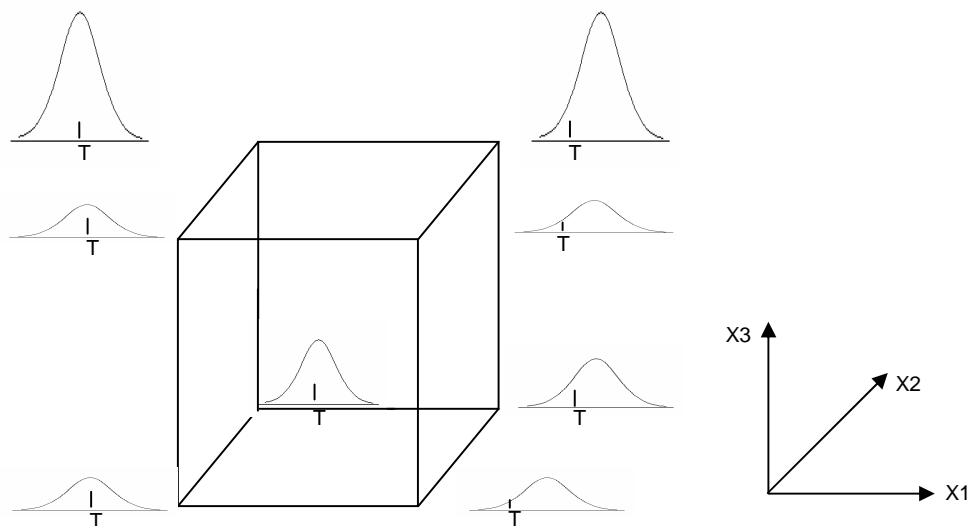


Un tipo importante de los experimentos diseñados es el diseño factorial, en el cual los factores se hacen variar conjuntamente de tal modo que se prueban todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. En la figura 33 se muestran dos diseños factoriales posibles para el proceso.

Figura 33. Diseños factoriales para el proceso de la figura 31.



a) Dos factores, x_1 y x_2



b) tres factores, x_1 , x_2 y x_3

De la figura 31, para los casos en que los factores controlables son $p = 2$ y $p = 3$. En la figura 33a los factores tienen dos niveles, bajo y alto, y las cuatro combinaciones de prueba posibles en este experimento factorial forman los vértices del cuadrado. En la figura 33b hay tres factores con dos niveles cada uno, que dan lugar a un experimento con ocho combinaciones de prueba dispuestas en los vértices de un cubo. Las distribuciones que se muestran en los vértices del cubo representan el desempeño del proceso para cada combinación de los factores controlables x_1 , x_2 y x_3 . Es evidente que algunas combinaciones de los niveles de los factores producen mejores resultados que otras. Por ejemplo, cuando x_1 se incrementa del nivel bajo al alto, el nivel promedio de la salida del proceso se incrementa y podría apartarlo del valor objetivo (T). Además, de la variabilidad del proceso parece sufrir una reducción sustancial cuando el proceso se opera en la cara posterior del cubo, donde x_2 y x_3 está en sus niveles altos.

Los experimentos diseñados son una importante herramienta de control de calidad fuera de línea, ya que por lo general se utilizan durante las actividades de desarrollo y en las etapas iniciales de la manufactura, en vez de usarse como procedimiento rutinario en línea o dentro del proceso. Juegan un papel crucial para reducir la variabilidad.

Una vez que se ha identificado una lista de variables importantes que afectan la salida del proceso, suele ser necesario modelar la relación entre las variables de entrada influyentes y las características de la calidad a la salida. Entre las técnicas estadísticas útiles para construir estos modelos se encuentran el análisis de regresión y el análisis de series de tiempo.

Cuando se han identificado las variables importantes y se ha cuantificado la naturaleza de la relación entre las variables importantes y la salida del proceso, es posible aplicar con considerable efectividad una técnica de control estadístico de

procesos en línea para monitorear y vigilar el proceso. Técnicas tales como las cartas de control pueden usarse para monitorear la salida del proceso y detectar cuando son necesarios cambios en las entradas para regresar el proceso a un estado bajo control. Los modelos que relacionan las entradas influyentes con las salidas de los procesos ayudan a determinar la naturaleza y la magnitud de los ajustes necesarios. En muchos procesos, una vez que se comprende la naturaleza dinámica de las relaciones entre las entradas y las salidas, puede ser posible hacer el ajuste rutinario del proceso para que los valores futuros de las características del producto estén aproximadamente en el objetivo. A este ajuste rutinario suele llamársele **control de ingeniería, control automático o control de retroalimentación**.

La tercera área del control y mejoramiento de calidad que se discute es el **muestreo de aceptación**. Guarda una estrecha relación con la inspección y prueba del producto, que es uno de los primeros aspectos del control de calidad, cuyos orígenes se remontan mucho antes de que se desarrollara una metodología estadística para el mejoramiento de calidad. La inspección puede ocurrir en muchos puntos de un proceso. El muestreo de aceptación, definido como la inspección y la clasificación de una muestra de unidades seleccionadas al azar de una carga o lote más grande y la decisión final acerca de la forma en que se dispondrá del lote, ocurre por lo general en dos puntos: en las materias primas o componentes de entrada o en la producción final.

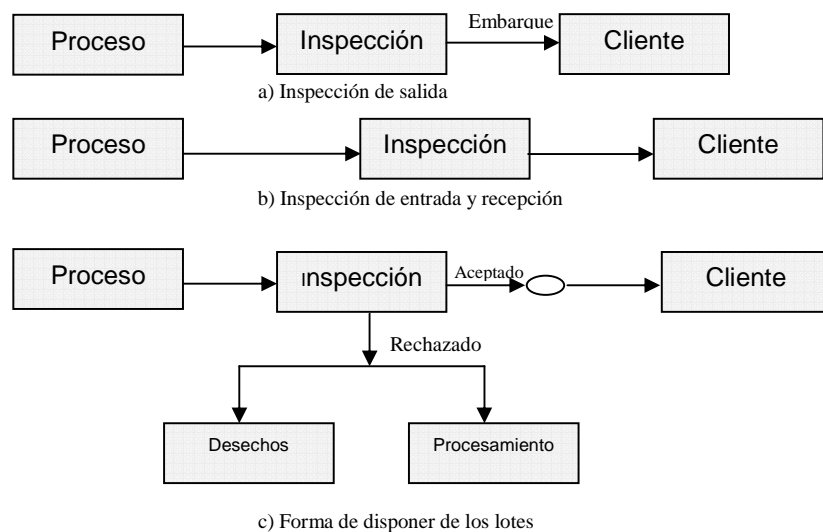
En la figura 34 se muestran diferentes variantes del muestreo de aceptación. En la figura 34a la operación de inspección se realiza inmediatamente después de la producción, antes de que el producto se embarque al cliente. Suele llamársele **inspección de salida**. En la figura 34b se ilustra la **inspección de entrada**; es decir, una situación en la que se hace el muestreo de varios lotes o cargas del producto cuando se reciben del proveedor. En la figura 34c se ilustran varias

decisiones acerca de la forma en que se dispondrá de los lotes. Los lotes muestreados pueden ser aceptados o rechazados. De manera típica, los artículos de un lote rechazado se desechan o se reciclan, o pueden reprocesarse o reemplazarse con unidades buenas. A este último caso suele llamársele **inspección de rectificación**.

Los sistemas modernos de aseguramiento de calidad frecuentemente hacen menos énfasis en el muestreo de aceptación y procuran concentrar sus esfuerzos en el control estadístico del proceso y en los experimentos diseñados. El muestreo de aceptación tiende a reforzar el punto de vista de la “conformidad con las especificaciones” de la calidad y no sirve de retroalimentación para el proceso de producción o para el diseño o desarrollo de ingeniería que llevaría necesariamente al mejoramiento de calidad.

En la figura 35 se muestra la evolución típica de la utilización de estas técnicas en la mayoría de las organizaciones. En el nivel de madurez más bajo, la administración puede no saber absolutamente nada de cuestiones de calidad, y es posible que no haya ningún esfuerzo organizado efectivo para el mejoramiento de calidad. Con frecuencia habrá aplicaciones modestas de los métodos del muestreo

Figura 34. Variantes del muestreo de aceptación



De aceptación, por lo general en la inspección de recepción. La primera actividad cuando aumenta la madurez es intensificar el uso de la inspección de muestras. El uso del muestreo aumentará hasta que haya conciencia de que la calidad no puede inspeccionarse o probarse dentro del producto.

En ese punto, la organización por lo general empieza a enfocarse en el mejoramiento del proceso. El control estadístico del proceso y el diseño experimental tienen un impacto potencial importante sobre la manufactura, las actividades del diseño del producto y el desarrollo del proceso. La introducción sistemática de estos métodos con frecuencia marca el principio de mejoramientos sustanciales de la calidad, de los costos y la productividad en la organización. En los niveles más altos de madurez, las compañías utilizan de manera intensiva los experimentos diseñados y los métodos de control estadístico de procesos y hacen un uso relativamente modesto del muestreo de aceptación.

Figura 35. Diagrama de fase del uso de los métodos de la ingeniería de calidad

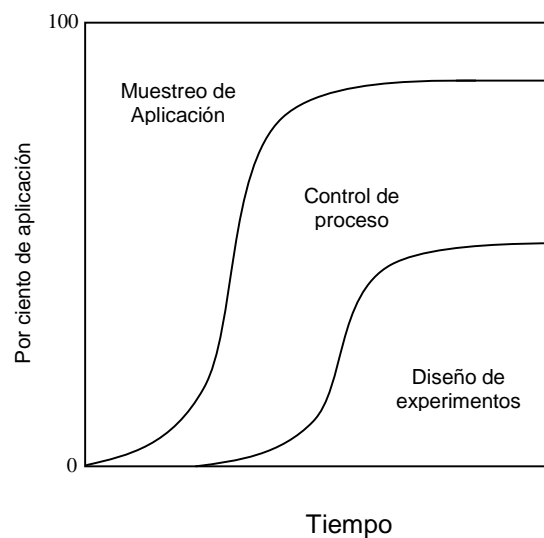
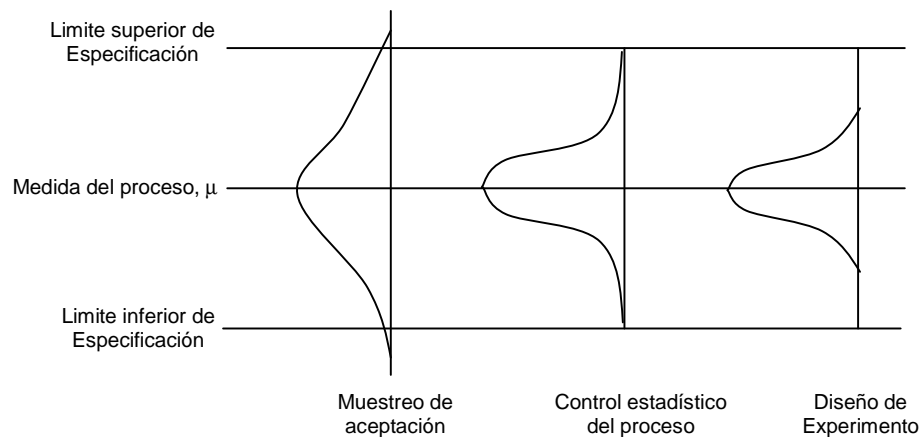


Figura 36. Aplicación de las técnicas de la ingeniería de calidad y la reducción sistemática de la variabilidad del proceso



El **objetivo** principal de los esfuerzos de la ingeniería de calidad es la **reducción sistemática de la variabilidad** en las características clave de la calidad del producto. En la figura 36 se muestra como ocurre esto con el tiempo. En las etapas iniciales, cuando el muestreo de aceptación es la principal técnica en uso, la “porción caída” del proceso, o las unidades que no cumplen con las especificaciones, constituyen un porcentaje elevado de la salida del proceso. La introducción del control estadístico del proceso lo estabilizará y reducirá la variabilidad. Sin embargo, no es satisfactorio limitarse a cumplir con los requerimientos –la reducción adicional de la variabilidad por lo general lleva a mejorar el desempeño del producto y a tener una posición competitiva fortalecida, como lo demostró con toda claridad el ejemplo de las transmisiones automotrices discutido antes. Los experimentos diseñados estadísticamente pueden emplearse en conjunción con el control estadístico del proceso para minimizar la variabilidad de los procesos en prácticamente todos los escenarios industriales.

2.4. OTROS ASPECTOS DE CONTROL Y MEJORAMIENTO DE CALIDAD

Aún cuando las técnicas estadísticas son las herramientas críticas en el control y en el mejoramiento de la calidad, para que su uso sea más efectivo deben implementarse y ser parte de un sistema de administración cuya motivación sea la calidad. De hecho, el sistema de administración debe dirigir la filosofía de mejoramiento de calidad y asegurar su implementación en todos los aspectos del negocio. Uno de los marcos administrativos usados para llevar a cabo esto es la **administración de calidad total (TQM)**, aun cuando otros nombres de uso común incluyen **control de calidad en toda la compañía (CWQC**, por sus siglas en inglés), **aseguramiento de calidad total (TQA**, por sus siglas en inglés) y **seis sigma**.

2.4.1. Filosofía de calidad y estrategias de administración

Muchas personas han contribuido en la metodología estadística del mejoramiento de la calidad. Sin embargo, en términos de la filosofía de la implementación y la administración, surgen un líder: W. E. Deming. Se revisa ahora los enfoques y la filosofía de este líder en la administración de calidad.

2.4.2. W. Edwards Deming

Una de las razones de que los fabricantes japoneses exhibieran una gran capacidad en el control estadístico y el mejoramiento de calidad durante los años 1970 y 1980 es el trabajo del Dr. W. Edwards Deming. Durante la Segunda Guerra Mundial, el Dr. Deming trabajó para el departamento de guerra y la oficina del censo. Después de la guerra, se hizo consultor de las industrias japonesas y convenció a los ejecutivos del poder de los métodos estadísticos y de la importancia de la calidad como arma competitiva. Este compromiso con los métodos estadísticos y su aplicación ha sido un elemento clave en la expansión de la industria y de la economía del Japón. La Unión Japonesa de Científicos e

ingenieros instituyó el Premio Deming para el mejoramiento de calidad en su honor. Hasta su muerte en 1994, el Dr. Deming fue un activo consultor y conferencista; fue una fuerza de inspiración para el mejoramiento de calidad en Estado Unidos y en todo el mundo. Era su firme convicción que la responsabilidad de calidad descansa en la administración; es decir, la mayoría de las oportunidades para mejorar la calidad requieren la acción de la administración, y que muy pocas oportunidades se encuentran en el nivel de la fuerza de trabajo o de los operadores. El Dr. Deming fue severo crítico de muchas prácticas administrativas estadounidenses.

La filosofía del Dr. Deming es un importante marco para implementar el mejoramiento de la calidad y la productividad. Se presenta ahora una breve enunciación y discusión de los 14 puntos del Dr. Deming:

1. Crear la constancia en los propósitos enfocados en el mejoramiento de productos y servicios. Intentar constantemente mejorar el diseño y el desempeño del producto. La inversión e investigación, desarrollo e innovación tendrá una retribución en el largo plazo para la organización.
2. Adoptar la nueva filosofía de rechazar la mano de obra deficiente, los productos defectuosos o los malos servicios. Cuesta lo mismo producir una unidad defectuosa que producir una buena (y muchas veces más). El costo para mejorar los desechos, el reprocesamiento y otras pérdidas creadas por unidades defectuosas representa una enorme sangría de los recursos de una compañía.
3. No confiar en la inspección en masa para “controlar” la calidad. Lo único que puede hacer la inspección es descartar las unidades defectuosas, y en este punto es demasiado tarde porque se ha pagado ya por producirlas. La inspección ocurre típicamente demasiado tarde en el proceso, es costosa y con frecuencia es ineficaz. La calidad resulta de la prevención de unidades defectuosas a través del mejoramiento del proceso, no de la inspección.

4. No hacer contratos con proveedores atendiendo únicamente al precio, sino considerando también la calidad. El precio es sólo una medida significativa del producto del proveedor si se considera en relación con una medida de calidad. En otras palabras, debe considerarse el costo total del artículo, no sólo el precio de compra. Cuando se considera la calidad, muchas veces quien presenta la cotización más baja no es el proveedor con el costo más bajo. Deberá darse preferencia a los proveedores que emplean métodos de mejoramiento de calidad moderno en sus negocios que puedan demostrar el control y la capacidad del proceso.
5. Enfocarse en el mejoramiento continuo. Intentar mejorar constantemente el sistema de producción y servicio. Comprometer a la fuerza de trabajo en estas actividades hacer uso de métodos estadísticos, en particular las herramientas para resolver problemas basados en la estadística que se discuten en este libro.
6. Poner en práctica métodos de capacitación modernos e invertir en la capacitación de todos los empleados. Todos deberán recibir capacitación en los aspectos técnicos de su trabajo, así como en los métodos modernos para mejorar la calidad y la productividad. La capacitación deberá estimular a los empleados a poner en práctica estos métodos cotidianamente.
7. Poner en práctica métodos de supervisión modernos. La supervisión no deberá consistir meramente en la vigilancia pasiva de los trabajadores, sino que deberá enfocarse en ayudar a los empleados a mejorar el sistema en el que trabajan. La meta número uno de la supervisión deberá ser mejorar el sistema de trabajo y el producto.
8. Sacudirse el miedo. Muchos trabajadores tienen miedo de hacer preguntas, reportar problemas señalar condiciones que son barreras para la calidad y la producción efectiva. En muchas organizaciones las pérdidas económicas asociadas con el miedo son cuantiosas; sólo la administración puede eliminar el miedo.

9. Derribar las barreras entre las áreas funcionales del negocio. El trabajo en equipo entre las diferentes unidades de una organización es esencial para que tenga lugar el mejoramiento efectivo de la calidad y la productividad.
10. Eliminar objetivos, lemas y metas numéricas para la fuerza de trabajo. Un objetivo como “cero defectos” es inútil si un plan para alcanzar este objetivo. De hecho, estos lemas y “programas” suelen ser contraproducentes. Trabajar para mejorar el sistema y proporcionar información para ello.
11. Eliminar las cuotas y los estándares de trabajo numéricos. Históricamente, estos estándares se han fijado sin tomar en consideración la calidad. Los estándares de trabajo con frecuencia son síntomas de la incapacidad de la administración para entender el proceso laboral y para proporcionar un sistema de administración efectivo enfocado en el mejoramiento de este proceso.
12. Eliminar las barreras que desalientan a los empleados a realizar sus trabajos. La administración debe escuchar las sugerencias, comentarios y quejas de los empleados. La persona que está haciendo un trabajo la conoce mejor que nadie y con frecuencia tiene ideas valiosas acerca de cómo conseguir que el proceso opere con mayor efectividad. La fuerza de trabajo es un actor importante del negocio, no solo el antagonista en la negociación del contrato colectivo.
13. Instituir un programa progresivo de capacitación y educación para todos los empleados. La educación en técnicas estadísticas simples y poderosas deberá ser obligatorio para todos los empleados. Usar las herramientas básicas para la solución de problemas SPC, en particular la carta de control deberá generalizarse en todo el negocio. Cuando estas cartas se generalicen y cuando los empleados entiendan sus usos, es más probable que ellos busquen las causas de la calidad pobre y que identifiquen las mejoras del proceso. La educación es una manera de hacer que todos sean socios en el proceso de mejoramiento de calidad.

14. crear una estructura en la alta gerencia que propugne con decisión por los 13 primeros puntos.

Al leer los 14 puntos del Dr. Deming, observamos dos cosas: primero, hay un marcado énfasis en el cambio; segunda, el papel de la administración para este proceso de cambio es de importancia primordial. Sin embargo, ¿qué deberá cambiarse y cómo deberá iniciarse este proceso de cambio? Por ejemplo, si quisiéramos mejorar el rendimiento de un proceso de fabricación de semiconductores, ¿qué deberíamos hacer? En esta área donde los métodos estadísticos entran en juego la mayoría de las veces. Para mejorar el proceso de los semiconductores, debemos determinar cuáles son los factores controlables del proceso que influyen en el número de unidades defectuosas. Para responder a esta pregunta, debemos recabar datos del proceso y ver como reacciona el sistema al cambio en las variables del proceso. Los métodos estadísticos, como los experimentos diseñados y las cartas de control, pueden contribuir a estas actividades.

2.5. SEIS SIGMA COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN DE CONTROL Y MEJORAMIENTO DE CALIDAD

El SS, es una herramienta de mejoramiento que permite obtener organizaciones eficaces y eficientes, continuamente alineadas con las necesidades de los clientes. Se fundamenta en el trabajo en equipo como estrategia para generar las capacidades competitivas de la organización y de las personas involucradas. Para lograr estos objetivo el SS está basado en cinco etapas que en su orden son: 1) Definir el problema de la calidad, 2) Obtener la información adecuada de cada una de las variables críticas del proceso evaluando de igual forma sus sistemas de medición, 3) Utilizar herramientas estadísticas que permitan analizar de forma adecuada cada una de las variables críticas identificadas en el proceso, 4)

Optimizar el proceso para su mejora y 5) Un efectivo control que nos permita realizar el seguimiento a estas mejoras.

2.5.1. Historia de la Metodología Seis Sigma

El método de SS es una filosofía de calidad que se desarrolla en los años ochenta como estrategia de mercado y de mejoramiento en la empresa Motorola, gracias al ingeniero Mikel Harry que promovió como meta estimable en la organización la evaluación y el análisis de la variación de los procesos de esta organización, como una manera de ajustarse a la realidad. En ésta época, con el auge de la globalización, las empresas del sector industrial y comercial; que empezaron a desarrollar técnicas más eficientes que le permitieran optimizar los procesos para mejorar su competitividad y productividad. Consecuencia de ello, se involucró como objetivo principal reducir la variabilidad de los factores o variable críticas, que de una u otra forma alteraban el normal desempeño de los procesos. Por lo anterior se toma como medida estadística confiable la evaluación de la desviación estándar del proceso, representada por el símbolo σ , como medida de variabilidad es un indicador de desempeño y que a su vez permite determinar la eficiencia y eficacia de la organización. Esta iniciativa se convirtió en el punto central del esfuerzo para mejorar la calidad en Motorola, llamando la atención al director ejecutivo Bob Galván, concentrando su esfuerzo no sólo en el análisis de la variación sino también en la mejora continua. Observó que en el momento de realizar el control estadístico a un proceso, se toma el valor de sigma σ a tres desviaciones del promedio, como medida de variabilidad natural. Criterio que se modifica con el SS en donde se exige que la medida del proceso se encuentre a cuatro punto cinco desviaciones de las especificaciones. Esto significa que una considerable información del proceso debe estar dentro de este intervalo, lo que estadísticamente implica que se considera normal que 34 elementos del proceso no cumplan los criterios de calidad exigidos por el cliente, por cada millón

(1.000.000) de oportunidades. Este es la causa del origen del método SS como medida de desempeño de una organización, que con el paso del tiempo ha evolucionado hacia una filosofía de calidad que complementan los criterios exigidos en las normas de calidad ISO 9000.

Esta nueva iniciativa de mejoramiento motivó a Lawrence Bosidy, quién en 1991, después de su retiro de la General Electric, toma la elección del conglomerado Allied Signal para transformar estas empresas con dificultades económicas, a unas organizaciones exitosas. Durante los años noventa la empresa Allied Signal amplió sus ventas de manera sorprendente, situación que origina que este modelo de calidad se implantara en Texas Instruments, alcanzando éxitos similares. Durante 1995 el Director Ejecutivo de General Electric, Jack Welch se entera del éxito de esta nueva estrategia de mejoramiento gracias a la información suministrada por Lawrence Bossidy, facilitando así la más grande transformación de esta organización.

La forma novedosa de orientar las políticas de calidad establecidas en la organización, se afianza de los criterios establecidos en las normas de calidad ISO y la complementa con un mayor compromiso con las técnicas avanzadas de control estadístico de calidad, lo que indica que el SS no es una metodología de calidad que se aleje de los criterios de mejoramiento que actualmente se desarrollan; por el contrario, la integración de estos métodos de mejoramiento continuo inducen a una mejor eficiencia y eficacia dentro de la organización.

SEIS SIGMA es un método de gestión de calidad cuyos objetivos se centran en dar solución a las necesidades del cliente, identificar las causas que generen los problemas de calidad de un producto o servicio, las mediciones de las variables críticas, la aplicación de las diversas técnicas estadísticas y el seguimiento de cada una de las actividades propuestas para eliminar un problema de calidad.

Toma como referente el ciclo de Deming, **PDCA**, cuyos criterios son: 1. Definir 2. Medir 3. Analizar 4. Mejorar 5. Controlar. Ver figuras 37 y 38, cuyas etapas se operacionalizan de acuerdo a la siguiente forma:

Figura 37. Ciclo de Deming

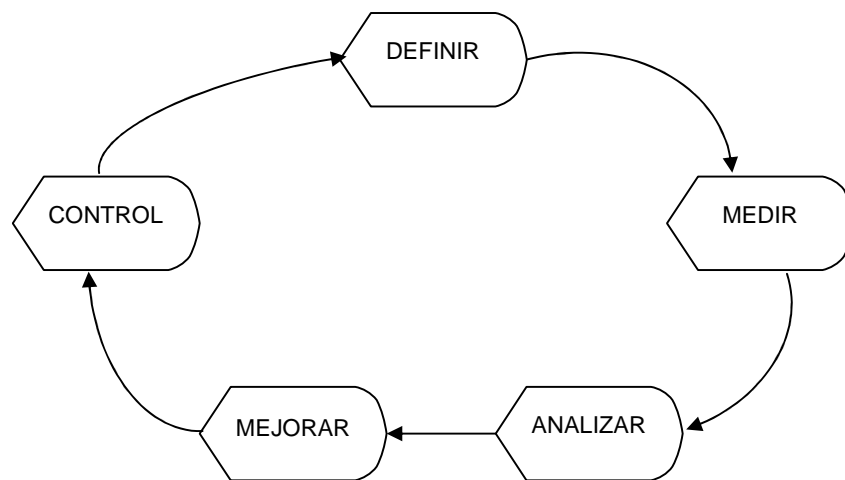
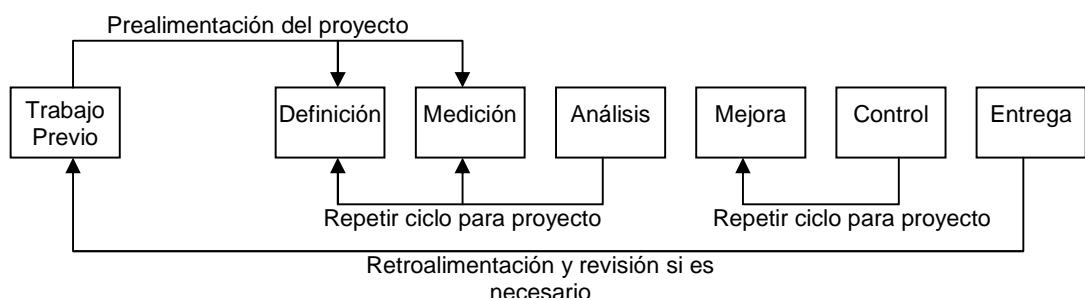


Figura 38. Operacionalización del DMAMC¹



¹ TENNANT, G. "Six sigma: Control estadístico del proceso y administración total de la calidad en manufactura y servicio" Pág. 157

1. Definición del proyecto.
2. Medición de la información suministrada por el proceso y los clientes de la organización.
3. Análisis de la información, en donde se aplica algunas herramientas estadísticas descriptivas e inferenciales.
4. Mejoramiento, etapa en la cual se proponen las soluciones de los problemas de calidad planteados.
5. Control, el cual incluye los métodos estadísticos de seguimientos a las variables del proceso.

El camino para que se aplique el DMAMC en forma adecuada en la organización, es necesario cumplir con los siguientes criterios:

1. El enfoque centrado en las necesidades y los requerimientos de los clientes.
2. La identificación de las causas de los problemas que atentan contra la calidad del producto final o del servicio prestado, evitando las soluciones apresuradas que generan decisiones erradas y sin fundamento estadístico.
3. La realización de las mediciones de todas las variables críticas del proceso, lo que implica el conocimiento profundo de cada una de las etapas o fases que conforman las actividades de la organización.
4. La utilización de las herramientas estadísticas apropiadas que conduzcan a soluciones válidas y efectivas.

5. El control mediante un seguimiento constante que evalúe las diferentes actividades que se encaminen a la solución de un problema de calidad.

De manera típica, son grandes las probabilidades de que ocurran fallas o defectos en los productos de alta tecnología con muchos componentes complejos. El programa Seis Sigma se centra en llevar la variabilidad de las características de la calidad clave a niveles en los que las fallas o los defectos sean en extremo improbables.

En la figura 39a se muestra una distribución de probabilidad normal como un modelo para la característica de la calidad cuyos límites de las especificaciones se localizan en tres desviaciones estándar a cada lado de la media. Resulta entonces que en esta situación la probabilidad de fabricar un producto dentro de estas especificaciones es de 0.9973, lo que representa 2700 partes por millón (ppm) defectuosas. Este esquema se conoce como **desempeño de calidad tres sigma**, y en realidad suena muy bien. Sin embargo, supóngase que se tiene un producto que consiste en un ensamblaje de 100 componentes o partes y que las 100 partes deben ser no defectuosas para que el funcionamiento del producto sea satisfactorio. La probabilidad de que cualquier unidad específica del producto no sea defectuosa es:

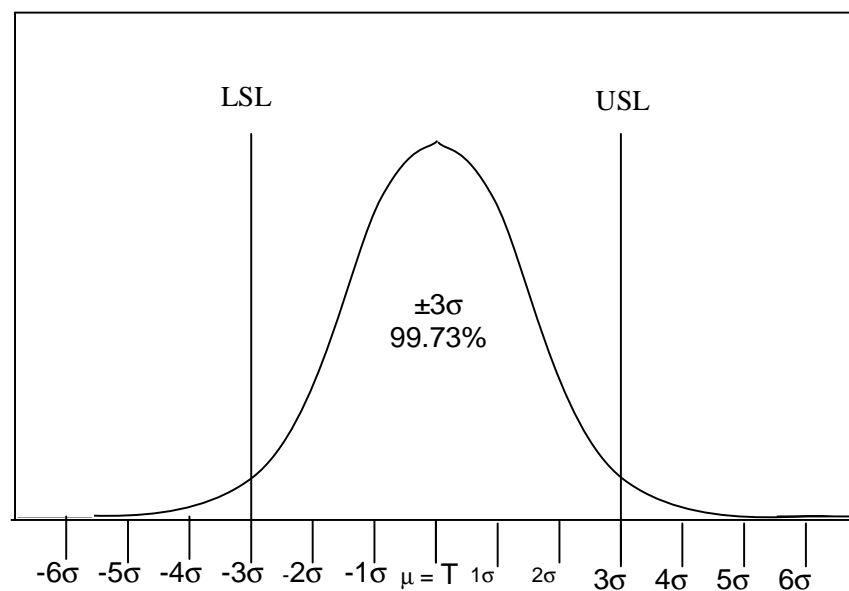
$$0.9973 * 0.9973 * \dots * 0.9973 = (0.9973)^{100} = 0.7631$$

Es decir, aproximadamente 23.7% de los productos fabricados bajo el esquema de calidad tres sigma serán defectuosos. Esta situación no es aceptable, ya que muchos productos de alta tecnología se fabrican con miles de componentes. Un automóvil tiene cerca de 200 000 componentes y un avión tiene varios millones.

El concepto de Seis Sigma consiste en reducir la variabilidad del proceso de tal modo que los límites de las especificaciones estén a seis desviaciones estándar de la media. Entonces, como se muestra en la figura 39a, sólo habrá aproximadamente 2 partes por mil millones defectuosas. Bajo la calidad **Seis Sigma**, la probabilidad de que cualquier unidad específica del producto hipotético anterior sea no defectuoso es de 0.9999998, o 0.002 ppm, una situación mucho mejor.

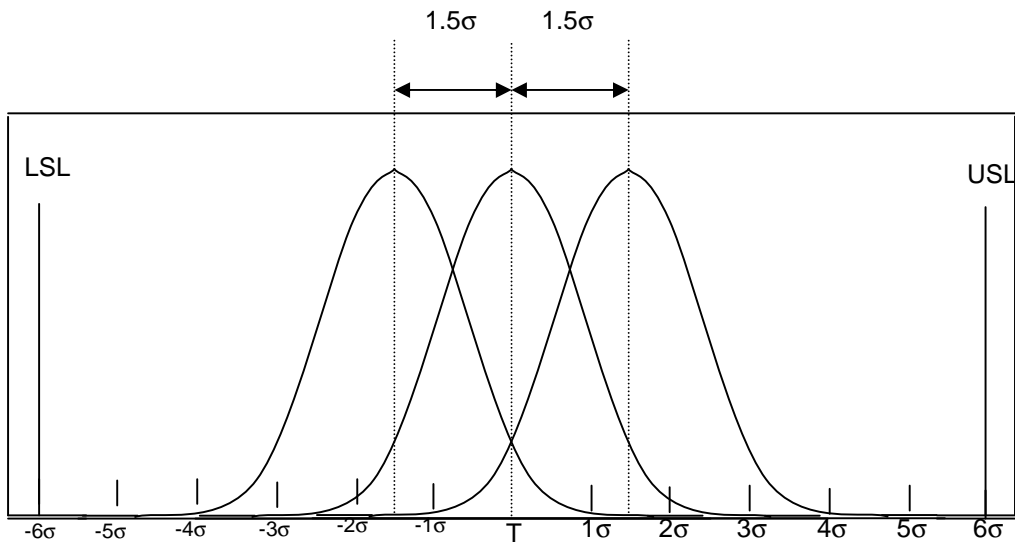
Cuando se desarrollo inicialmente el concepto de Seis Sigma, se estableció el supuesto de que cuando el proceso alcanzaba el nivel de calidad de seis sigma, la media del proceso seguía estando.

Figura 39. El concepto de Seis Sigma de Motorola



| Limite de las especificaciones | Porcentaje dentro de las especificaciones | ppm defectuosas |
|--------------------------------|---|-----------------|
| 1± Sigma | 68.27 | 317300 |
| 2± Sigma | 95.45 | 45500 |
| 3± Sigma | 99.73 | 2700 |
| 4± Sigma | 99.9937 | 63 |
| 5± Sigma | 99.999943 | 0.57 |
| 6± Sigma | 99.9999998 | 0.002 |

a) Distribución normal centrada en el objeto T



| Limite de las especificaciones | Porcentaje dentro de las especificaciones | ppm defectuosas |
|--------------------------------|---|-----------------|
| 1± Sigma | 30.23 | 697700 |
| 2± Sigma | 69.13 | 608700 |
| 3± Sigma | 93.32 | 66810 |
| 4± Sigma | 99.3790 | 6210 |
| 5± Sigma | 99.97670 | 233 |
| 6± Sigma | 99.999660 | 3.4 |

b) Distribución normal con la media corrida 1.5σ del objetivo

Sujeta a alteraciones que podían hacer que se moviera hasta 1.5 desviaciones estándar fuera del objetivo. Esta situación se muestra en la figura 39b. Bajo este escenario, un proceso seis sigma produciría aproximadamente 3.4 ppm defectuosas.

Hay aquí una inconsistencia lógica. Sobre la capacidad de los procesos, sólo pueden hacerse predicciones del desempeño del proceso cuando el proceso es estable; es decir, cuando la media (y la desviación estándar también) es constante. Si la media sufre alteraciones y termina alejada hasta 1.5 desviaciones estándar del objetivo, una pérdida de 3.4 ppm defectuosas no es muy confiable, ya que la media podría moverse *más* de las de 1.5 desviaciones estándar “permitidas”. El desempeño del proceso no es predecible a menos que el comportamiento del proceso sea estable.

Motorola estableció el concepto Seis Sigma como un objetivo de la corporación y como un punto focal para los esfuerzos de mejoramiento del proceso y de la calidad del producto. En años recientes, el concepto Seis Sigma se ha extendido fuera de Motorola y ha llegado a abarcar mucho más. Se ha convertido en un programa para mejorar el desempeño *comercial* comparativo a través del mejoramiento de la calidad y de prestar atención a la reducción de los costos. Las compañías involucradas en un esfuerzo seis sigma utilizan equipos de trabajo que tienen un impacto significativo *tanto* en la calidad *como* en el aspecto económico. El esfuerzo tiene metas más precisas que los programas TQM anteriores, y ha sido más exitoso para conseguir el compromiso de la administración.

2.5.2. Los grandes cambios de Seis Sigma

La esencia fundamental de la calidad total enfoca a las empresas satisfacer mejor al cliente buscando precios más bajos. La calidad no incrementa los costos y eso se ha demostrado que ocurre lo contrario porque permite incrementar las ventas.

Lo que eleva los costos verdaderamente dentro de las empresas es la no calidad, factores como: el retrabajo en el proceso de producción, los retrasos, los costos innecesarios, son consecuencia de una mala planeación en la organización terminando el cliente pagando por un producto más costoso disgustándolo y finalmente termina yéndose hacia otros proveedores.

La empresa debe dar más prioridad a su mercado, que en si misma, en sus clientes que en sus maquinas, en la búsqueda de alcanzar sus objetivos más que en sus medios y que sus administradores y lideres cambien la lógica del ingeniero o del contable, con sus excesiva confianza en la capacidad de su técnica, por la lógica del empresario comercial, que reconoce las debilidades del producto que no se ha podido vender.

Dejar de producir más, para cada vez producir mejor, el desespero no produce más que productos de mala calidad y personal estresado, cansado y cada vez menos motivado e incompetente. La calidad total busca el auto control y el trabajo en equipo, produciendo de forma correcta al principio, arreglando los defectos en el momento que se producen.

Mantener una excelente relación cliente – organización en el interior mismo de la empresa; cada dependencia, cada servicios, cada función, cada trabajador debe buscar lo mejor que desea de su área y es responder mejor a las demandas de su consumidor. El concepto de barreras entre clientes y empresa se caen y se fortalece la idea de un desarrollo de procesos integrales en los cuales todos tienen una participación fundamental y vital.

Eliminar esas empresas aisladas con pésimas relaciones frente a sus proveedores y subcontratistas, y crear una nueva empresa con una profunda relación de confianza con sus clientes.

Los métodos rutinarios, en los cuales una organización que asigna a cada trabajador un puesto instrumental de ejecutante, por un modelo donde los grupos de trabajo asumen responsabilidades misionales para alcanzar objetivos claros, trabajando en equipo para hacerlo.

La eliminación de todos los desperdicios y despilfarros, no solo los relativos al proceso productivo, sino también los originados por las actividades administrativas.

La sustitución del control por la prevención un incremento en los costos de prevención traen como resultado una disminución en el costo total de calidad al reducir significativamente los costos por fallas internas y externas.

Seis Sigma busca lograr dentro de las organizaciones estos cambios de paradigmas por una cultura más abierta haciendo la verdadera calidad total para llegar a los cero defectos cero stocks, cero plazos, cero accidentes.

2.5.3. El Nivel de Seis Sigma

En matemática se usa la letra griega (σ) (que se lee Sigma como símbolo de un parámetro estadístico, la desviación típica, que nos da una idea del promedio de las desviaciones que toman los valores de las medidas de una característica de un producto, respecto a su valor medio o central.

σ (Sigma) es, por tanto, un parámetro estadístico de dispersión que expresa la variabilidad de un conjunto de valores respecto a su valor medio, de modo que cuanto menor sea σ cuantifica la dispersión de esos valores respecto al valor medio y, por tanto, fijado unos límites de especificación por el cliente, superior e inferior, respecto, al valor central objetivos, cuanto menor sea σ , menor será el número de valores fuera de especificaciones y, por tanto, el número de defectos.

Supongamos ahora que efectuamos el control de calidad de un producto que fabricamos, del que medimos una magnitud clave para el cliente que tenemos especificada con una determinadas tolerancia que denominaremos superior (T_s) e inferior (T_i) respecto al valor central M , que es el valor nominal.

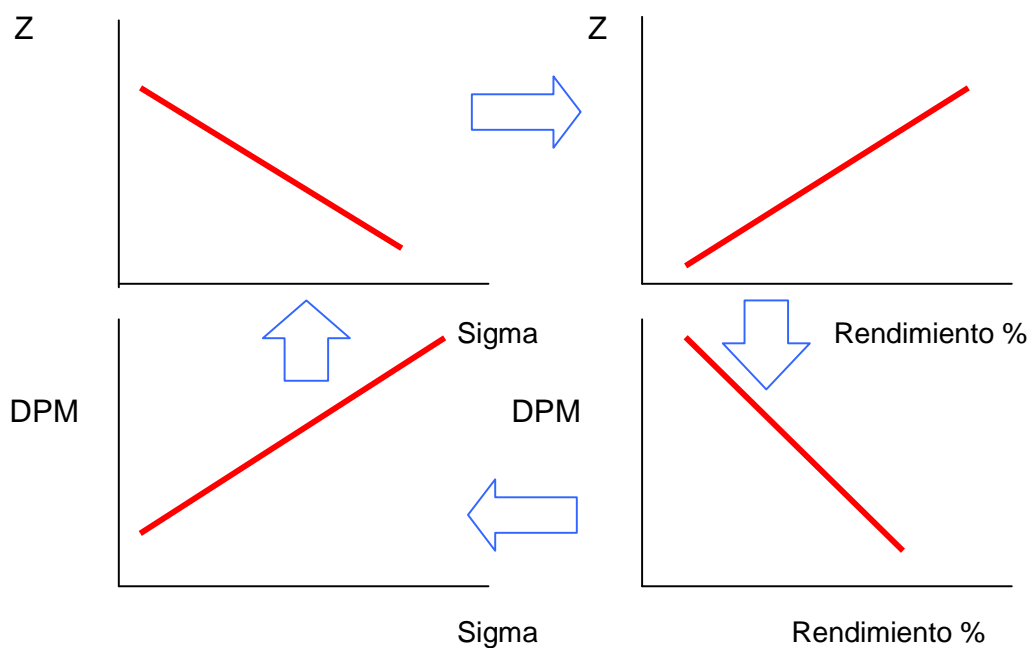
Siempre que la magnitud este dentro del sistema $T_s - T_i$ se dice que el producto es conforme a la calidad.

La diferencia entre la tolerancia superior (T_s) y la tolerancia inferior (T_i) dividido por el desvió estándar nos da la cantidad (o nivel) de Sigma (Z).

La capacidad del proceso para un nivel σ Sigma es igual a Z , resultante dividir la diferencia entre las tolerancias superior e inferior por Seis Sigma.

En un nivel 6σ Sigma entran en el espacio existente entre la tolerancia superior (T_s) y la tolerancia inferior (T_i) un total de 12 Sigmas. Así pues cuando más cercanos estén los valores de las mediciones al valor central optimo, más pequeño será el valor de Sigma, y de tal forma mayor número de Sigma entraron dentro de los límites de tolerancia.

Figura 40. Cantidad Seis Sigma vs Rendimiento del proceso



Así tenemos pues, partiendo de la figura 40 ubicada en el ángulo superior izquierdo una curva con pendiente negativa, que nos muestra la relación existente entre el desvío estándar (Sigma) y la cantidad de Sigma (Z), cuanto mayor sea el valor de Sigma menor es el valor de z (Cantidad de Sigma), por el contrario el disminuir el valor de sigma la cantidad de Sigma que entra dentro de los límites de tolerancia aumenta.

En la figura 40 del ángulo superior derecho tenemos una curva de pendiente positiva, la cual indica que al aumentar el nivel de Z se incrementa el rendimiento del proceso (%). En la figura 40 inferior derecho tenemos una curva con pendiente negativa, lo cual nos indica que al aumentar el rendimiento la cantidad de defecto por millón de oportunidades (DPMO) disminuye.

En la figura 40 inferior izquierdo la curva es de pendiente positiva e indica que al aumentar la cantidad de DPMO, el valor de Sigma aumenta, en tanto que si el nivel de DPMO, Disminuye es valor de Sigma también decrece.

Calcular el nivel de Sigma para la mayoría de los procesos es bastante fácil. Dado un determinado producto o servicios se determinan los factores críticos de calidad (FCC), Luego se multiplica estos por la cantidad de artículos producidos obteniéndose el total de defectos factibles (Oportunidades de fallas): si dividimos la fallas detectadas (con los distintos sistemas de medición en función del tipo de bien o servicio).

Por el total de defectos factibles (TDF) y luego lo multiplicamos por un millón obtenemos los defectos por millón de oportunidades (DPMO). Luego revisada toda la tabla 4 de sigma se tiene los niveles de sigma.

Los factores Críticos de calidad pueden ser determinados tanto por los clientes internos como externos, y serán aplicadas a distintas etapas de los diversos procesos.

Así, si para un producto se han determinado 12 factores críticos de calidad (FCC) y se han producido un total de 250.000 artículos, tomando una muestra de 1500, el total de defectos factibles es de $(1500 \times 12) = 18000$ si el total de errores o fallas detectados asciende a 278, ellos implica que tenemos 15.444.44 DPMO (Resultante de dividir 278 por los 18000 y multiplicarlos por 1.000.000). Para este nivel de DPMO la cantidad de Sigma es de 3,67 (lo cual implica un rendimiento entre el 99.80 y 99.87 por ciento).

Tabla 4. Conversión: nivel en Sigma a partir de los DPMO

| RENDIMIENTO % | NIVEL EN SIGMA | DPMO |
|---------------|----------------|--------|
| 6,68 | 0,00 | 933200 |
| 8,455 | 0,13 | 915450 |
| 10,56 | 0,25 | 894400 |
| 13,03 | 0,38 | 869700 |
| 15,87 | 0,50 | 841300 |
| 19,08 | 0,63 | 809200 |
| 22,66 | 0,75 | 773400 |
| 26,595 | 0,88 | 734050 |
| 30,85 | 1,00 | 691500 |
| 35,435 | 1,13 | 645650 |
| 40,13 | 1,25 | 598700 |
| 45,025 | 1,38 | 549750 |
| 50 | 1,50 | 500000 |
| 54,975 | 1,63 | 450250 |
| 59,87 | 1,75 | 401300 |
| 64,565 | 1,88 | 354350 |
| 69,15 | 2,00 | 308500 |
| 73,405 | 2,13 | 265950 |
| 77,34 | 2,25 | 226600 |
| 80,92 | 2,38 | 190800 |
| 84,13 | 2,50 | 158700 |
| 86,97 | 2,63 | 130300 |
| 89,44 | 2,75 | 105600 |
| 91,545 | 2,88 | 84550 |
| 93,32 | 3,00 | 66800 |
| 94,79 | 3,13 | 52100 |
| 95,99 | 3,25 | 40100 |
| 96,96 | 3,38 | 30400 |
| 97,73 | 3,50 | 22700 |
| 98,32 | 3,63 | 16800 |
| 98,78 | 3,75 | 12200 |
| 99,12 | 3,88 | 8800 |
| 99,38 | 4,00 | 6200 |
| 99,565 | 4,13 | 4350 |
| 99,7 | 4,25 | 3000 |
| 99,795 | 4,38 | 2050 |
| 99,87 | 4,50 | 1300 |
| 99,91 | 4,63 | 900 |
| 99,94 | 4,75 | 600 |
| 99,96 | 4,88 | 400 |
| 99,977 | 5,00 | 230 |
| 99,982 | 5,13 | 180 |
| 99,987 | 5,25 | 130 |
| 99,992 | 5,38 | 80 |
| 99,997 | 5,50 | 30 |
| 99,99767 | 5,63 | 23,35 |
| 99,99833 | 5,75 | 16,7 |
| 9,999 | 5,88 | 10,05 |
| 99,99966 | 6,00 | 3,4 |

2.6. FILOSOFÍA Y ESTRATEGIA DEL SEIS SIGMA

2.6.1. Equipo de Mejoramiento Continuo

El equipo de mejoramiento es indispensable en cualquier organización que desee implementar como filosofía de la calidad de los principios del método SS. Para estructurar este Equipo de Mejoramiento es necesario atravesar por seis etapas, que se enumeran a continuación:

- **Identificación y selección de proyectos:** Una vez identificados los problemas, el equipo de mejoramiento continuo presente en un proyecto y la dirección selecciona los más indicados en función de las posibilidades de implementación de los resultados obtenidos para la organización y la satisfacción del cliente.
- **Formación de los equipos de mejoramiento:** Dentro del equipo de mejoramiento existe el Líder del grupo (Cinturón Negro) que la gerencia asigna por sus conocimientos en el proceso o comprensión de las diversas herramientas estadísticas; este líder escoge aquellos individuos que poseen las cualidades necesarias para ingresar al proyecto de mejoramiento que es seleccionado como primordial para la organización.
- **Desarrollo del Plan de Mejoramiento:** Este documento es la guía del equipo de mejoramiento, por lo que debe ser claro en cuanto a los objetivos, responsabilidades, recursos y fechas establecidos en el proceso.
- **Capacitación de los miembros del equipo:** Es indispensable que los miembros del Equipo de Mejoramiento sean capacitados en herramientas de gestión, Estadísticas y probabilidades.
- **Ejecución del SS:** Los equipos de mejoramiento son responsables de: desarrollar los planes de los proyectos, los procedimientos necesarios para cada una de las soluciones que se presenten, implementar y asegurarse de que funcionan (midiendo y controlando los resultados), a cada una de las

propuestas presentadas en proyecto durante el tiempo proyectado para su cumplimiento.

- **Traspaso de la solución:** Una vez cumplidos los objetivos para los cuales fueron creados cada uno de los equipos, estos se disuelven y sus miembros retornan a sus responsabilidades iniciales dentro de la organización o pasan a integrar otros equipos de mejoramiento para los cuales estén capacitados.

Las funciones en el proceso SS se inspira en los niveles jerárquicos de las artes marciales como filosofía de mejora continua, se han otorgado diversos niveles de cinturones para aquellos miembros de la organización que lideran o ayudan implementar los proyectos de mejora. Se define la estructura organizacional del método SS de la siguiente forma:

2.6.2. El Cinturón Negro (Black Belts)

Son personas que se consagran a detectar oportunidades de cambios críticos y a conseguir que logren resultados. Es responsable de liderar, dirigir, delegar, entrenar los miembros de su equipo. Debe poseer amplios conocimientos tanto en materia de calidad, como en estadística, para el análisis resolución de problemas y toma de decisiones.

2.6.3. El Cinturón Verde (Green Belts)

Es el soporte a las tareas del Cinturón Negro. Sus funciones consisten en aplicar los nuevos conceptos y herramientas de Seis Sigma a las actividades de la organización.

2.6.4. El Primer Dan (Master Black Belts)

Sirve de entrenador, consultor y asesor a los miembros de la organización en especial a los Cinturón Negro que trabajan en los diversos proyectos. Debe poseer

mucha experiencia en la implementación del Seis Sigma, como en los procesos administrativos y operativos de la organización.

2.6.5. Esponsor o Champions

Es un ejecutivo o directivo que inicia y patrocina a un equipo de proyecto lo que lo hace responsable del éxito de los mismos. El Esponsor forma parte del Comité de Liderazgo, siendo sus responsabilidades: garantizar que los proyectos están ajustados a los objetivos generales de la organización, mantener informados a los miembros del Comité de Liderazgo sobre el avance del proyecto, convencer a la organización o terceros para aportar al equipo de mejoramiento los recursos necesarios para su sostenimiento, tales como; tiempo, dinero, y la colaboración de otros miembros de la organización. También, es responsable de conducir reuniones de revisión periódicas, manejar y controlar conflictos; y mantener relaciones con otros proyectos Seis Sigma de la organización.

2.6.6. Líder de Implementación o Chief Executive Officer CEO

Es responsable de implementar en el sistema de calidad de la organización el Método Seis Sigma y de los resultados que este arroje para la organización, siendo este el estratega más importante del sistema, ya que aporta una visión de todos los cambios que se deben encausar en la organización por lo que es responsable de desarrollar las estrategias adecuadas para direccionar estos cambios.

2.7. ESTRATEGIAS DEL SEIS SIGMA

La implementación del método SS comprende cuatro fases principales, cada una a su vez está compuesta por varias etapas. Estas etapas son: Disposición de Cambio, Despliegue de Objetivos, Desarrollo del Proyecto y Evaluación de Beneficios.

2.7.1. Disposición de cambio

En primer lugar es imperioso que los directivos de la organización se comprometan con el cambio. Este compromiso se logra si se exhibe el desarrollo de los mercados internacionales y de los procesos productivos en especial. En segundo lugar debe exponerse en forma clara lo que sucede con las organizaciones, detallando su evolución con respecto a sus competidores. El paso siguiente es demostrar las características y condiciones del método SS, mostrando además las discrepancias de este, en relación a otros Sistemas de Gestión de la Calidad y de mejoramiento continuo.

Como cuarto paso se planifica estratégicamente cuáles son los valores, misión y visión de la organización, puntualizar a continuación los objetivos a lograr para hacer posible los objetivos de más largo plazo. Procurara posteriormente, una visión compartida con la cual se alcance un compromiso en equipo que permita obtener óptimos resultados en la implantación del SS.

En quinto lugar se seleccionan los Líderes y Cinturones, en función de sus conocimientos y se procede a capacitar los diversos niveles de cinturones, así como todos los miembros que constituyen un equipo de mejoramiento. Esta capacitación incluirá aspectos vinculados al funcionamiento del SS, Control estadísticos de Procesos, Diseño de Experimentos, herramientas de Gestión de la Calidad, herramientas como la AMEF que es utilizada para especificar los problemas del proceso y detectar las variables críticas.

2.7.2. Despliegue de objetivos

Se establecen los sistemas de información, capacitación y control adecuados al sistema de mejora que incluye en los sistemas de información indicadores que permitan obtener que el nivel de SS posee el proceso. A su vez, se integran los primeros grupos de trabajo enlazados con los proyectos seleccionados.

2.7.3. Desarrollo del proyecto

Básicamente el primer paso para la elaboración de un proyecto SS es la definición de las características de calidad o los requerimientos de los clientes externos e internos, y establecer la manera en que se medirán estos requerimientos en función de las especificaciones o necesidades de los clientes. Los equipos de mejoramiento proceden a aplicar la metodología DMAMC (Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar), informando los directivos de la organización los avances de los diferentes proyectos, que los grupos de trabajo desarrollan.

2.7.4. Evaluación de beneficios

Una vez implantando cada una de las etapas se evalúa las mejoras producidas en cada uno de los proyectos desplegados en la organización, lo que implica que cada grupo de trabajo debe calcular los niveles de rendimiento DPMO, tomando este valor como termómetro o indicador de las diferentes alternativas de solución.

Figura 41. Cuadro Comparación de la calidad tradicional, ISO9000 y el Método Seis Sigma

| | CALIDAD TRADICIONAL | NORMAS ISO 9000 | METODOLOGIA SEIS SIGMA |
|----------------------|--|--|---|
| Calidad | La calidad se relaciona solo con el cumplimiento de las especificaciones del producto o el servicio. | La norma ISO 9000 toma como prioridad el cliente es decir el producto o servicio esta sujeto a las necesidades del cliente | La prioridad principal con el Método Seis Sigma es el cliente. Es decir el producto o servicio esta sujeto a las necesidades del cliente |
| Tramas de decisiones | Los criterios de calidad estaban sujetos a la subjetividad de los Empleados de mayor rango en la organización. | La toma de datos e información es fundamental en la gestión de la calidad, pero no se exige que la organización maneje técnicas estadísticas complejas | La dirección de la organización esta basada en las mediciones que se realizan en las diferentes actividades del proceso, tomando como herramienta principal las técnicas estadísticas |

| | | | |
|------------------------|--|--|---|
| Organización | Es de carácter autoritaria. en esta ,los mandos intermedios y el personal de los departamentos quedaban fuera del proceso de decisión y la autoridad para resolver los problemas | Existe un comité de calidad que debe acabar todos los problemas de calidad. Por lo que las soluciones algunas veces carecen de la rigurosidad científica. | Los equipos de mejoramientos poseen una estructura descentralizada, es decir los grupos de trabajo son establecidos específicamente para cada uno de los problemas de calidad, lo que permite una participación de todos los miembros de la organización a través de sus áreas funcionales |
| Documentos y registros | En la mayoría de estas organizaciones la documentación y los registros lo consideran como elementos indeseables que simplemente es un atasco para el normal desarrollo de la empresa | Los procedimientos y registros es parte esencial del sistema, ya que basado en estas, se evidencia el seguimiento y control de las variables críticas de cada uno de los procesos que cuentan la organización. | Al igual la norma ISO 9000, la documentación y registros es la evidencia del sistema, pero en el seis sigma se destaca que la información suministrada por esta documentación se evalué de manera mas profunda, aplicado herramientas estadísticas mas robustas. Por lo que el análisis que se haga es mas confiable para la toma de decisiones |
| Enfoque | Se enfoca en todo el sistema | En el proceso, donde se realiza el control a las variables críticas | |

2.8. MÉTODOS ESTADÍSTICOS ÚTILES EN EL CONTROL Y MEJORAMIENTO DE CALIDAD CON EL ENFOQUE SEIS SIGMA

La **estadística** es un conjunto de técnicas útiles para tomar decisiones acerca de un proceso o población con base en el análisis de la información contenida en una muestra de esa población. Los métodos estadísticos juegan un papel determinante en el mejoramiento de calidad. Proporcionan los medios principales para llevar a cabo el muestreo, prueba y evaluación de un producto; así mismo, la información

contenida en esos datos se usa para controlar y mejorar los procesos de manufactura. Además, la estadística es el lenguaje en los que el ingeniero de desarrollo, manufactura, compras, administración y otros componentes funcionales del negocio se comunican acerca de la calidad.

Se presenta una breve introducción a la **estadística descriptiva** y se indica el uso de técnicas gráficas y numéricas simples para resumir la información de datos muestrales. Después se discute la utilización de las **distribuciones de probabilidad** para modelar el comportamiento de los parámetros de los productos de un proceso o lote. Se presentan las técnicas de **inferencia estadística** –es decir, el uso de la información contenida en una muestra para sacar conclusiones acerca de la población de la que proviene la muestra.

La metodología estadística en el control y el mejoramiento de calidad aplicada a Seis Sigma tiene dos objetivos. Primero, se indica la forma en que pueden usarse herramientas simples de la estadística descriptiva para expresar cuantitativamente la valoración en las características de la calidad cuando se cuenta con una **muestra** de datos sobre estas características. En general, la muestra es tan sólo un subconjunto de datos tomados de una población o proceso más grande. El segundo objetivo es introducir las **distribuciones de probabilidad** y mostrar como proporciona una herramienta para modelar o describir las características de la calidad de un proceso.

2.8.1. Diagrama de Tallo y Hoja

Dos unidades de un producto fabricado en un proceso de manufactura nunca son idénticas. Es inevitable cierta **variación**. Como ejemplos, el contenido neto de una lata de refresco varía ligeramente de una lata a otra, y el voltaje de salida de una fuente de poder no es exactamente el mismo de una unidad a otra. La **estadística** es la ciencia de analizar datos y sacar conclusiones, tomando en consideración la variación en los datos.

Existen varios métodos gráficos que resultan muy útiles para resumir y presentar datos. Una de las gráficas más útiles es el **diagrama de tallo y hoja**.

Suponer que los datos están representados por x_1, x_2, \dots, x_n y que cada número x_i consta por lo menos de dos dígitos. Para construir un diagrama de tallo y hoja, cada número x_i se divide en dos partes: un tallo, que consta de uno o más de los primeros dígitos; y una hoja, que consta de los dígitos restantes. Por ejemplo, si los datos consisten en información del porcentaje defectuoso entre 0 y 100 observado en lotes de Sensores de medición de presión, utilizados en lo equipos de maquinaria pesada Caterpillar en el campo de la minería del Carbón entonces el valor 76 puede dividirse en el tallo 7 y la hoja 6.

En general, se elegirán relativamente pocos tallos en comparación con el número de observaciones. Elegir entre 5 y 20 tallos suele ser lo mejor. Una vez que se ha elegido un conjunto de tallos, se enlistan en el margen izquierdo del diagrama, y junto a cada tallo se enlista cada una de las hojas correspondientes a los valores de los datos observados en el orden que aparecen en el conjunto de datos.

Ejemplo Ilustrativo

Para ilustrar la construcción de un diagrama de tallo y hoja, considérese los datos de la tabla 5, que representan los datos del rendimiento semanal de una motoniveladora Caterpillar 24H de 450 HP, utilizada para el mejoramiento de las vías de acceso en la minería a cielo abierto. Para construir un diagrama de tallo y hoja, se seleccionan como tallos los valores 4, 5, 6, 7, 8, y 9. El diagrama de tallo y hoja se muestra en la figura 42.

Figura 42. Diagrama de tallo y hoja de los datos del rendimiento de la motoniveladora CAT-24H de 450 HP de la tabla 5.

| Tallo | Hoja | Frecuencia |
|----------|---------------------|------------|
| 4 | 8 9 7 9 5 | 5 |
| 5 | 3 2 1 3 9 4 | 7 |
| 6 | 3 0 4 4 5 2 0 8 5 9 | 10 |
| 7 | 9 3 8 5 7 6 5 3 | 8 |
| 8 | 8 3 1 6 5 1 2 | 7 |
| 9 | 2 1 2 | 3 |

Tabla 5. Rendimiento semanal de una motoniveladora CAT-24H utilizada en las operaciones de minería del carbón a cielo abierto.

| Semana | Rendimiento % | Semana | Rendimiento % |
|--------|---------------|--------|---------------|
| 1 | 48 | 21 | 68 |
| 2 | 53 | 22 | 65 |
| 3 | 49 | 23 | 73 |
| 4 | 52 | 24 | 88 |
| 5 | 51 | 25 | 69 |
| 6 | 52 | 26 | 83 |
| 7 | 63 | 27 | 78 |
| 8 | 60 | 28 | 81 |
| 9 | 53 | 29 | 86 |
| 10 | 64 | 30 | 92 |
| 11 | 59 | 31 | 75 |
| 12 | 54 | 32 | 85 |
| 13 | 47 | 33 | 81 |
| 14 | 49 | 34 | 77 |
| 15 | 45 | 35 | 82 |
| 16 | 64 | 36 | 76 |
| 17 | 79 | 37 | 75 |
| 18 | 65 | 38 | 91 |
| 19 | 62 | 39 | 73 |
| 20 | 60 | 40 | 92 |

La inspección del diagrama revela que la distribución del rendimiento tiene una forma aproximadamente simétrica, con un solo pico. El diagrama de tallo y hoja nos permite determinar rápidamente algunas características importantes de los datos que no son evidentes en la tabla de datos. Por ejemplo, la figura 42 ofrece una impresión visual de la forma, de la dispersión o variabilidad y de la tendencia central o mitad de los datos (la cuál está cerca de 68).

2.8.2. Variantes del Diagrama de Tallo y Hoja

Un diagrama de tallo y hoja ordenado tiene las hojas ordenadas por magnitud, como se muestra en la figura 43. Esta versión del diagrama (que algunos paquetes de software de estadística generan automáticamente)

Figura 43. Diagrama de tallo y hoja ordenado para los datos del rendimiento de la motoniveladora CAT-24H.

| Tallo | Hoja | Frecuencia |
|----------|---------------------|------------|
| 4 | 5 7 8 9 9 | 5 |
| 5 | 1 2 2 3 3 4 9 | 7 |
| 6 | 0 0 2 3 4 4 5 5 8 9 | 10 |
| 7 | 3 3 5 5 6 7 8 9 | 8 |
| 8 | 1 1 2 3 5 6 8 | 7 |
| 9 | 1 2 2 | 3 |

Hace muy sencillo encontrar los **percentiles** de los datos. En general, el 100 k-ésimo percentil es un valor tal que los menos 100k% de los valores de los datos están en este valor o debajo de él y al menos 100 (1-k) % de los valores de los datos están en este valor o arriba de él.

Al **quincuagésimo percentil** de la distribución de los datos se le llama la **mediana muestral** \tilde{x} . La mediana puede considerarse como el valor de los datos que divide la muestra exactamente por la mitad, de tal modo que la mitad de las observaciones son menores que la mediana y la mitad son mayores.

Cuando n , el número de observaciones, es impar, encontrar la mediana es sencillo. Primero se colocan las observaciones en orden ascendente (es decir, las observaciones se posicionan de la menor a la mayor). Entonces la mediana será la observación en la posición $[(n-1)/2 + 1]$ de esta lista ordenada. Cuando n es par, la media es el promedio de las observaciones en las posiciones ordenadas $(n/2) - \text{ava}$ y $(n/2 + 1) - \text{ava}$. Puesto que en el ejemplo $n = 40$ es un número par, la mediana es el promedio de las dos observaciones de las posiciones 20 y 21, o:

$$\tilde{x} = \frac{65 + 68}{2} = 66.5$$

El **décimo percentil** es la observación con la posición $(0.1)(40) + 0.5 = 4.5$ (el punto medio entre la cuarta y la quinta observación), o $(49 + 49)/2 = 49$. El **primer cuartil** es la observación con la posición $(0.25)(40) + 0.5 = 10.5$ (el punto medio entre la décima y la onceava observación) o $(53 + 54)/2 = 53.5$, y el **tercer cuartil** es la observación con la posición $(0.75)(40) + 0.5 = 30.5$ (el punto medio entre la trigésima y la trigésima primera observación) o $(79 + 81)/2 = 80$. En ocasiones, el primer y el tercer cuartil se denotan con los símbolos Q_1 y Q_3 , respectivamente, y en ocasiones se usa el **rango intercuartil** $IQR = Q_3 - Q_1$ como una medida de variabilidad. Para los datos del rendimiento de los semiconductores, el rango intercuartiles es $IQR = Q_3 - Q_1 = 80 - 53.5 = 26.5$.

En algunos diagramas de tallo y hoja, puede ser conveniente trabajar con más clases o tallos. Una manera de modificar los tallos originales es la siguiente: se divide el tallo 5 (por ejemplo) en dos nuevos tallos, 5^* y 5^0 . El tallo 5^* tiene las hijas 0, 1, 2, 3 y 4 y el tallo 5^0 tiene las hojas 5, 6, 7, 8, y 9. Con estos se duplicará el número de tallos originales. En número de tallos originales podría quintuplicarse definiendo cinco nuevos tallos: 5^* con las hojas 0 y 1, $5t$ (para valores de dos y

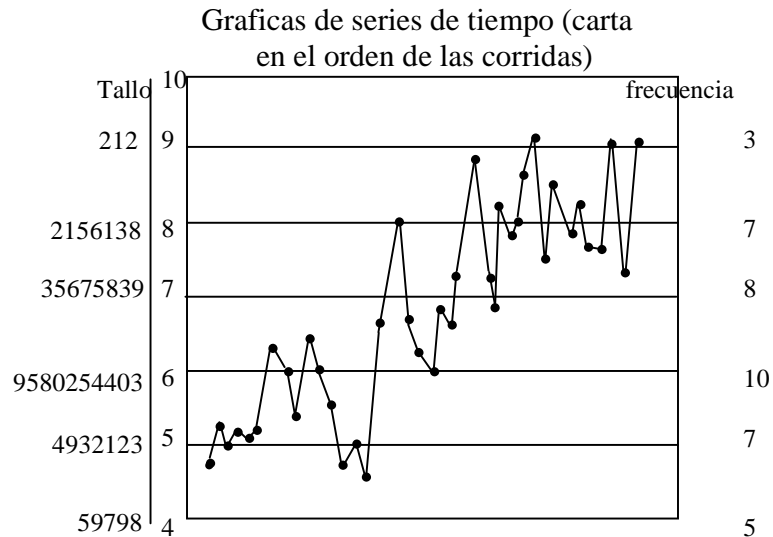
tres) con las hojas 2 y 3, 5f (para valores de cuatro y cinco) con las hojas 4 y 5, 5s (para valores de seis y siete) con las hojas 6 y 7, y 5^o con las hojas 8 y 9.

Por último, aun cuando el diagrama de tallo y hojas es una excelente forma de mostrar visualmente la variabilidad de los datos, no toma en consideración el **orden en el tiempo** de las observaciones.

El tiempo es con frecuencia un valor importante que contribuye a la variabilidad en los problemas de mejoramiento de calidad. Desde luego, los valores de los datos podrían graficarse contra el tiempo; a esta gráfica se le llama **gráfica de series de tiempo o carta en el orden de las corridas**. Sin embargo, un enfoque útil consiste en combinar las gráficas de series de tiempo con el diagrama de tallo y hoja para producir una **gráfica punto-dígito**.

En la figura 44 se muestra el gráfico punto-dígito para los datos del rendimiento de la motoniveladora CAT-24H. Esta representación indica claramente que el tiempo es una fuente de variabilidad importante en este proceso de operación del equipo. Más específicamente, los rendimientos en las primeras 20 semanas de operación se encuentran sustancialmente abajo de los rendimientos reportados en las últimas 20 semanas. Quizás algo haya cambiado en el proceso (o haya sido cambiado de manera deliberada por el personal de operación o los ingenieros de mantenimiento) que es responsable del mejoramiento del rendimiento.

Figura 44. Gráfica punto-digito de los datos del rendimiento de la motoniveladora CAT-24H.



2.8.3. Distribución de Frecuencia y el Histograma

En la tabla 6. Se representan 125 observaciones del diámetros interior de anillos forjados para pistones de un motor CAT 3044C DIT de un minicargador 277B. Los datos se colectaron en 25 muestras de cinco observaciones cada una. Obsérvese que hay cierta variabilidad en el diámetro de los anillos para pistones. Sin embargo, es muy difícil ver algún *patrón* de la variabilidad o de una *estructura* de los datos, cuando las observaciones se presentan como en la tabla 6. Una **distribución de frecuencia** es un arreglo de los datos por orden de magnitud. Es un resumen más compacto de los datos que un diagrama de tallo y hoja. Por ejemplo, en la tabla 7. Se muestra la distribución de frecuencia de los datos de los anillos para pistones. En esta tabla se observa que hubo un anillo que tuvo un diámetro entre 73.965mm y 73.970mm, ocho anillos que tuvieron diámetros entre 73.980mm y 73.985mm, etcétera.

En la figura 45 se muestra una gráfica de las frecuencias observadas contra el diámetro de los anillos. Esta representación se llama **histograma**. La altura de cada barra de la figura 45 es igual a la frecuencia con que ocurrió el diámetro del anillo. El histograma es una representación gráfica de los datos en la que es más sencillo ver tres propiedades:

1. Forma
2. Localización, o tendencia central
3. Dispersión o expansión

En los datos del diámetro de los anillos para pistones se observa que la distribución del diámetro de los anillos es aproximadamente simétrica y unimodal (con forma de montículo), con la tendencia central muy cerca de 74 mm. La variabilidad del diámetro de los anillos parece ser relativamente alta,

Tabla 6. Diámetro interior de los anillos forjados para pistones (mm)

| Numero de muestras | Observaciones | | | | |
|-----------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 74.030 | 74.002 | 74.019 | 73.992 | 74.008 |
| 2 | 73.995 | 73.992 | 74.001 | 74.011 | 74.004 |
| 3 | 73.988 | 74.024 | 74.021 | 74.005 | 74.002 |
| 4 | 74.002 | 73.996 | 73.993 | 74.015 | 74.009 |
| 5 | 73.992 | 74.007 | 74.015 | 73.989 | 74.014 |
| 6 | 74.009 | 73.994 | 73.997 | 73.985 | 73.993 |
| 7 | 73.995 | 74.006 | 73.994 | 74.000 | 74.005 |
| 8 | 73.985 | 74.003 | 73.993 | 74.015 | 73.998 |
| 9 | 74.008 | 73.995 | 74.009 | 74.005 | 74.004 |
| 10 | 73.998 | 74.000 | 73.990 | 74.007 | 73.995 |
| 11 | 73.994 | 73.998 | 73.994 | 73.995 | 73.990 |
| 12 | 74.004 | 74.000 | 74.007 | 74.000 | 73.996 |
| 13 | 73.983 | 74.002 | 73.998 | 73.997 | 74.012 |
| 14 | 74.006 | 73.967 | 73.994 | 74.000 | 73.984 |
| 15 | 74.012 | 74.014 | 73.998 | 73.999 | 74.007 |
| 16 | 74.000 | 73.984 | 74.005 | 73.998 | 73.996 |
| 17 | 73.994 | 74.012 | 73.986 | 74.005 | 74.007 |
| 18 | 74.006 | 74.010 | 74.018 | 74.003 | 74.000 |
| 19 | 73.984 | 74.002 | 74.003 | 74.005 | 73.997 |
| 20 | 74.000 | 74.010 | 74.013 | 74.020 | 74.003 |
| 21 | 73.988 | 74.001 | 74.009 | 74.005 | 73.996 |
| 22 | 74.004 | 73.999 | 73.990 | 74.006 | 74.009 |
| 23 | 74.010 | 73.989 | 73.990 | 74.009 | 74.014 |
| 24 | 74.015 | 74.008 | 73.993 | 74.000 | 74.010 |
| 25 | 73.982 | 73.984 | 73.995 | 74.017 | 74.013 |

Figura 45. Histograma de los datos del diámetro de los anillos para pistones

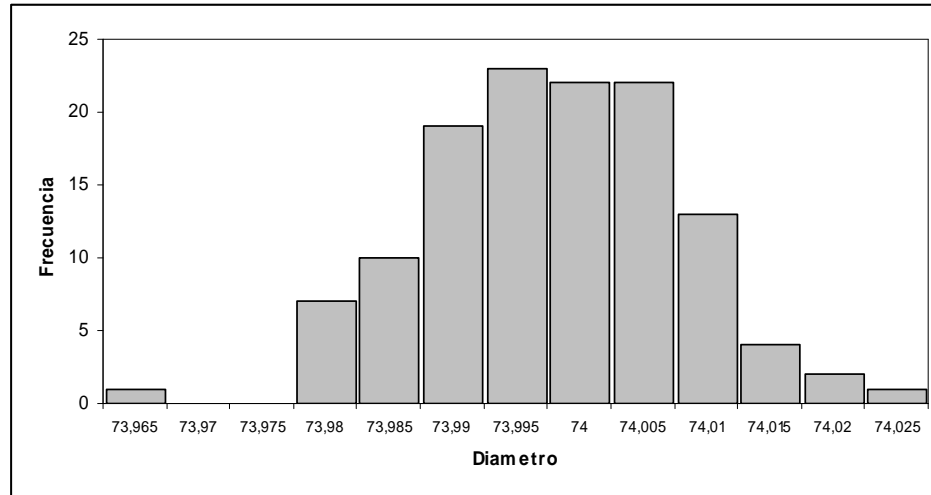


Tabla 7. Distribución de frecuencia del diámetro de los anillos para pistones

| Diámetro del anillo X (mm) | Conteo | Frecuencia | Frecuencia | | |
|-------------------------------|--------|------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| | | | Frecuencia acumulada | frecuencia Relativa | acumulada relativa |
| $73.965 \leq x < 73.970$ | | 1 | 1 | 0.008 | 0.008 |
| $73.970 \leq x < 73.975$ | | 0 | 1 | 0.000 | 0.008 |
| $73.975 \leq x < 73.980$ | | 0 | 1 | 0.000 | 0.008 |
| $73.980 \leq x < 73.985$ | | 8 | 9 | 0.064 | 0.072 |
| $73.985 \leq x < 73.990$ | | 10 | 19 | 0.080 | 0.152 |
| $73.990 \leq x < 73.995$ | | 19 | 38 | 0.152 | 0.304 |
| $73.995 \leq x < 74.000$ | | 23 | 61 | 0.184 | 0.488 |
| $74.000 \leq x < 74.005$ | | 22 | 83 | 0.176 | 0.664 |
| $74.005 \leq x < 74.010$ | | 22 | 105 | 0.176 | 0.840 |
| $74.010 \leq x < 74.015$ | | 13 | 118 | 0.104 | 0.944 |
| $74.015 \leq x < 74.020$ | | 4 | 122 | 0.032 | 0.976 |
| $74.020 \leq x < 74.025$ | | 2 | 124 | 0.016 | 0.992 |
| $74.025 \leq x < 74.030$ | | 1 | 125 | 0.008 | 1.000 |
| | Total | 125 | | 1.000 | |

Ya que algunos anillos son tan pequeños como 73.967mm, en tanto que otros son tan grandes como 74.030 mm. Por tanto, el histograma da cierta idea del proceso que la inspección de los datos originales de la tabla 6 no da.

Hay varias pautas útiles en la construcción de histogramas. Cuando los datos son numerosos, resulta muy útil agruparlos en clases, como en el ejemplo de los anillos para pistones. En general,

1. Usar entre 4 y 20 clases –muchas veces elegir el número de clases aproximadamente igual a la raíz cuadrada del tamaño de la muestra funciona bien.
2. Hacer las clases de anchura uniforme.
3. Empezar el límite inferior de la primera clase un poco abajo del valor menos de los datos.

Cuando los datos se agrupan en clases, los datos originales se condensan y, como resultado, se pierde cierto detalle. Por tanto, cuando el número de observaciones es relativamente pequeño, o cuando las observaciones sólo asumen pocos valores, el histograma puede construirse a partir de la distribución de frecuencia de los datos no agrupados. De manera alternativa, podría usarse un diagrama de tallo y hoja. Una ventaja importante del diagrama de tallo y hoja es que preservan las observaciones individuales, mientras que en un histograma se pierden.

2.8.4. Resumen Numérico de Datos

El diagrama de tallo y hoja y el histograma proporcionan una representación visual de tres propiedades de los datos muestrales: la forma de la distribución de los datos, la tendencia central en los datos, y la dispersión o variabilidad en los datos. También es útil usar medidas numéricas de la tendencia central y la dispersión.

Suponer que x_1, \dots, x_n son las observaciones en una muestra. La medida más importante de la tendencia central es el **promedio muestral**.

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}\end{aligned}\tag{2-1}$$

Obsérvese que el promedio muestral \bar{x} es tan sólo la medida de la n observaciones. El promedio muestral de los datos de los anillos para pistones es:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{125} x_i}{125} = \frac{9250.147}{125} = 74.001 \text{ mm}$$

Referirse a la figura 45 y obsérvese que el promedio muestral es el punto donde el histograma “está en equilibrio” perfecto. Por tanto, el promedio muestral representa el centro de masa de los datos muestrales.

La variabilidad en los datos muestrales se mide con la **varianza muestral**,

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}\tag{2-2}$$

Obsérvese que la varianza muestral es simplemente la suma del cuadrado de la desviación de cada observación del promedio muestral \bar{x} , dividida por el tamaño de la muestra menos uno. Si no hay variabilidad en la muestra, entonces cada observación muestral $x_i = \bar{x}$, y la varianza muestral S^2 , mayor es la variabilidad en los datos de la muestra.

Las unidades de la varianza muestral S^2 son el cuadrado de las unidades originales de los datos. Esto con frecuencia resulta inconveniente y complica la interpretación, por la que normalmente se prefiere usar la raíz cuadrada de S^2 , llamada la **desviación estándar muestral** S , como medida de la variabilidad. Se sigue que:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2-3)$$

La ventaja principal de la desviación estándar muestral es que está expresada en las unidades originales de las mediciones. Para los datos de los anillos para pistones, se encuentra que:

$$S^2 = 0.00010\text{mm}^2$$

Y

$$S = 0.010\text{mm}$$

Para ayudar a atender la forma en que la desviación estándar describe la variabilidad, considérese las dos muestras siguientes:

| Muestra 1 | Muestra 2 |
|---------------|---------------|
| $x_1 = 1$ | $x_1 = 1$ |
| $x_2 = 3$ | $x_2 = 5$ |
| $x_3 = 5$ | $x_3 = 9$ |
| $\bar{x} = 3$ | $\bar{x} = 5$ |

Evidentemente, la muestra 2 tiene una variabilidad mayor que la muestra 1. Esto se refleja en la desviación estándar, que para la muestra 1 es:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (x_i - \bar{x})^2}{2}} = \sqrt{\frac{(1-3)^2 + (3-3)^2 + (5-3)^2}{2}} = \sqrt{4} = 2$$

Y que para la muestra 2 es:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (x_i - \bar{x})^2}{2}} = \sqrt{\frac{(1-5)^2 + (5-5)^2 + (9-5)^2}{2}} = \sqrt{16} = 4$$

Por tanto, la variabilidad más grande de la muestra 2 se refleja en su desviación estándar más grande. Considérese ahora una tercera muestra, por ejemplo,

Muestra 3

$$x_1 = 101$$

$$x_2 = 103$$

$$x_3 = 105$$

$$\bar{x} = 103$$

La desviación estándar de esta tercera muestra es $S = 2$, que es idéntica a la desviación estándar de la muestra 1. Al comparar las dos muestras, se observa que ambas muestras tienen una variabilidad o dispersión idéntica respecto al promedio, y a esto se debe que tienen la misma desviación estándar. Lo anterior lleva a un punto importante: **la desviación estándar no refleja la magnitud de los datos muestrales, sino únicamente la dispersión respecto al promedio.**

Obsérvese que las ecuaciones 2-2 y 2-3 no son muy eficientes en lo que al procedimiento de cálculo se refiere, ya que cada número debe anotarse dos veces en la calculadora. Una fórmula más eficiente es:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}}{n-1}} \quad (2-4)$$

Al usar la ecuación 2-4, cada número sólo se anotaría una vez, siempre que $\sum_{i=1}^n x_i$ y $\sum_{i=1}^n x_i^2$ pudieran acumularse simultáneamente en la calculadora. Muchas calculadoras anuales de bajo costo realizan esta función y tienen cálculos automáticos de \bar{x} y S .

2.8.5. Diagrama de Caja

El diagrama de tallo y hoja y el histograma proporciona una impresión visual acerca de un conjunto de datos, mientras que el promedio y la desviación estándar muestrales proporcionan información cuantitativa acerca de características específicas de los datos.

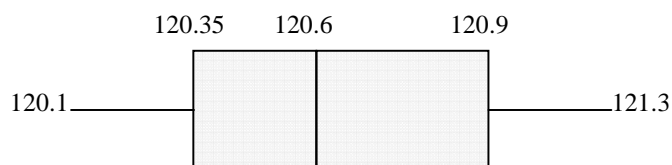
El **diagrama de caja** es una representación gráfica que muestra simultáneamente varias características importantes de los datos, tales como la localización o la tendencia central, la dispersión o variabilidad, el apartamiento de la simetría, y la identificación de observaciones que se localizan inusualmente lejos del grueso de los datos (a estas observaciones se les llama con frecuencia “puntos atípicos”).

Un diagrama de caja muestra los tres cuartiles, el mínimo, y el máximo de los datos en una caja rectangular, alineada sea horizontal o verticalmente. La caja abarca el rango intercuartílico con el lado izquierdo (o inferior) en el primer cuartil Q1 y el lado derecho (o superior) en el tercer cuartil Q3.

Tabla 8. Diámetros de las perforaciones (en mm) del soporte del frame de un tractor de llanta 834B-Caterpillar.

| | | |
|-------|-------|-------|
| 120.5 | 120.4 | 120.7 |
| 120.9 | 120.2 | 121.1 |
| 120.3 | 120.1 | 120.9 |
| 121.3 | 120.5 | 120.8 |

Figura 46. Diagrama de caja de los datos del diámetro de las perforaciones de los alojamientos del frame de un tractor de llanta 834B-CAT de la tabla 8.



Se traza una línea por la caja en el segundo cuartil (que es el quincuagésimo percentil o la mediana) $Q2 = \tilde{x}$. Se extiende una línea en ambos extremos hasta los valores externos. Estas líneas suelen llamarse **bigotes**. Algunos autores hacen

referencia al diagrama de caja como el **diagrama de caja y bigotes**. En algunos programas de computadora, los bigotes sólo extienden, a lo sumo, una distancia de 1.5 ($Q3 - Q1$) de los extremos de la caja y las observaciones que se localizan después de estos límites se marcan como puntos atípicos potenciales. Esta variante del procedimiento básico se conoce como el **diagrama de caja modificado**.

Ejemplo Ilustrativo

Los datos de la tabla 8 son los diámetros (en mm) de las perforaciones de los alojamientos del frame de un 834B-CAT. Obsérvese que la mediana de la muestra está a la mitad entre la sexta y la séptima observación en posición ordenada, o $(120.5 + 120.7)/2 = 120.6$, y que los cuartiles son $Q1 = 120.35$ y $Q3 = 120.9$. En la figura 46 se muestra el diagrama de caja. Este diagrama de caja indica que la distribución del diámetro de las perforaciones no es exactamente simétrica alrededor del valor central, ya que los bigotes izquierdo y derecho y las cajas izquierda y derecha alrededor de la mediana no tienen la misma magnitud.

Los diagramas de caja son de gran utilidad en las comparaciones gráficas de conjuntos de datos, ya que tienen impacto visual y son fáciles de entender. Por ejemplo, en la figura 47 se muestran las gráficas de caja comparativas para un índice de calidad de manufactura de productos fabricados en tres plantas. La inspección de este diagrama revela que en la planta 2 hay demasiada variabilidad y que las plantas 2 y 3 necesitan elevar el desempeño de su índice de calidad.

Figura 47. Diagramas de caja comparativos del índice de calidad para productos fabricados en tres plantas.

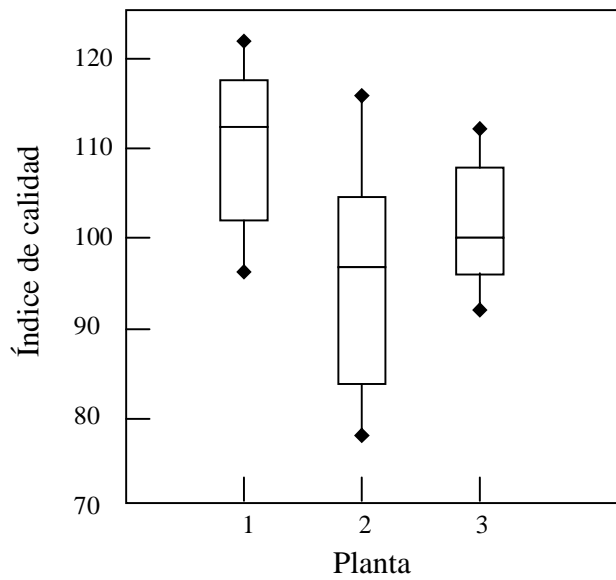
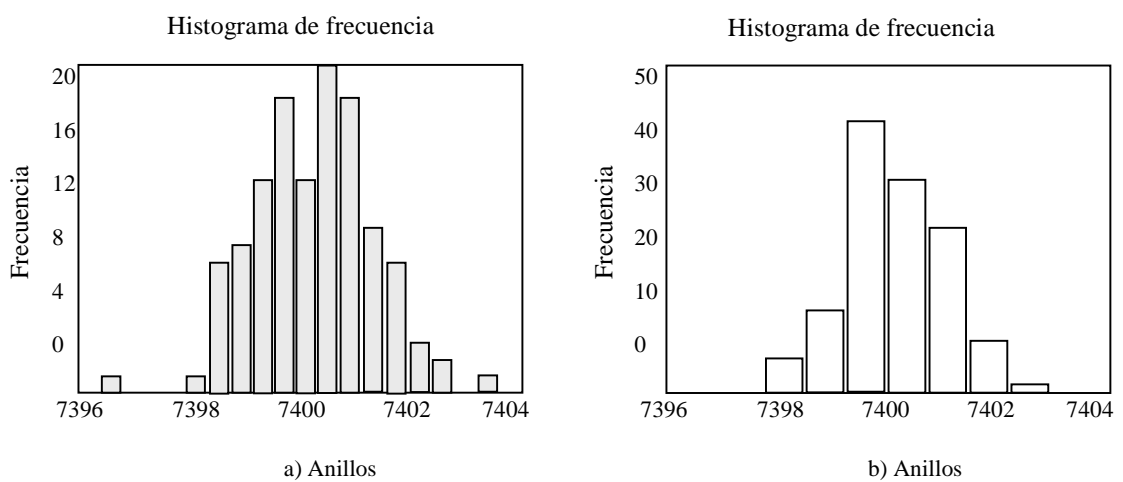


Figura 48. Histograma generado por computadora de los datos de los anillos para pistones de la tabla 6 a) 20 clases b) 10 clases.

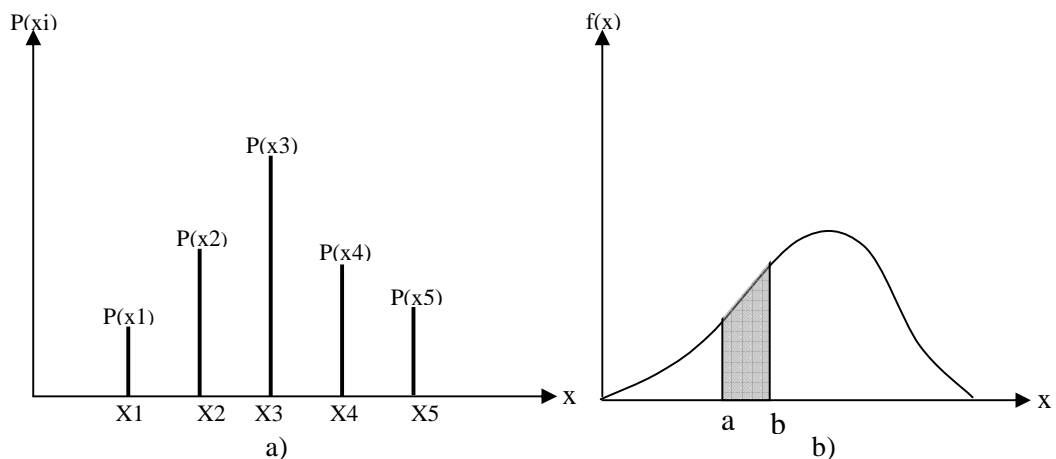


2.8.6. Distribuciones de Probabilidad

El histograma (o el diagrama de tallo y hoja, o el diagrama de caja) se usa para describir datos *muéstrales*. Una **muestra** es una colección de mediciones seleccionadas de una fuente más grande o **población**. Por ejemplo, los 125 diámetros de los anillos para pistones de la tabla 6 son una muestra de los diámetros de los anillos para pistones seleccionados del proceso de manufactura. La población en este ejemplo es el conjunto de todos los anillos para pistones producidos por ese proceso. Mediante el uso de métodos estadísticos, puede ser posible analizar los datos muestrales de los diámetros de los anillos para pistones y llegar a ciertas conclusiones acerca del proceso con que se fabrican los anillos.

Una **distribución de probabilidad** es un modelo matemático que relaciona el valor de la variable con la probabilidad que tiene ese valor de ocurrir en la población. En otras palabras, podría considerarse que el diámetro de los anillos para pistones es una **variable aleatoria**, ya que asume diferentes valores en la población de acuerdo con cierto mecanismo aleatorio, y de este modo la distribución de probabilidad del diámetro de los anillos describe la probabilidad de ocurrencia de cualquier valor del diámetro de los anillos en la población. Hay dos tipos de distribuciones de probabilidad.

Figura 49. Distribuciones de probabilidad. a) Caso discreto. b) Caso continuo.



Definición

- **Distribuciones continuas:** Cuando la variable que se está midiendo se expresa en una escala continua, su distribución de probabilidad se llama *distribución continua*. La distribución de probabilidad del diámetro de los anillos para pistones es continua.
- **Distribuciones discretas:** Cuando el parámetro que se está midiendo sólo puede asumir ciertos valores, como los enteros 0, 1, 2, ..., la distribución de probabilidad se llama *distribución discreta*. Por ejemplo, la distribución del número de disconformidades o defectos en tarjetas de circuitos impresos sería una distribución discreta.

En la figura 49a y 49b, se presentan ejemplos de distribuciones de probabilidad discreta y continua, respectivamente. La apariencia de una distribución discreta es la de una serie de “espigas” verticales, donde la altura de cada espiga es proporcional a la probabilidad. La probabilidad de que la variable aleatoria x asuma el valor específico x_i se describe:

$$P\{x = x_i\} = p(x_i)$$

La apariencia de una distribución continua es la de una curva suave, donde el área bajo la curva es igual a la probabilidad, por lo que la probabilidad de x esté en el intervalo entre a y b se describe:

$$P = \{a \leq x \leq b\} = \int_a^b f(x)dx$$

Ejemplo Ilustrativo

Una distribución discreta

En un proceso de manufactura se producen miles de tornillos por día. En promedio, 1% de estos tornillos no cumplen con las especificaciones. Cada hora, un inspector selecciona una muestra aleatoria de 50 tornillos y clasifica cada tornillo de la muestra como conforme o disconforme. Si se hace que x sea la variable aleatoria que representa el número de partes disconformes de la muestra, entonces la distribución de probabilidad de x es:

$$p(x) = \binom{50}{x} (0.01)^x (0.99)^{50-x} \quad x = 0, 1, 2, \dots, 50$$

Donde $\binom{50}{x} = 50! / [x!(50-x)!]$. Se trata de una distribución *directa*, ya que el número observado de disconformidades es $x = 0, 1, 2, \dots, 50$, y se le llama la **distribución binomial**. La probabilidad de encontrar una o menos partes disconformes en la muestra puede calcularse como:

$$\begin{aligned} P(x \leq 1) &= P(x = 0) + P(x = 1) \\ &= p(0) + p(1) \\ &= \sum_{x=0}^1 \binom{50}{x} (0.01)^x (0.99)^{50-x} \\ &= \frac{50!}{0!50!} (0.99)^{50} (0.01)^0 + \frac{50!}{1!49!} (0.99)^{49} (0.01)^1 \\ &= 0.6050 + 0.3056 = 0.9106 \end{aligned}$$

Ejemplo ilustrativo

Una distribución continúa

Suponer que x es una variable aleatoria que representa el contenido real en onzas de una lata de aditivo sólido de 1 lb. Utilizado en el refrigerante de los motores Caterpillar, para efecto de limpieza interna del sistema. Se supone que la distribución de probabilidad de x es:

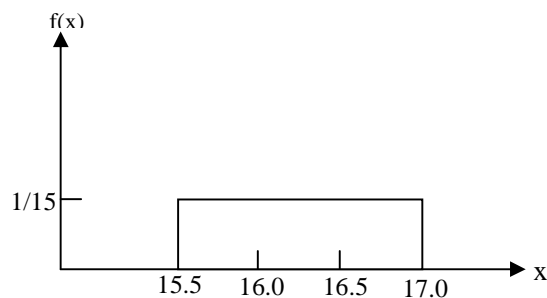
$$f(x) = \frac{1}{1.5} 15.5 \leq x < 17.0$$

Se trata de una distribución *continúa*, ya que el rango de x es el intervalo $[15.5, 17.0]$. A esta distribución se le llama la **distribución uniforme**, y se muestra gráficamente en la figura 50. Obsérvese que el área bajo la función $f(x)$ corresponde a la probabilidad, de donde la probabilidad de que una lata contenga menos de 16 oz es:

$$\begin{aligned} P\{x \leq 16.0\} &= \int_{15.5}^{16.0} f(x) dx \\ &= \int_{15.5}^{16.0} \frac{1}{1.5} dx \\ &= \frac{x}{1.5} \Big|_{15.5}^{16.0} = \frac{16.0 - 15.5}{1.5} = 0.3333 \end{aligned}$$

Esto se sigue intuitivamente al examinar la figura 50.

Figura 50. La distribución uniforme del ejemplo



La **media** μ de una distribución de probabilidad es una medida de la **tendencia central** de la distribución, o de su **localización**. La media se define como:

$$\mu = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx, & x \text{ continua} \\ \sum_{i=1}^{\infty} x_i p(x_i), & x \text{ discreta} \end{cases} \quad (2-5 \text{ a}) \text{ y } (2-5 \text{ b})$$

Para el caso de una variable aleatoria discreta que tiene exactamente N valores igualmente probables [es decir, $p(x_i) = 1/N$], la ecuación (2-5 b) se reduce a:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Obsérvese la similitud de esta última expresión con el promedio muestral \bar{x} definido en la ecuación 2-1. La media es el punto donde la distribución “está en equilibrio” perfecto (ver la figura 51). Por tanto, la media es tan sólo el centro de masa de la distribución de probabilidad. Obsérvese por la figura 51b que la media no es necesariamente el quincuagésimo percentil de la distribución (**la mediana**) y, por la figura 51c, que no es necesariamente el valor más posible para la variable (al que se llama la **moda**). La media simplemente determina la **localización** de la distribución, como se muestra en la figura 52.

La dispersión, extensión o variabilidad de una distribución está expresada por la **varianza** σ^2 .

La definición de la varianza es:

$$\sigma^2 = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx, & x \text{ continua} \\ \sum_{i=1}^{\infty} (x_i - \mu)^2 p(x_i), & x \text{ discreta} \end{cases} \quad (2-6a \text{ Y } 2-6b)$$

Figura 51. La media de una distribución

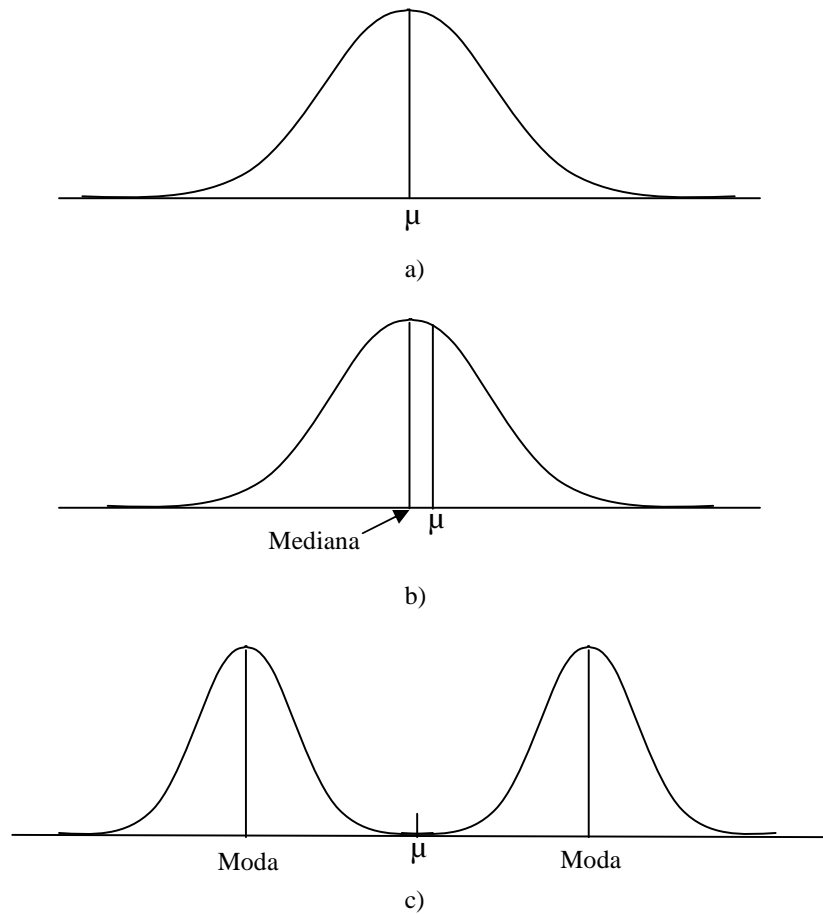
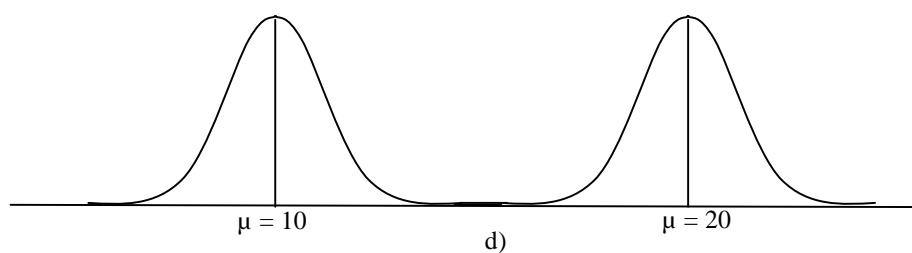


Figura 52. Dos distribuciones de probabilidad con medias diferentes

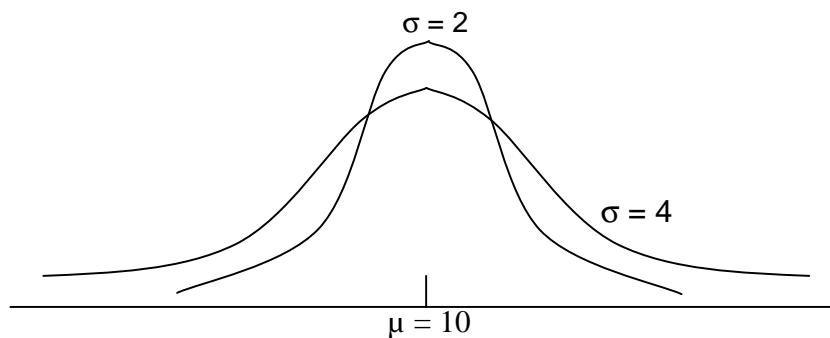


Cuando la variable aleatoria es discreta con N valores igualmente probables, la ecuación 2-6b se reduce a:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}$$

Y se observa que en este caso la varianza es la distancia cuadrada promedio de cada elemento de la población a la media. Obsérvese la similitud con la varianza muestral S^2 definida en la ecuación 2-2.

Figura 53. Dos distribuciones de probabilidad con la misma media pero desviaciones estándar diferentes



Si $\sigma^2 = 0$, no hay variabilidad en la población. Cuando la variabilidad aumenta, la varianza σ^2 se incrementa. La varianza se expresa en el cuadrado de las unidades de la variable original. Por ejemplo, si se están midiendo voltajes, las unidades de la varianza son $(\text{volts})^2$. Por tanto, se acostumbra trabajar con la raíz cuadrada de la varianza, llamada la **desviación estándar** σ . Se sigue que:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2-7)$$

La desviación estándar es una medida de la extensión o dispersión de la población expresada en las unidades originales. En la figura 53 se muestran dos distribuciones con la misma medida pero desviaciones estándar diferentes.

2.8.7. Distribuciones discretas importantes

Varias distribuciones de probabilidad discretas se presentan con frecuencia en el control estadístico de calidad y con el enfoque seis sigma. En esta parte se discuten la distribución hipergeométrica, la distribución binomial, la distribución de Poisson y la distribución de Pascal o binomial negativa.

➤ Distribución hipergeométrica

Suponer que hay una población finita que consta de N artículos. Cierta número, por ejemplo, $D(D \leq N)$ – de estos artículos están incluidos en una clase de interés. Se selecciona una muestra aleatoria de n artículos de la población sin *reemplazo*, y se observa el número de artículos de la muestra que están incluidos en la clase de interés –por ejemplo x . entonces x es una variable aleatoria hipergeométrica con la distribución de probabilidad definida como sigue.

Definición

La **distribución de probabilidad hipergeométrica** es:

$$p(x) = \frac{\binom{D}{x} \binom{N-D}{n-x}}{\binom{N}{n}} \quad x = 0, 1, 2, \dots, \min(n, D) \quad (2-8)$$

La media y la varianza de la distribución son:

$$\mu = \frac{nD}{N} \quad (2-9)$$

Y

$$\sigma^2 = \frac{nD}{N} \left(1 - \frac{D}{N}\right) \left(\frac{N-n}{N-1}\right) \quad (2-10)$$

En la definición anterior, la cantidad:

$$\binom{a}{b} = \frac{a!}{b!(a-b)!}$$

Es el número de combinaciones de a artículos tomados b a la vez.

La distribución hipergeométrica es el modelo de probabilidad apropiado para seleccionar una muestra aleatoria de n artículos sin reemplazo de un lote de N artículos, de los cuales D son disconformes o defectuosos. Por muestra aleatoria se entiende una muestra que se selecciona de tal modo que todas las muestras posibles tienen la misma oportunidad de ser elegidas. En estas aplicaciones, x representa por lo general el número de artículos disconformes encontrados en la muestra. Por ejemplo, suponer que un lote contiene 100 camiones 793C Caterpillar utilizados para el acarreo de material estéril en la minería de carbón a cielo abierto, 5 de los cuales no cumplen con los requerimientos. Si se seleccionan 10 equipos al azar sin reemplazo, entonces la probabilidad de encontrar uno o menos equipos disconformes en la muestra es:

$$\begin{aligned}
P\{X \leq 1\} &= P\{x = 0\} + P\{x = 1\} \\
&= \frac{\binom{5}{0} \binom{95}{10}}{\binom{100}{10}} + \frac{\binom{5}{1} \binom{95}{9}}{\binom{100}{10}} \\
&= 0.923
\end{aligned}$$

➤ **Distribución binomial**

Considérese un proceso que consta de una secuencia n ensayos independientes. Por ensayos independientes se entiende que el resultado de cada ensayo no depende de forma alguna del resultado de los ensayos anteriores. Cuando el resultado de cada ensayo es “éxito” o “fracaso”, los ensayos se llaman **ensayos de Bernoulli**. Si la probabilidad de “éxito” en cualquier ensayo –por ejemplo, p - es constante, entonces el número de “éxitos” x en los ensayos de Bernoulli tiene la **distribución binomial** con parámetros n y p , definida como:

Definición

La **distribución binomial** con parámetros $n \geq 0$ y $0 < p < 1$ es:

$$p(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad x = 0, 1, \dots, n \quad (2-11)$$

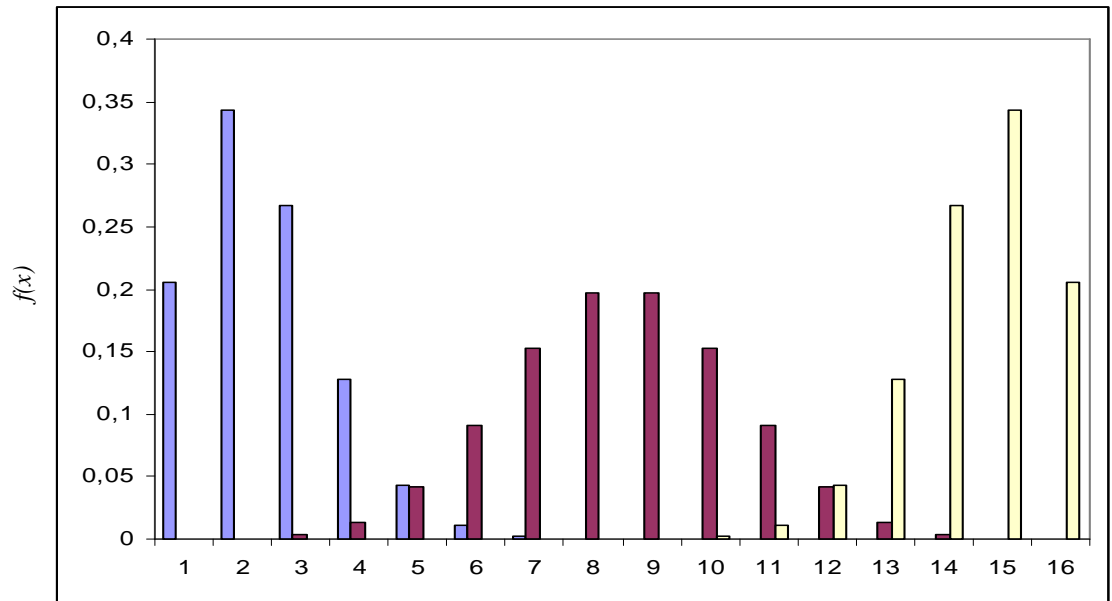
La media y la varianza de la distribución binomial son:

$$\begin{aligned}
\mu &= np \\
\sigma^2 &= np(1-p)
\end{aligned}
\quad (2-12) \text{ y } (2-13)$$

La distribución binomial se usa frecuentemente en la ingeniería de calidad y en la metodología Seis Sigma. Es el modelo de probabilidad apropiado para hacer muestreo de una población infinitamente grande, donde p representa la fracción de artículos defectuosos o disconformes en la población. En estas aplicaciones, x suele representar el número de artículos disconformes encontrados en una muestra aleatoria de n artículos. Por ejemplo, si $p = 0.10$ $n = 15$, entonces la probabilidad de obtener x artículos disconformes se calcula con la ecuación 2-11 como:

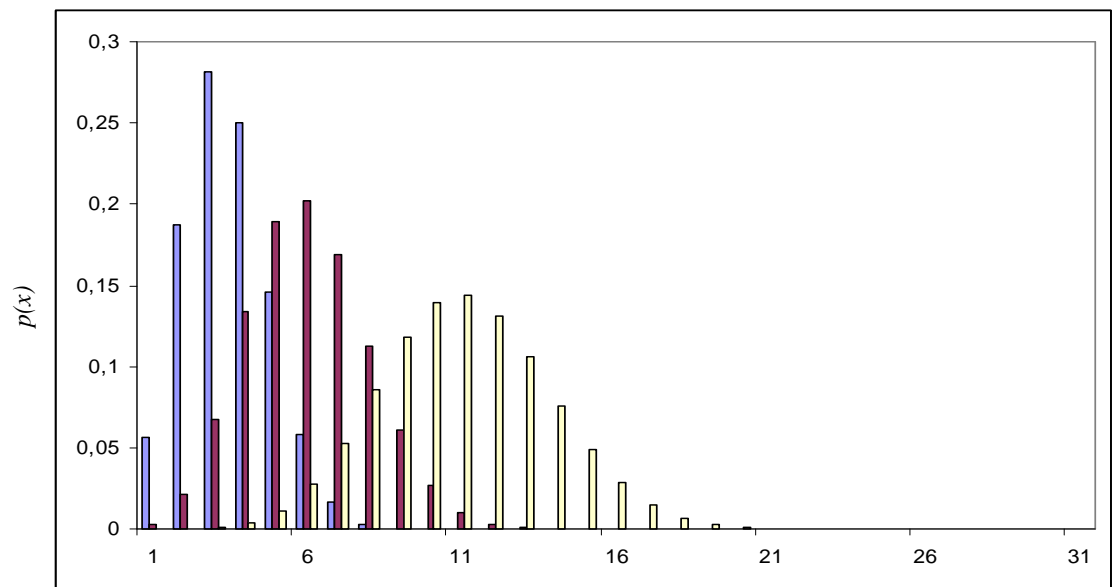
Figura 54. Distribuciones binomiales para valores seleccionados de n y p

| x | P(x) |
|----|--------|
| 0 | 0.2059 |
| 1 | 0.3432 |
| 2 | 0.2669 |
| 3 | 0.1285 |
| 4 | 0.0428 |
| 5 | 0.0105 |
| 6 | 0.0019 |
| 7 | 0.0003 |
| 8 | 0.0000 |
| • | • |
| • | • |
| • | • |
| 15 | 0.0000 |



x

a)



x

b)

En la figura 54 se muestra gráficamente varias distribuciones binomiales, donde su forma es típica de todas las distribuciones binomiales. Para n fija, la distribución se hace más simétrica cuando p se incrementa de 0 a 0.5 o se decrementa de 1 a 0.5. Para p fija, la distribución se hace más simétrica cuando n se incrementa.

Una variable aleatoria que surge con frecuencia en el control estadístico de la calidad es:

$$\hat{p} = \frac{x}{n}$$

Donde x tiene una distribución binomial con parámetros n y p . con frecuencia \hat{p} es el cociente del número observado de artículos defectuosos o disconformes en una muestra (x) y el tamaño de la muestra (n) y se le llama generalmente la **fracción muestral defectuosa o fracción muestral disconforme**. El símbolo “^” se usa para indicar que \hat{p} es una estimación del verdadero valor desconocido del parámetro binomial p . la distribución de probabilidad de \hat{p} se obtiene a partir de la distribución binomial, ya que:

$$P\{\hat{p} \leq a\} = P\left\{\frac{x}{n} \leq a\right\} = P\{x \leq na\} = \sum_{x=0}^{[na]} \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$$

Donde $[na]$ denota el entero más grande menor o igual que na . Es sencillo demostrar que la media de \hat{p} es p y que la varianza de \hat{p} es:

$$\sigma_{\hat{p}}^2 = \frac{p(1-p)}{n}$$

➤ **Distribución de Poisson**

Una distribución discreta útil en el control estadístico de calidad y en la metodología Seis Sigma es la distribución de Poisson, definida como sigue.

Definición

La **distribución de Poisson** es:

$$p(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad x = 0, 1, \dots \quad (2-15)$$

Donde el parámetro $\lambda > 0$. La **media** y la **varianza** de la distribución de Poisson son:

$$\mu = \lambda \quad (2-16)$$

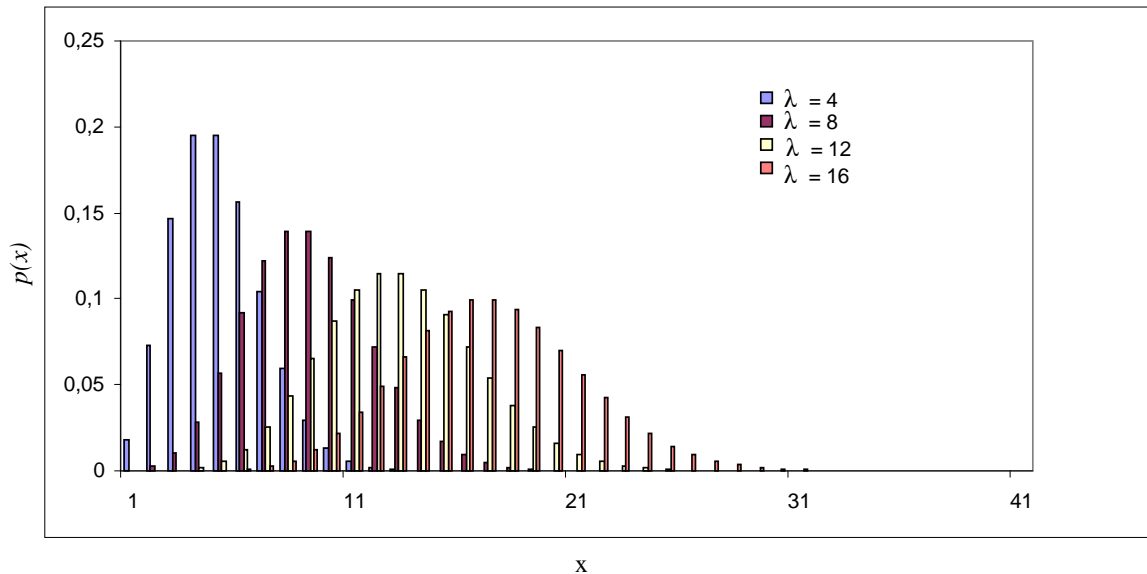
Y

$$\sigma^2 = \lambda \quad (2-17)$$

Obsérvese que la media y la varianza de la distribución de Poisson son ambas iguales al parámetro λ .

Una aplicación típica de la distribución de Poisson en el control de calidad es como un modelo del número de defectos o disconformidades que ocurren en una unidad de producto. De hecho, la distribución de Poisson suele ser una aproximación adecuada de cualquier fenómeno aleatorio que ocurre sobre una base por unidad (o por unidad de área, por unidad de volumen, por unidad de tiempo, etc.). Como un ejemplo, suponer que el número de defectos por unidad en la conexión de alambres que ocurre en un dispositivo semiconductor sigue una distribución de Poisson con parámetro $\lambda = 4$.

Figura 55. Distribuciones de probabilidad de poisson para valores seleccionados de λ



Entonces de que la probabilidad de que un dispositivo semiconductor seleccionado al azar contenga dos o menos defectos en la conexión de alambres es:

$$P\{x \leq 2\} = \sum_{x=0}^2 \frac{e^{-4} 4^x}{x!}$$

$$= 0.0183 + 0.0733 + 0.1464 = 0.2380$$

En la figura 55 se muestran varias distribuciones de probabilidad de Poisson. Obsérvese que se trata de una distribución *sesgada*; es decir, la cola de la derecha es más larga. Conforme al parámetro λ se hace más grande, la apariencia de la distribución de Poisson se hace simétrica.

La distribución de Poisson puede derivarse como una forma límite de la distribución binomial. Es decir, si en una distribución binomial con parámetros n y p se hace que n tienda a infinito y p tienda a cero de tal modo que $np = \lambda$ sea una constante, se obtiene la distribución de Poisson. También es posible derivar la distribución de Poisson utilizando un razonamiento de probabilidad puro.

➤ **Distribución de Pascal y otras distribuciones relacionadas**

La distribución de Pascal, al igual que la distribución binomial, tiene su base en los ensayos de Bernoulli. Considérese una secuencia de ensayos independientes, cada uno con probabilidad de éxito p , y sea que x denote los ensayos en los que ocurre el éxito r -ésimo. Entonces x es una variable aleatoria de Pascal con la distribución de probabilidad definida como sigue.

Definición

La **distribución de Pascal** es:

$$P(x) = \binom{x-1}{r-1} p^r (1-p)^{x-r} \quad x = r, r+1, r+2, \dots \quad (2-18)$$

Donde $r \geq 1$ es un entero. La **media** y la **varianza** de la distribución de Pascal son:

$$\mu = \frac{r}{p} \quad (2-19)$$

Y

$$\sigma^2 = \frac{r(1-p)}{p^2} \quad (2-20)$$

Respectivamente.

Dos casos especiales de la distribución de Pascal son de interés. El primero de ellos es cuando $r > 0$ y no necesariamente un entero. A la distribución resultante se le llama **distribución binomial negativa**. Es relativamente común referirse a la ecuación 2-18 como la distribución binomial negativa, a un cuando r es un entero. La distribución binomial negativa, al igual que la distribución de Poisson, en ocasiones es útil como el modelo estadístico fundamental para varios tipos de datos “de conteos”, tales como la ocurrencia de disconformidades en una unidad de producto. Existe una importante dualidad entre la distribución binomial y la binomial negativa. En la distribución binomial se establece el tamaño de la muestra (el número de ensayos de Bernoulli) y se observa el número de éxitos; en la distribución binomial negativa se establece el número de éxitos y se observa el tamaño de la muestra (el número de ensayos de Bernoulli) que se necesita para conseguirlos. Este concepto es de particular importancia en varias clases de problemas de muestreo.

El otro caso especial de distribución de Pascal es cuando $r = 1$, en cuyo caso se tiene la **distribución geométrica**. Se trata de la distribución del número de ensayos de Bernoulli hasta que ocurre el *primer éxito*.

2.8.8. Distribuciones Continuas Importantes

Hay varias distribuciones continuas que son importantes en el control estadístico de calidad y en la metodología Seis Sigma, las cuales incluyen la distribución normal, la distribución exponencial, la distribución gamma y la distribución de Weibull.

➤ Distribución normal

Probablemente la distribución normal sea la distribución más importante tanto en la teoría como en la aplicación de la estadística. Si x es una variable aleatoria normal, entonces la distribución de probabilidad de x se define como sigue.

Definición

La **distribución normal** es:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (2-21)$$

La media de la distribución normal es μ ($-\infty < \mu < \infty$) y la varianza es $\sigma^2 > 0$.

La utilización de la distribución normal es tan frecuente que muchas veces se emplea una notación especial, $x \sim N(\mu, \sigma^2)$, para denotar que x sigue una distribución normal con media μ y varianza σ^2 . La apariencia visual de la distribución normal es una curva simétrica, unimodal o **en forma de campana**, la cual se muestra en la figura 56.

Hay una interpretación simple de la desviación estándar σ de una distribución normal, la cual se ilustra en la figura 57. Obsérvese que 68.26% de los valores de la población se localizan entre los límites definidos por la media más menos una desviación estándar ($\mu \pm 1\sigma$); 95.46% de los valores se localizan entre los límites definidos por la media más menos dos desviaciones estándar ($\mu \pm 2\sigma$); y 99.73% de los valores de la población se localizan dentro de los límites definidos por la media más menos tres desviaciones estándar ($\mu \pm 3\sigma$), por tanto, la desviación estándar mide la distancia sobre la escala horizontal asociada con los límites que contienen 68.26%, 95.46% y 99.73% de los valores. Es una práctica común redondear estos porcentajes en 68%, 95% y 99.7%.

Figura 56. La distribución normal

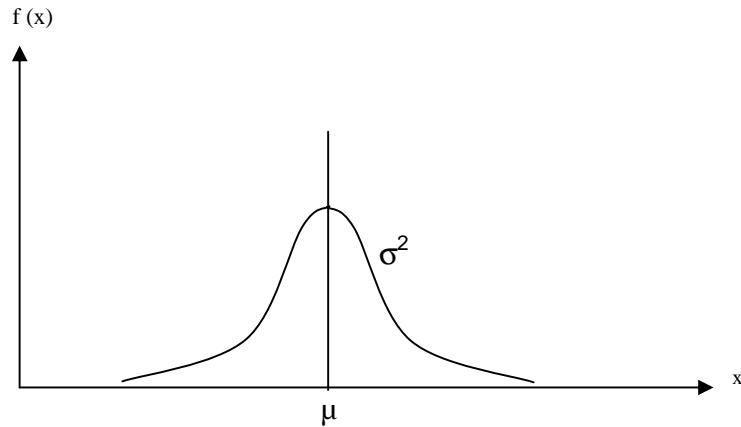
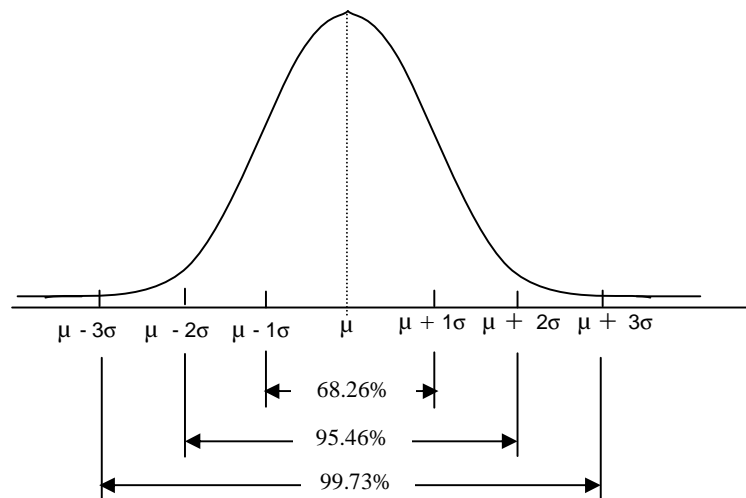


Figura 57. Áreas bajo la distribución normal



La distribución normal acumulada se define como la probabilidad de que la variable aleatoria normal x sea menor o igual que cierto valor a , o:

$$P\{x \leq a\} = F(a) = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2-22)$$

Esta integral no puede evaluarse en forma elemental o cerrada. Sin embargo, utilizando el cambio de variable:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2-23)$$

La evaluación puede hacerse de manera independiente de μ y σ^2 , es decir,

$$P\{x \leq a\} = P\left\{z \leq \frac{a - \mu}{\sigma}\right\} = \Phi\left(\frac{a - \mu}{\sigma}\right)$$

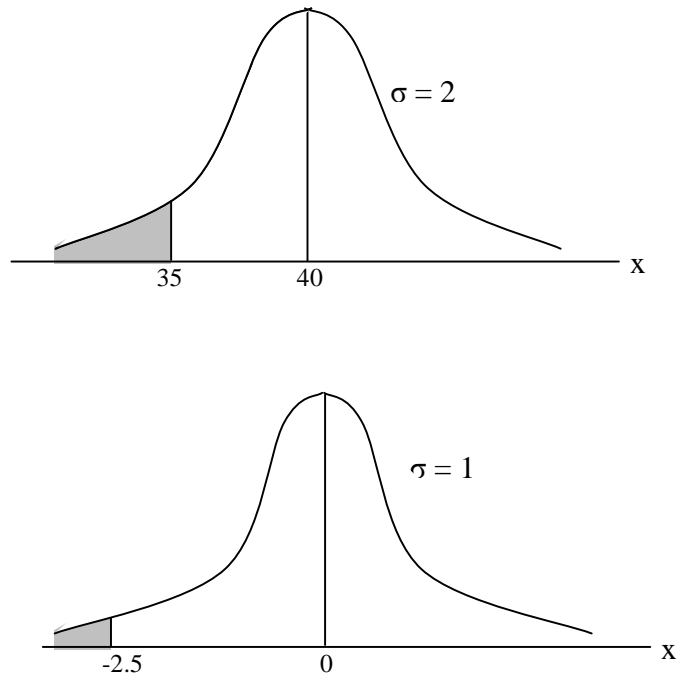
Donde $\Phi(\cdot)$ es la función de distribución acumulada de la **distribución normal estándar** (media = 0, desviación estándar = 1). A la transformación 2-23 suele llamársele **estandarización**, ya que convierte una variable aleatoria $N(\mu, \sigma^2)$ en una variable aleatoria $N(0, 1)$.

Ejemplo Ilustrativo I

La resistencia del papel empleado en forma de gasket (sello) para la instalación de una bomba hidráulica es una característica importante de la calidad. Se sabe que la resistencia –por ejemplo, x – tiene una distribución normal con media $\mu = 40$ lb/pulg² y desviación estándar $\sigma = 2$ lb/pulg², lo cual se denota $x \sim N(40, 2^2)$. Se espera que el gasket tenga una resistencia de por lo menos 35 lb/pulg². La probabilidad de que un gasket hecho con este papel cumplirá con esta especificación o la excederá es $P\{x \geq 35\}$. Obsérvese que:

$$P\{x \geq 35\} = 1 - P\{x \leq 35\}$$

Figura 58. Cálculo de $p(x \leq 35)$ en el ejemplo ilustrativo



Para evaluar esta probabilidad en las tablas normales estándar, se estandariza el punto 35 y se encuentra:

$$\begin{aligned} P\{x \leq 35\} &= P\left\{z \leq \frac{35 - 40}{2}\right\} \\ &= P\{z \leq -2.5\} \\ &= \Phi(-2.5) \\ &= 0.0062 \end{aligned}$$

Por consiguiente, la probabilidad buscada es:

$$P\{x \geq 35\} = 1 - P\{x \leq 35\} = 1 - 0.0062 = 0.9938$$

En la figura 58 se muestra la probabilidad tabulada para la distribución $N(40, 2^2)$ y para la distribución normal estándar. Obsérvese que el área sombreada a la izquierda de 35 lbpulg² en la figura 58 representa la fracción disconforme o “porción caída” producida en el proceso de fabricación de los gasket.

Obsérvese que:

$$\begin{aligned} P\{x \geq a\} &= 1 - P\{x \leq a\} \\ P\{x \leq -a\} &= P\{x \geq a\} \end{aligned} \quad (2-24a \text{ Y } 2-24b)$$

Y

$$P\{x \geq -a\} = P\{x \leq a\} \quad (2-24c)$$

Al resolver un problema, es conveniente trazar una gráfica de la distribución, como en la figura 58.

Ejemplo Ilustrativo II

El diámetro de un eje metálico empleado para transmitir potencia mecánica sigue una distribución normal con media 0.2508 pulgadas y desviación estándar 0.0005 pulgadas. Las especificaciones del eje se han establecido como 0.2500 ± 0.0015 pulgadas. Quiere determinarse la fracción de los ejes producidos que se ajusta a las especificaciones. La distribución normal apropiada se muestra en la figura 59.

Obsérvese que:

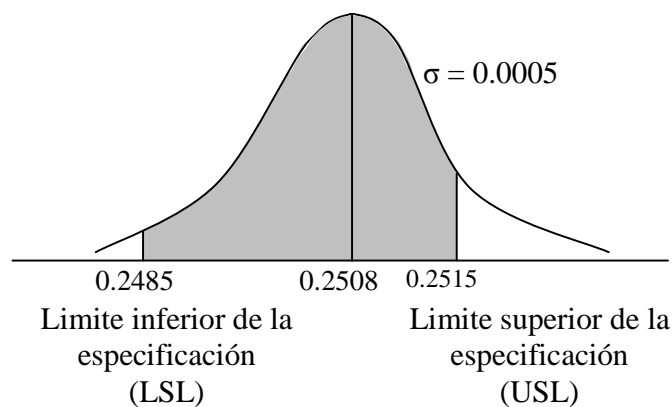
$$\begin{aligned} P\{0.2485 \leq x \leq 0.2515\} &= P\{x \leq 0.2515\} - P\{x \leq 0.2485\} \\ &= \Phi\left(\frac{0.2515 - 0.2508}{0.0005}\right) - \Phi\left(\frac{0.2485 - 0.2508}{0.0005}\right) \\ &= \Phi(1.40) - \Phi(-4.60) \\ &= 0.9265 - 0.0000 \\ &= 0.9265 \end{aligned}$$

Por tanto, se esperaría que el rendimiento del proceso sea aproximadamente de 92.65%; es decir, cerca de 92.65% de los ejes producidos cumplirán con las especificaciones.

Obsérvese que casi todos los ejes disconformes son demasiado grandes, debido a que la media del proceso se localiza muy cerca del límite superior de la especificación. Supóngase que el proceso de manufactura puede volver a centrarse, quizás mediante un ajuste de la máquina, de tal modo que la media del proceso sea exactamente igual al valor nominal de 0.2500. Se tiene entonces:

$$\begin{aligned}
 P\{0.2485 \leq x \leq 0.2515\} &= P\{x \leq 0.2515\} - P\{x \leq 0.2485\} \\
 &= \Phi\left(\frac{0.2515 - 0.2500}{0.0005}\right) - \Phi\left(\frac{0.2485 - 0.2500}{0.0005}\right) \\
 &= \Phi(3.00) - \Phi(-3.00) \\
 &= 0.99865 - 0.00135 \\
 &= 0.9973
 \end{aligned}$$

Figura 59. Distribución del diámetro de los ejes



Ejemplo Ilustrativo III

En ocasiones, en vez de encontrar la probabilidad asociada con un valor particular de una variable aleatoria normal, se encuentra necesario hacer lo contrario – encontrar un valor particular de una variable aleatoria normal que da como resultado una probabilidad dada. Por ejemplo, suponer que $x \sim N(10, 9)$ y que quiere encontrarse el valor de x –por ejemplo, a –tal que $P\{x < a\} = 0.05$. por tanto:

$$P\{x > a\} = P\left\{z > \frac{a-10}{3}\right\} = 0.05$$

o

$$P\left\{z \leq \frac{a-10}{3}\right\} = 0.95$$

Se tiene por la tabla II del apéndice $P\{z \leq 1.645\} = 0.95$, de donde:

$$\frac{a-10}{3} = 1.645$$

o

$$a = 10 + 3(1.645) = 14.935$$

La distribución normal posee muchas propiedades útiles. Una de ellas se refiere a las combinaciones lineales de variables aleatorias que tienen una distribución normal y son independientes. Si x_1, x_2, \dots, x_n son variables aleatorias que están normal e independientemente distribuidas con medias $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ y varianzas $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$, respectivamente, entonces la distribución de:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$$

Es normal con media,

$$\mu_y = a_1\mu_1 + a_2\mu_2 + \cdots + a_n\mu_n \quad (2-25)$$

Y varianza,

$$\sigma_y^2 = a_1^2\sigma_1^2 + a_2^2\sigma_2^2 + \cdots + a_n^2\sigma_n^2 \quad (2-26)$$

Donde a_1, a_2, \dots, a_n son Constantes.

➤ **El teorema del límite central**

Es común suponer que la distribución normal es el modelo de probabilidad apropiado para una variable aleatoria. Más adelante se discutirá la manera de verificar la validez de este supuesto; sin embargo, con frecuencia el teorema del límite central es una justificación de la normalidad aproximada.

Definición: El teorema del límite central

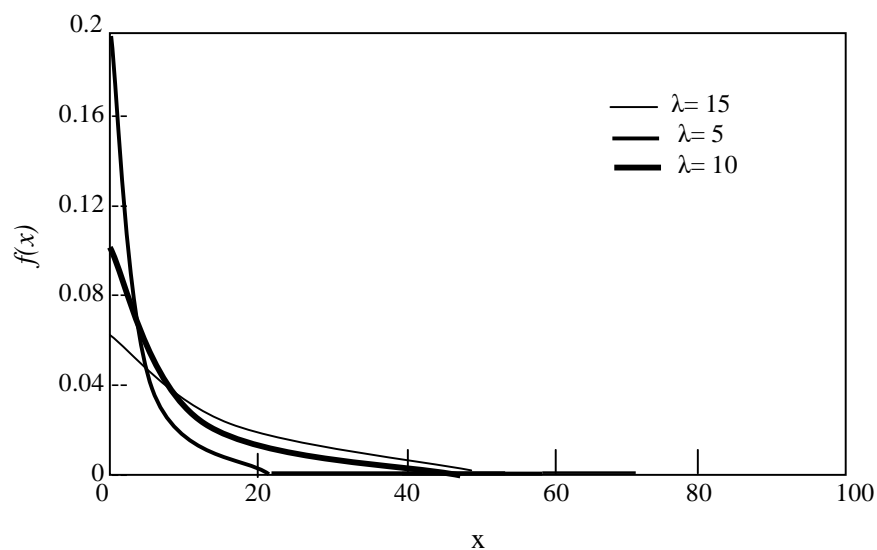
Si x_1, x_2, \dots, x_n son variables aleatorias independientes con media μ_i y varianza σ_i^2 , y si $y = x_1 + x_2 + \cdots + x_n$, entonces la distribución de:

$$\frac{y - \sum_{i=1}^n \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}}$$

Tiende a la distribución $N(0,1)$ cuando n tiende a infinito.

El teorema de límite central implica que la suma de n variables aleatorias con distribuciones independientes es aproximadamente normal, sin importar cuáles sean las distribuciones de las variables individuales. La aproximación se hace mejor cuando n se incrementa. En muchos casos la aproximación será buena para n pequeña—por ejemplo, $n < 10$ —, mientras que en otros casos puede requerirse que una n muy grande —por ejemplo, $n > 100$ — para que la aproximación sea satisfactoria. En general, si las x_i tienen la misma distribución, y la distribución de cada x_i no se aparta radicalmente de la distribución normal, entonces el teorema del límite central funciona bastante bien para $n \geq 3$ o 4. Estas condiciones se cumplen frecuentemente en los problemas de control de calidad.

Figura 60. Distribuciones exponenciales para valores seleccionados de λ



➤ Distribución exponencial

La distribución de probabilidad de la variable aleatoria exponencial se define como sigue.

Definición

La **distribución exponencial** es:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad x \geq 0 \quad (2-27)$$

Donde $\lambda > 0$ es una constante. La **media** y la **varianza** de la distribución exponencial son:

$$\mu = \frac{1}{\lambda} \quad (2-28)$$

Y

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2-29)$$

Respectivamente.

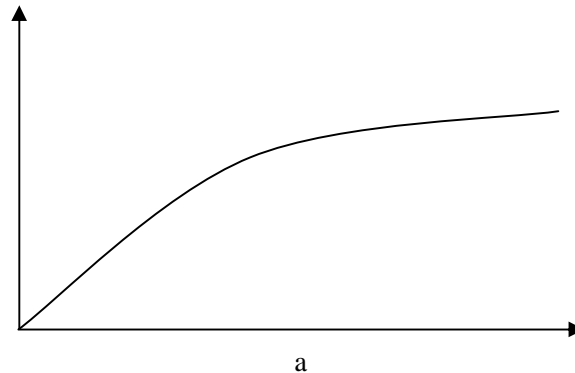
En la figura 60 se muestran varias distribuciones exponenciales.

La distribución exponencial acumulada es:

$$\begin{aligned} F(a) &= P\{x \leq a\} \\ &= \int_0^a \lambda e^{-\lambda t} dt \\ &= 1 - e^{-\lambda a} \quad a \geq 0 \end{aligned} \quad (2-30)$$

En la figura 61 se ilustra la función de distribución acumulada exponencial.

Figura 61. La función de distribución exponencial acumulada



La distribución exponencial se usa ampliamente en el campo de la **ingeniería de confiabilidad** como modelo del tiempo hasta la falla de un componente o sistema. En estas aplicaciones, al parámetro λ se le llama el **índice de falla** del sistema, y la media $1/\lambda$ de la distribución se le llama **tiempo medio hasta una falla**. Por ejemplo, suponer que un sensor electrónico de un sistema de control de la transmisión de un camión de acarreo 793C-CAT tiene una vida útil descrita por una distribución exponencial con índice de falla $10^{-4}/\text{h}$, es decir, $\lambda=10^{-4}$. El tiempo medio para una falla de este componente es $1/\lambda=10^4=10000$ h. Si quisiera determinarse la probabilidad de que este componente falle antes de su vida esperada, se evaluaría:

$$P\left\{x \leq \frac{1}{\lambda}\right\} = \int_0^{1/\lambda} \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-1} = 0.63212$$

Este resultado es válido independientemente del valor de λ ; es decir, la probabilidad de que un valor de la variable aleatoria exponencial sea menor que su media es 0.63212. Esto ocurre, desde luego, porque la distribución no es simétrica.

Existe una importante relación entre la distribución exponencial y la de Poisson. Si la distribución de Poisson se considera como un modelo del número de ocurrencias de algún evento en el intervalo $(0, t]$, entonces por la ecuación 2-15 se tiene:

$$p(x) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^x}{x!}$$

Ahora bien, $x = 0$ implica que no hay ocurrencias del evento en $(0, t]$, y $P\{x=0\} = p(0) = e^{-\lambda t}$. puede considerarse que $p(0)$ es la probabilidad de que el intervalo hasta la primera ocurrencia sea mayor que t , o,

$$P\{y > t\} = p(0) = e^{-\lambda t}$$

Donde y es la variable aleatoria que denota el intervalo hasta la primera ocurrencia. Puesto que:

$$F(t) = P\{y \leq t\} = 1 - e^{-\lambda t}$$

Y utilizando el hecho de que $f(y) = dF(y)/dy$, se tiene:

$$f(y) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2-31)$$

Como la distribución del intervalo hasta la primera ocurrencia. La ecuación (2-31) se identifica como una distribución exponencial como parámetro λ . Por lo tanto, se observa que si el número de ocurrencias de un evento sigue una distribución de Poisson con parámetro λ , entonces la distribución del intervalo entre las ocurrencias es exponencial con parámetro λ .

➤ **Distribución gamma**

La distribución de probabilidad de la variable aleatoria gamma se define como sigue.

Definición

La **distribución gamma** es:

$$f(x) = \frac{\lambda}{\Gamma(r)} (\lambda x)^{r-1} e^{-\lambda x} \quad x \geq 0 \quad (2-32)$$

Con **parámetro de forma** $r > 0$ y **parámetro de escala** $\lambda > 0$. La **media** y la **varianza** de la distribución gamma son:

$$\mu = \frac{r}{\lambda} \quad (2-33)$$

Y

$$\sigma^2 = \frac{r}{\lambda^2} \quad (2-34)$$

Respectivamente.

En la figura 62 se muestran varias distribuciones gamma. Obsérvese que si $r = 1$, la distribución gamma se reduce a la distribución exponencial con parámetro λ . La distribución gamma puede adoptar muchas formas diferentes, dependiendo de los valores elegidos para r y λ . Esto lo hace útil como modelo para una amplia variedad de variables aleatorias continuas. Si el parámetro r es un entero,

entonces la distribución gamma es la suma de r distribuciones exponenciales independientes e idénticas, todas con parámetro λ . Es decir, si x_1, x_2, \dots, x_n son exponenciales con parámetro λ e independientes, entonces,

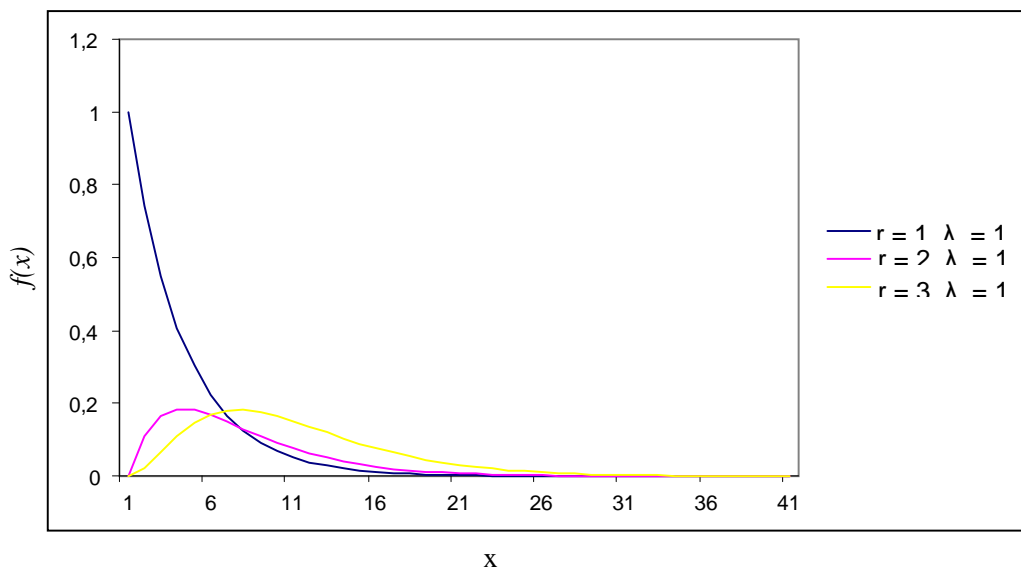
$$y = x_1 + x_2 + \dots + x_r$$

Tiene la distribución gamma con parámetros r y λ . Este resultado tiene varias aplicaciones importantes.

Ejemplo Ilustrativo

Considérese el sistema ilustrado en la figura 63. Se le llama **sistema redundante en estado de espera**, porque mientras el componente 1 está encendido, el componente 2 está apagado, y cuando el componente 1 falla.

Figura 62. Distribuciones gamma para valores seleccionados de r y $\lambda=1$



El interruptor enciende automáticamente el componente 2. Si cada componente tiene la vida útil descrita por una distribución exponencial con $\lambda = 10^{-4}/\text{h}$, por ejemplo, entonces la vida útil del sistema sigue la distribución gamma con parámetros $r = 2$ y $\lambda = 10^{-4}$. Por tanto, el tiempo medio para una falla es $\mu = r/\lambda = 2/10^{-4} = 2 \times 10^4$ h.

La distribución gamma acumulada es:

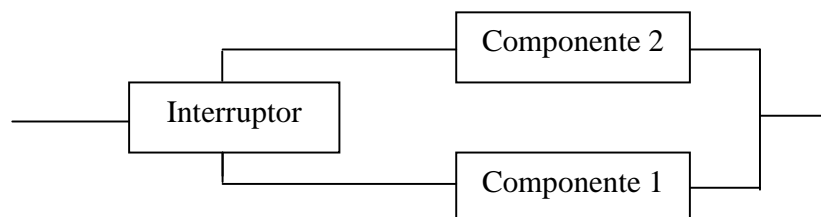
$$F(a) = 1 - \int_a^{\infty} \frac{\lambda}{\Gamma(r)} (\lambda t)^{r-1} e^{-\lambda t} dt \quad (2-35)$$

Si r es un entero, entonces la ecuación 2-35 queda como:

$$F(a) = 1 - \sum_{k=0}^{r-1} e^{-\lambda a} \frac{(\lambda a)^k}{k!} \quad (2-36)$$

Por consiguiente, la distribución gamma acumulada puede evaluarse como la suma de r términos de Poisson con parámetro λa . Este resultado no es sorprendente, si la distribución de Poisson se considera como un modelo del número de ocurrencias de un evento en un intervalo fijo, y la distribución gamma como el modelo de la porción del intervalo requerido para obtener un número específico de ocurrencias. Este tipo de sistema tiene mucha aplicación en el mantenimiento, cuando se utiliza el concepto de equipos o sistemas en stand by.

Figura 63. Sistema redundante en estado de espera



➤ **Distribución de Weibull**

La distribución de Weibull se define como se sigue.

Definición

La **distribución de Weibull** es:

$$f(x) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{x}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta\right] \quad x \geq 0 \quad (2-37)$$

Donde $\theta > 0$ es el **parámetro de escala**, y $\beta > 0$ es el **parámetro de forma**. La **media** y la **varianza** de la distribución de Weibull son:

$$\mu = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2-38)$$

Y

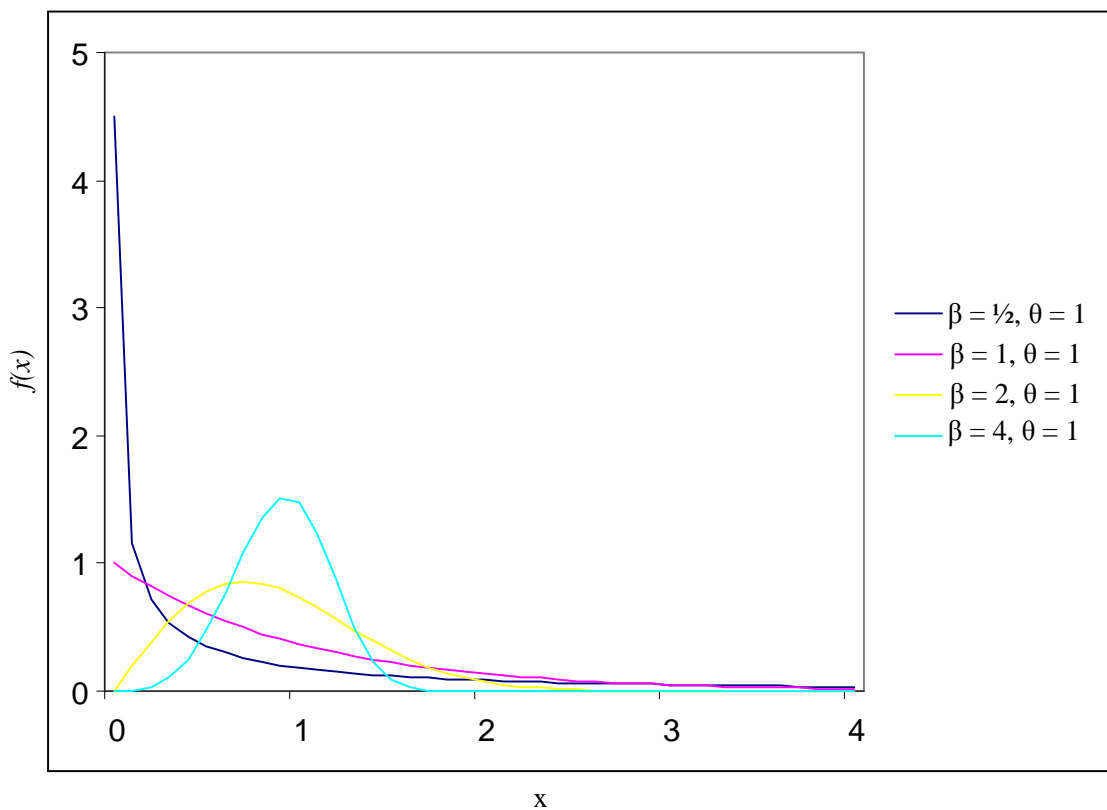
$$\sigma^2 = \theta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2 \right] \quad (2-39)$$

Respectivamente.

La distribución de Weibull es muy flexible, y mediante la selección apropiada de los parámetros θ y β , la distribución puede adoptar una amplia variedad de formas.

En la figura 64 se muestran varias distribuciones de Weibull para $\theta = 1$ y $\beta = \frac{1}{2}, 1, 2,$ y 4 . Obsérvese que cuando $\beta = 1$, la

Figura 64. Distribuciones de weibull para valores seleccionados del parámetro de forma β y el parámetro de escala $\theta = 1$



La distribución de Weibull se reduce a la distribución exponencial con media $1/\theta$.
 La distribución de Weibull acumulada es:

$$F(a) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{a}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (2-40)$$

La distribución de Weibull se ha usado ampliamente en la ingeniería de confiabilidad como modelo del tiempo hasta que ocurre una falla en componentes y sistemas eléctricos y mecánicos. Ejemplos de situaciones en las que se ha usado la distribución de Weibull incluyen aparatos electrónicos tales como elementos de memoria, componentes mecánicos tales como rodamientos, y elementos estructurales.

Ejemplo ilustrativo I

El tiempo hasta que ocurre una falla en un ECM (modulo de control electrónico) usado en los equipos Caterpillar para el sector de las minería se modela satisfactoriamente con una distribución de Weibull con $\beta = \frac{1}{2}$ y $\theta = 1000$. El tiempo medio hasta una falla es:

$$\begin{aligned}\mu &= \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\ &= 1000 \Gamma\left(1 + \frac{1}{1/2}\right) \\ &= 1000 \Gamma(3) \\ &= 2000h\end{aligned}$$

La fracción de los ECM que se esperan que sobrevivan a $a = 4000h$ es:

$$\begin{aligned}1 - F(a) &= \exp\left[-\left(\frac{a}{\theta}\right)^\beta\right] \\ 1 - F(4000) &= \exp\left[-\left(\frac{4000}{1000}\right)^{1/2}\right] \\ &= e^{-2} \\ &= 0.1353\end{aligned}$$

Es decir, todos excepto 13.53% de los ECM fallarán en 4000 h.

2.8.9. Algunas Aproximaciones Útiles

En ciertos problemas de control de calidad, a veces es útil aproximar una distribución de probabilidad con otra. Esto es particularmente útil en situaciones en las que la manipulación analítica de la distribución original es difícil. Se presentan tres de estas aproximaciones: 1) la aproximación binomial de la distribución hipergeométrica, 2) la aproximación de Poisson de la distribución binomial, y 3) la aproximación normal de la distribución binomial.

➤ Aproximación binomial de la distribución hipergeométrica

Considérese la distribución hipergeométrica de la ecuación 2-8. Si el cociente n/N (llamado con frecuencia la fracción de muestreo) es pequeño –digamos $n/N \leq 0.1$ –, entonces la distribución binomial con parámetros $p = D/N$ y n es una buena aproximación de la distribución hipergeométrica. La aproximación es mejor para los valores pequeños de n/N .

Esta aproximación es útil en el diseño de planes de muestreo de aceptación. Recuérdese que la distribución hipergeométrica es el modelo apropiado para el número de equipos disconformes obtenidos en una muestra aleatoria de n equipos de un lote de tamaño finito N . por tanto, si el tamaño de la muestra n es pequeño en comparación con el tamaño del lote N , puede emplearse la aproximación binomial, con lo cual por lo general se simplifican considerablemente los cálculos. Como un ejemplo, suponer que un lote de producción de 200 unidades contiene 5 unidades que no cumplen con las especificaciones. La probabilidad de que una muestra aleatoria de 10 unidades no contenga ningún artículo disconforme es, por la ecuación 2-8.

$$p(0) = \frac{\binom{5}{0} \binom{195}{10}}{\binom{200}{10}} = 0.7717$$

Obsérvese que como $n/N = 10/200 = 0.5$ es relativamente pequeño, podría usarse la aproximación con $p = D/N = 5/200 = 0.025$ y $n = 10$ para calcular,

$$p(0) = \binom{5}{0} (0.025)^0 (0.975)^{10} = 0.7763$$

➤ **Aproximación de Poisson de la distribución binomial**

Anteriormente se señaló que la distribución de Poisson podía obtenerse como una forma límite de la distribución binomial para el caso en que p tiende a cero y n tiende a infinito con $\lambda = np$ constante. Esto implica que, para p pequeña y n grande, la distribución de Poisson $\lambda = np$ puede usarse para aproximar la distribución binomial. La aproximación generalmente es buena para n grande y si $p < 0.1$. Entre más grande sea el valor de n y menor sea el valor de p , mejor será la aproximación.

➤ **Aproximación normal de la distribución binomial**

Se definió la distribución binomial como la suma de una secuencia de n ensayos de Bernoulli, cada uno con probabilidad de éxito p . Si el número de ensayos n es grande, entonces puede usarse el teorema del límite central para justificar la distribución normal con media np y varianza $np(1-p)$ como una aproximación de la distribución binomial. Es decir,

$$P(x = a) = \binom{n}{a} p^a (1-p)^{n-a}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi np(1-p)}} e^{-\frac{1}{2}[(a-np)^2 / np(1-p)]}$$

Puesto que la distribución binomial es discreta y la distribución normal es continua, es una práctica común usar correcciones de continuidad en la aproximación, de tal modo que:

$$P\{x = a\} = \Phi\left(\frac{a + \frac{1}{2} - np}{\sqrt{np(1-p)}}\right) - \Phi\left(\frac{a - \frac{1}{2} - np}{\sqrt{np(1-p)}}\right)$$

Donde Φ denota la función de distribución normal estándar acumulada. Otros tipos de enunciados de probabilidad se evalúan la manera similar, tal como:

$$P\{a \leq x \leq b\} = \Phi\left(\frac{b + \frac{1}{2} - np}{\sqrt{np(1-p)}}\right) - \Phi\left(\frac{a - \frac{1}{2} - np}{\sqrt{np(1-p)}}\right)$$

Se sabe que la aproximación normal de la distribución binomial es satisfactoria para p de aproximadamente $\frac{1}{2}$ y $n > 10$. Para otros valores de p , se requieren valores mayores de n . en general, la aproximación no es adecuada para $p < 1/(n+1)$ o $p > n/(n+1)$, o para valores de la variable aleatoria fuera de un intervalo de seis desviaciones estándar de ancho cuyo centro está aproximadamente en la media [por ejemplo, el intervalo $np \pm 3\sqrt{np(1-p)}$].

También puede usarse la aproximación normal para la variable aleatoria $\hat{p} = x/n$ - es decir, la variable aleatoria \hat{p} tiene una distribución aproximadamente normal con media p y varianza $p(1-p)/n$, de donde,

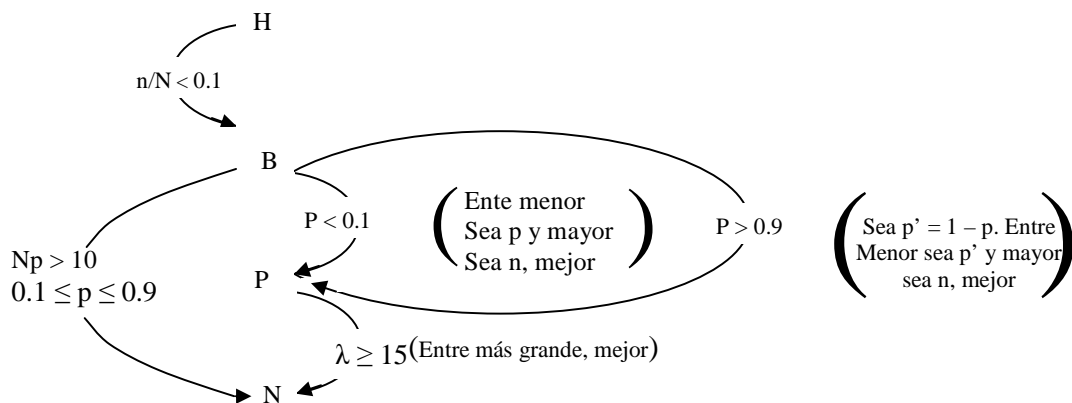
$$P\{u \leq \hat{p} \leq v\} = \Phi\left(\frac{v-p}{\sqrt{p(1-p)/n}}\right) - \Phi\left(\frac{u-p}{\sqrt{p(1-p)/n}}\right)$$

Puesto que la distribución normal servirá como aproximación de la distribución binomial, y dada la estrecha relación entre las distribuciones binomial y de Poisson, parece lógico que la distribución normal sirva como aproximación de la Poisson. Este es de hecho el caso, y si la medida λ de la distribución de Poisson excede 15 (o algo así), entonces la distribución normal con $\mu=\lambda$ y $\sigma^2 = \lambda$ es una aproximación satisfactoria.

➤ **Comentarios sobre las aproximaciones**

En la figura 65 se presenta un resumen de las aproximaciones discutidas arriba. En esta figura, H, B, P y N representan las distribuciones hipergeométrica, binomial, de Poisson y normal, de buenos paquetes de software de estadísticas y de calculadoras manuales ha hecho que el uso de estas aproximaciones sea en gran medida innecesaria, pero hay situaciones en las que son útiles, particularmente en la aplicación de las populares cartas de control con limite tres sigma.

Figura 65. Aproximaciones de distribuciones de probabilidad



2.9. MAIC (Medir, Analizar, Mejorar, Controlar)

La abreviatura “MAIC” proviene de la terminología inglesa Measure, analyze, improve, check, que es la forma de definir la metodología Seis Sigma y en castellano equivaldría a Medir, Analizar, Mejorar, Comprobar.

Los proyectos de mejora Seis Sigma siguen de forma disciplinada dichas cuatro etapas:

➤ Fase de Medición

Consiste en seleccionar apropiadamente las variables que afectan a nuestros clientes externos o internos que queremos mejorar. Debemos buscar un método para cuantificarlas y medirlas de forma precisa. Durante esta fase debemos también definir de forma inequívoca el nivel de aceptación, las variables seleccionadas y cuales son sus niveles aceptables de desempeño. La fase terminará una vez realizados las primeras mediciones.

En la fase de medición debemos plantearnos cuestiones tales como:

¿Qué son los procesos de los que soy responsable y quien es mi cliente?

¿Cuáles son los miembros relacionados con el proceso? ¿Cuál es su grado de trabajo en equipo? ¿Cuáles de los procesos que debo responsabilizarme tienen una necesidad de mejora más urgente? ¿En qué evidencias se sustenta dicha conclusión? ¿Cuál es el diagrama de flujo de los procesos seleccionados? ¿Disponemos de un sistema para medir sus variables críticas? ¿Disponemos de forma fiable de las especificaciones de nuestro cliente? ¿En qué Datos nos basamos para afirmarlo? ¿Podemos calcular la capacidad de nuestro proceso? ¿Conocemos las causas de variabilidad de nuestro proceso? ¿Estamos en condiciones de tomar los primeros datos?

➤ **Fase de Análisis**

Con los datos obtenidos en la fase de medición procederemos al cálculo de la capacidad de nuestro proceso para ser consciente de la situación en la que nos encontramos de forma objetiva. Debemos también llegar a conclusiones sobre cuales son las causas y variables de entrada responsable de dicha situación. También en la segunda fase proponemos algunas cuestiones que pueden ayudar a su desarrollo:

¿Qué variable de entrada de mi proceso afectan a la medida o a la desviación tipo de las variables críticas de salida de mi proceso? ¿Cuáles son los datos que así lo confirman? ¿Existen interacciones entre las variables?

➤ **Fase de Mejora**

Consiste en determinar como afectan las causas definidas en la fase anterior en la mejora de la capacidad del proceso. La eliminación de las variables que más influyan en la dispersión de la característica del proceso a mejorar será una de las tareas fundamentales de esta fase. Es muy probable que la fase de mejora deba repetirse de forma interactiva hasta llegar a la conclusión final.

En la fase de mejorar debemos interrogarnos por los valores de las variables de entrada que optimizaran el valor de las dimensiones críticas del proceso. Debemos también establecer los márgenes que pueden variar sin afectar la capacidad de proceso.

➤ **Fase control**

Una vez realizadas las mejoras deseadas, debemos establecer un sistema para asegurar su consistencia. No debemos olvidarnos de esta fase pues es el enfoque científico que sugiere la filosofía Seis Sigma así lo requiere.

La fase de control no es simple cálculo de la mejora del proceso a corta plazo. Deberemos, por ejemplo, plantearnos cuestiones tales como:

¿El proyecto ha sido documentado correctamente de forma que permita comparar de forma objetiva la situación de partida con la actual? Según nuestra experiencia muchos proyectos quedan pues al mostrar mejoras a corta plazo, se olvida la parte final. Posteriormente cuando una nueva fuente de variabilidad no prevista altera el resultado no es posible contrarrestar la eficacia que en su día se le supuso. Preguntemos, por tanto; ¿Qué mejoras ha resultado el proyecto en temas tales como disminución de defectos o inventarios, aumento de la capacidad de producción, ahorro en inversiones reducción de pérdidas de material, etc.?

En las figuras 66 y 67 representamos de forma gráfica las cuatro fases de los proyectos de mejora Seis Sigma.

Figura 66. MAIC

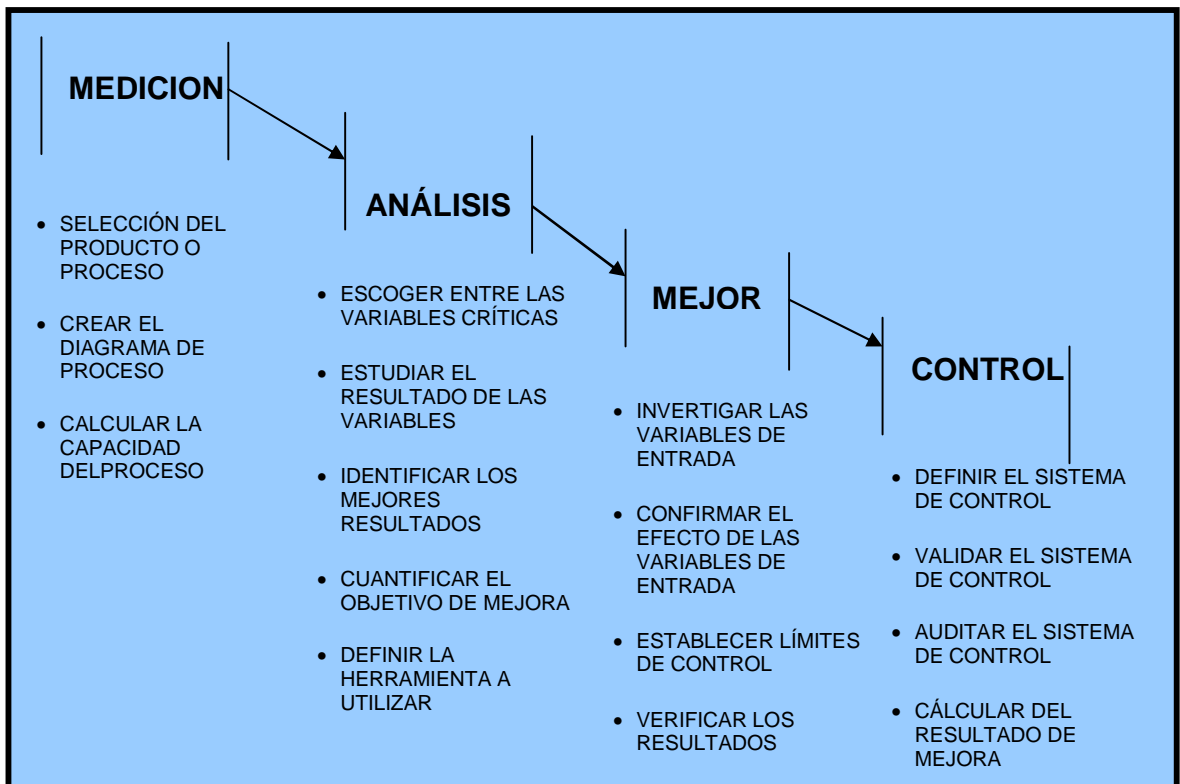
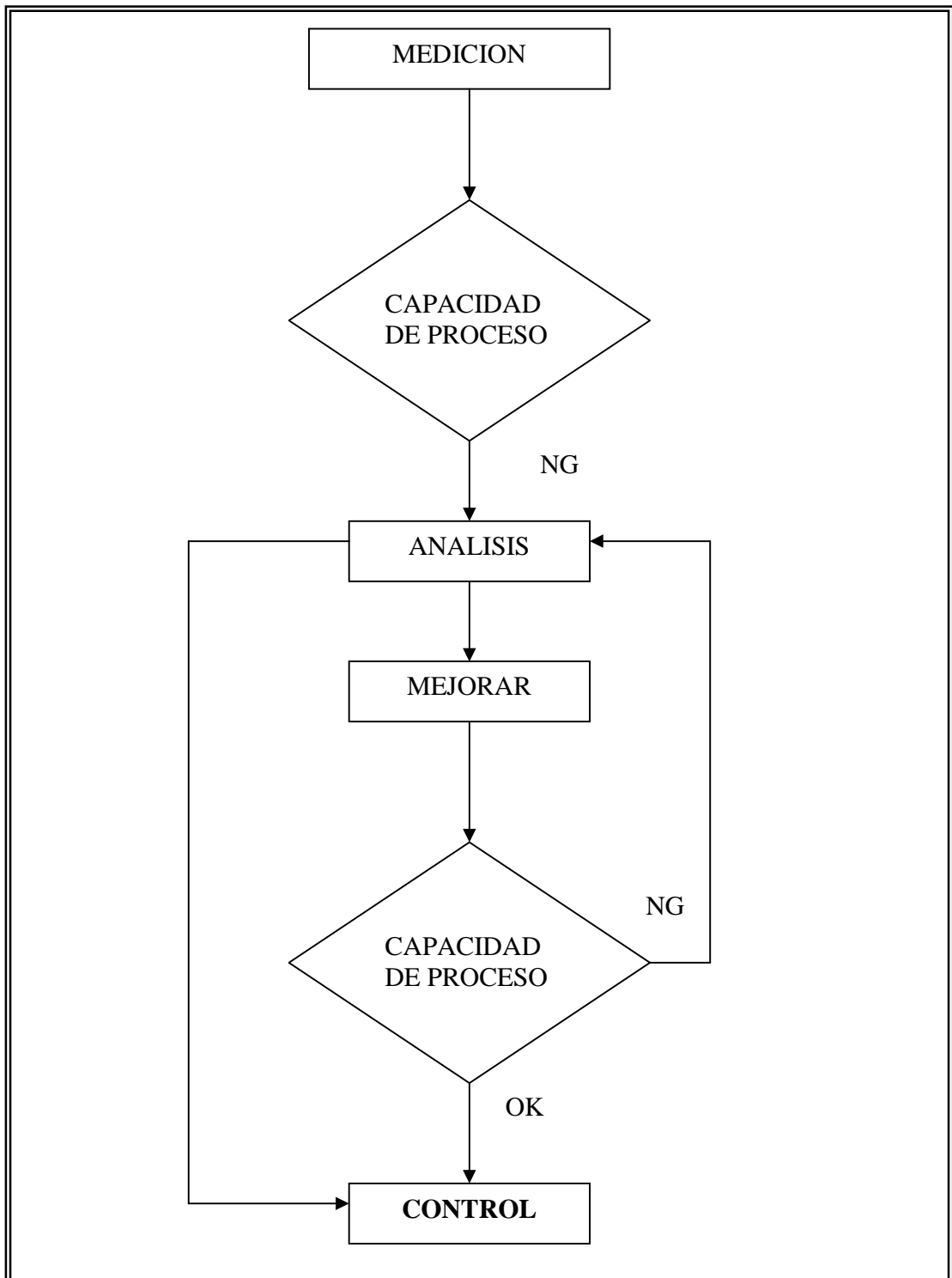


Figura 67. Capacidad de Proceso



2.10. CONTROL DE LOS RESULTADOS

Seis Sigma precisa de una metodología para la confirmación de sus resultados. Debemos por tanto definir unos indicadores que permitan visualizar la evolución del proyecto tanto de forma global como para cada proyecto, producto, proceso o servicio en particular.

Los indicadores son necesarios pues no podemos basar nuestras decisiones en la simple intuición y nos ayudará además, a ser objetivos prescindiendo de tópicos y prejuicios.

Los indicadores nos mostrarán los puntos problemáticos de nuestro negocio, ya sean clientes insatisfechos, falta de capacidad del proceso productivo producido por un cuello de botella concreto, excesivo almacenaje de productos acabado a largas colas de clientes provocadas por una mala planificación, Etc.

Los indicadores nos ayudarán a caracterizar, comprender y confirmar nuestros procesos, destacando aquellas variables que afectan a sus dimensiones críticas. Mediante el control de resultados sabremos si estamos suministrando la capacidad que nuestro cliente espera.

La mejora de los indicadores es la mayor arma de motivación del personal involucrado en el proyecto Seis Sigma y el argumento más contundente para vencer la resistencia al cambio a la que nos pudiéramos enfrentar.

Mediante indicadores podemos determinar la estabilidad de un proceso y su variabilidad, siendo esta una de las principales causas de generación de costo de no- calidad.

Un cuadro de control de indicadores nos permitirá, en definitiva, tener un punto de referencia, y será una herramienta de gran valor para fijar objetivos de mejora.

Existen un buen número de indicadores que pueden ser tomados como referencia, pero los indicadores de cada compañía si no han sido construidos directamente por el personal de ella, deben ser analizados desde la óptica de la empresa, sus objetivos y sus condiciones reales, como decíamos antes, para efectos de confiabilidad, las cifras de indicadores de otros países pueden ser los ideales y son un buen principio en caso tal que no se haya iniciado el seguimiento propio o como en el caso colombiano, se carezca de dichas medidas en forma pública. Dentro de los llamados a evaluar la confiabilidad tenemos:

- **MTBS** son las siglas de "Mean Time Between Failure" o "Tiempo Medio de Vida entre Fallos". Normalmente expresado en horas. Para un determinado dispositivo podemos decir que existe un MTBS teórico o calculado y un MTBS práctico o medido.

Los MTBS nos dan una medida acertada de la calidad del producto que diseñamos, fabricamos, vendemos, compramos o que tenemos a cargo para el mantenimiento.

Donde ***t_i*** es el tiempo de observación de ***n*** equipos y ***K_f*** el número total de fallos de estos equipos durante dicho período de evaluación.

$$MTBS = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{K_f}$$

- **MUT** de "Mean UpTime" o "Tiempo Medio que el Equipo está Disponible", que no tiene otra explicación que su mismo nombre y que está dado por la siguiente ecuación:

Teniendo a ***t_d*** como el tiempo que el equipo ***i*** se encuentra disponible en el intervalo de observación y ***K_d*** el total de tiempos en que el equipo ***i*** ha estado disponible, siendo ***n*** el total de equipos observados.

$$MUT = \frac{\sum_{i=1}^n (t_d)_i}{K_d}$$

- **MDT** del Ingles “Mean DownTime” o “Tiempo medio que el Equipo No esta disponible”.

En donde ***t_u*** como el tiempo que el equipo ***i*** se encuentra como no disponible en el intervalo de observación y ***K_u*** el total de tiempos en que el equipo ***i*** ha estado no disponible, siendo ***n*** el total de equipos observados.

$$MDT = \frac{\sum_{i=1}^n (t_u)_i}{K_u}$$

- **MTTR** de “Mean repair time” o Tiempo Medio de Reparación”, asociado más a la mantenibilidad pero igualmente medida importante para la confiabilidad, y nos muestra el período en el cual podemos reparar un equipo hasta llevarlo a su estado de operación.

Si disponemos los tiempos medios de reparación de ***n*** equipos podemos obtener la estimación del tiempo medio de reparación mediante la ecuación, donde ***K_r*** es el número total de reparaciones durante el tiempo considerado y ***t_r*** el tiempo de reparación correspondiente al equipo ***i***.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n (t_r)_i}{K_n}$$

Es así como encontramos estos y otros tantos indicadores que nos han de servir para monitorear nuestra labor, aquí un listado de algunos de ellos:

| | |
|---|--|
| Costo Anual del Mantenimiento | Tasa de Reparación |
| Costo del Mantenimiento / Valor de reposición de los activos, planta y equipo | Horas del personal de Mantenimiento como % del Total de empleados |
| Mantenimiento Planeado | No Conformidades de Mantenimientos |
| Mantenimiento Planeado y Programado como % de horas las horas trabajadas | Gastos para Educación(Entrenamiento) del Trabajador (% de nómina) |
| Tiempo Muerto NO planeado | Sobrecarga de Servicios de Mantenimiento |
| Mantenimiento Correctivo (Reactivo) | Alivio de Servicios de Mantenimiento |
| Control de Fallos (Emergencias + No Emergencias) | Progreso en los Esfuerzos de Reducción de Costos |
| Horas Extras de Mantenimiento | Costo relativo con personal propio |
| Reprocesos Mensuales en Mantenimiento | Costo relativo con material |
| Rotación de Inventarios | Costo de Mano de Obra Externa |
| Entrenamiento | Costo de Capacitación |
| Seguridad | Inmovilización en Repuestos |
| Gerencia de Instalaciones (Housekeeping) | Costo de Mantenimiento por Valor de Venta |
| Estrategias de Mantenimiento: Mantenimiento Preventivo | Horas Totales en MP / Total de Horas disponibles para el Mantenimiento |
| Costo Global | Trabajo en Mantenimiento Correctivo |
| Mantenimiento Predictivo | Otras Actividades del Personal de Mantenimiento |
| Emergencias (Correctivos) | Capacitación del Personal de Mantenimiento |
| Correctivos (NO Emergencias) | Horas no Calculadas del Personal de Mantenimiento |
| Disponibilidad de Planta | Estructura - Personal de Control |
| Contratistas | Estructura - Personal de Supervisión |
| Tiempo Medio Para la Falla | Estructura - Envejecimiento de Personal |
| Disponibilidad del Equipo | Clima Social - Movimiento de Personal ("Turn-Over") |
| Tiempo Medio Para Intervenciones Preventivas | Efectivo Real o Efectivo Promedio Diario |
| Tasa de Falla Observada | Tasa de Frecuencia de Accidentes |
| Tasa de Gravedad de Accidentes | |

Los indicadores deben hacer referencias a temas relacionados con el negocio siendo los más representativos los relacionados con costos, agenda o prestaciones. Veamos cuales podrían ser algunos de ellos en relación a estas tres categorías y cuya mejora deba ser el enunciados de los proyectos de los black belt y green belt que propiciarán la mejora de los indicadores generales seleccionados por el Champion.

➤ **Indicadores relacionados con el costo**

- Costos operacionales, como pueden ser el personal empleado, la energía consumida, las amortizaciones de equipos, el alquiler de edificios. etc.
- Costos de materia prima, de despilfarro y de reciclaje de materiales. etc.
- Costos de comercialización, transportes, publicidad, asistencia a convenciones, promoción, etc.
- Beneficio por unidad de negocios o globales, desviaciones respecto a presupuesto, margen de beneficios por unidad producida, etc.
- Costos de desarrollo del producto tales como los de personal altamente calificad, los de homologación, los de análisis de la competencia, etc.

2.11. GERENCIA DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento requiere un enfoque global que lo integre en el contexto empresarial con la importancia que se merece. Su rol destacado en la necesaria orientación a los negocios y resultados de la empresa es garantizado por su aporte a la competitividad a través de asegurar la confiabilidad de los activos de la organización. La Optimización Integral del Mantenimiento se presenta con sus aspectos de Estrategias, Recursos de los Humanos, Recursos Materiales y Sistemas y Procedimientos, desarrollando cada uno de ellos en sus aspectos conceptuales y de implementación.

La idea del mantenimiento está cambiando. Los cambios son debidos a un aumento de mecanización, mayor complejidad de la maquinaria, nuevas técnicas de mantenimiento y un nuevo enfoque de la organización y de las responsabilidades del mismo.

El mantenimiento está reaccionando ante nuevas expectativas. Estas incluyen una mayor importancia a los aspectos de seguridad y del medioambiente, un conocimiento creciente de la conexión existente entre el mantenimiento y la calidad del producto, y un aumento de la presión ejercida para conseguir una alta disponibilidad de la maquinaria al mismo tiempo que se optimiza.

Frente a esta avalancha de cambios, el personal que dirige el mantenimiento está buscando un nuevo camino. Quiere evitar equivocarse cuando se toma alguna acción de mejora. Tratar de encontrar un marco de trabajo estratégico que sintetice los nuevos avances en un modelo coherente, de forma que puedan evaluarlos racionalmente y aplicar aquellos que sean de mayor valor para ellos y sus compañías.

Desde mediados de los años setenta, el proceso de cambio en las empresas ha tomado incluso velocidades más altas. Los cambios pueden clasificarse así:

- **Nuevas expectativas.** El crecimiento continuo de la mecanización significa que los períodos improductivos tienen un efecto más importante en la producción, costo total y servicio al cliente. Esto se hace más claro con el movimiento mundial hacia los sistemas de producción justo a tiempo, en el que los reducidos niveles de inventario en curso hacen que pequeñas averías puedan causar el paro de toda una planta. Esta consideración está creando fuertes demandas en la función del mantenimiento. Una automatización más extensa significa que hay una relación más estrecha entre la condición de la maquinaria y la calidad del producto. Al mismo tiempo, se están elevando continuamente los estándares de calidad. Esto crea mayores demandas en la función del mantenimiento. Otra característica en el aumento de la mecanización es que cada vez son más serias las consecuencias de las fallas de una instalación para la seguridad y/o el medio ambiente.

- **Nueva Investigación.** Mucho más allá de las mejores expectativas, la nueva investigación está cambiando las creencias básicas acerca del mantenimiento. En particular, se hace aparente ahora que hay una menor conexión entre el tiempo que lleva un equipo funcionando y sus posibilidades de falla.

2.11.1. Mantenimiento

El mantenimiento es aplicable a todo sistema o empresa que desee aumentar la confiabilidad o la vida útil de sus activos, uno de los aspectos más importantes del mantenimiento de los equipos, maquinarias e instalaciones, consiste en aplicar un adecuado plan de mantenimiento que aumente la vida útil de éstos, reduciendo la necesidad de los repuestos y minimizando el costo anual del material usado; como se sabe muchas de las maquinarias utilizadas en nuestro país son importadas del extranjero al igual que muchos materiales y algunas piezas de repuestos.

El mantenimiento es un proceso donde se aplica un conjunto de acciones y operaciones orientadas a la conservación de un bien material y que nace desde el momento mismo que se concibe el proyecto para luego prolongar su vida útil. Para llevar a cabo ese mantenimiento, este tiene que hacerse a través de Programas que correspondan al establecimiento de frecuencias y la fijación de fechas para realizar cualquier actividad.

2.11.2. Mantenimiento Correctivo

Consiste en permitir que un equipo funcione hasta el punto en que no pueda desempeñar normalmente su función. Se somete a reparación hasta corregir el defecto y se desatiende hasta que vuelva a tener una falla y así sucesivamente (se daña/se cambia).

“Este tipo de mantenimiento es el mas conocido por los encargados, jefes y ingeniero de mantenimiento. Por lo general obliga a un rigurosos conocimiento del

equipo y de las partes susceptibles a fallas y a un diagnóstico acertado y rápido de las causas que las originan”².

2.11.3. Mantenimiento Preventivo

“Es el mantenimiento que se ejecuta a los equipos de una planta en forma planificada y programada anticipadamente, con base en inspecciones periódicas debidamente establecidas según la naturaleza de cada máquina y encaminadas a descubrir posibles defectos que puedan ocasionar paradas imprevistas a los equipos o daños mayores que afecten la vida útil de las máquinas”³.

2.11.4. Mantenimiento Predictivo

Con el apoyo de ciertas herramientas (termografía, termometría, vibraciones, etc.) se ejerce un monitoreo de las condiciones operativas de los equipos en funcionamiento, para determinar, la condición real de operación (Se mide/se analiza/se predice). “Es aquel que utiliza datos extrapolados o tendencias para determinar la vida de servicio sin problema de una máquina”⁴.

2.11.5. Gestión de Mantenimiento

Se denomina gestión al conjunto de actividades organizadas mediante las cuales se busca el logro de objetivos en una empresa. La gestión implica cierto grado de formalidad, cierto nivel de administración, la existencia de un ciclo que incluya revisiones y cambios, cierto nivel de compromiso con objetivos, involucrar equipos de trabajo o y un compromiso gerencial.

² GONZALEZ, Carlos. Principios de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander, posgrado en gerencia de mantenimiento 2004.

³ BOTERO, Ernesto. Mantenimiento Preventivo. Universidad Industrial de Santander, posgrado en gerencia de mantenimiento 2004.

⁴ MARTINEZ, William. Mantenimiento Predictivo, Termografía. Universidad Industrial de Santander, posgrado en gerencia de mantenimiento 2005.

Las empresas que hacen gestión de mantenimiento responden a una conciencia de mejoramiento continuo y al convencimiento de que existen importantes potenciales de ahorro y posicionamiento en el mercado. Al mismo tiempo están contribuyendo a los programas energéticos del país y al desarrollo sostenible.

Desde el punto de vista práctico se tienen un conjunto de acciones y de enfoques que corresponden a elementos como los que enunciamos a continuación:

- Evitar desperdicios en el consumo de energía.
- Tener conciencia de la capacidad de los equipos, dimensionar correctamente las instalaciones y escoger la capacidad adecuada para cada uno de los equipos.
- Procurar un nivel cada vez mayor del control de los procesos.
- Aislar y reparar fugas en los equipos.
- Hacer revisiones a las instalaciones periódicamente como rutina interna y en casos necesarios por expertos en el concepto de uso racional de energía.
- Establecer programas de entrenamiento para el persona que tiene responsabilidades relacionadas con equipos de consumo energético.
- Realizar actividades de registro y monitoreo de los consumos de combustible.
- Asegurar que el mantenimiento de los equipos contenga aspectos relacionados con la energía y que tengan implementos preventivos y predictivos.
- Velar porque haya trabajo de equipo, motivación y compromiso de las personas.

3. GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN EL MEJORAMIENTO DE LA DISPONIBILIDAD DE LOS EQUIPOS D11R – CAT EN LA EMPRESA DRUMMOND LTD.

3.1. IMPORTANCIA DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

Consiste en aplicar en el área de Mantenimiento la Excelencia Gerencial y Empresarial como práctica gerencial sistemática e integral que busque el mejoramiento constante de los resultados, utilizando todos los recursos disponibles al menor costo, teniendo presente que cada empresa y sus sistemas se encuentran en un nivel diferente de desarrollo y que poseen características propias que la diferencian de las demás.

En consecuencia, cada departamento o área de mantenimiento debe tener una solución propia, utilizando también todas aquellas herramientas desarrolladas en países avanzados y a disposición de los gerentes de área que trabajan bajo esta filosofía de gestión.

La integración regional y el mundo sin fronteras imponen a las empresas latinoamericanas una urgencia para alcanzar los niveles de competitividad de las empresas de clase mundial. Por ello, la gestión de mantenimiento pretende orientar a los gerentes de las empresas y a los responsables de las áreas de mantenimiento en el camino a seguir para gerenciar este sistema bajo la filosofía de la Excelencia Gerencial.

La metodología que se propone, si bien es similar a la utilizada en los países desarrollados, busca adaptar las herramientas de gestión disponibles y su aplicación a la medida de las empresas latinoamericanas teniendo en cuenta sus

necesidades y su real velocidad de asimilación. Para estos efectos, la Gestión de Mantenimiento implica disponer de un manual, de un sistema informatizado y de una acción cíclica (práctica de mejoramiento).

Los problemas de la industria están enfocados a hacerla competitiva frente al marco internacional, la cual los obliga a que los productos o servicio estén elaborados con la calidad para cubrir las especificaciones establecidas.

Mantener o reducir los costos operativos, tan sólo se logra al tomar acciones que contribuyan al uso racional y eficiente de los recursos. Por otra parte, las regulaciones existentes para garantizar la conservación del ambiente, establecen límites permisibles para el desecho de contaminantes en agua, suelo y aire. Dichos límites se pueden controlar mediante la revisión periódica y minuciosa de los consumos energéticos.

La Gestión de Mantenimiento es una parte primordial de las políticas administrativas de muchas empresas; se trata de un tema relativamente nuevo pero que aparece en casi todos los informes sobre manejo y administración de recursos de la ingeniería del mantenimiento.

Los conceptos conservación, uso racional, uso eficiente y ahorro relacionados con el mantenimiento, se abordan en el lenguaje de nuevas estrategias administrativas y metodologías de mejoramiento continuo de la calidad lo que refleja la preocupación de los administradores e inversionistas. Con este propósito se establecen lineamientos o programas que tengan un impacto en la reducción de los costos de operación, manejo del talento humano, conservación de los recursos naturales y finalmente protección del ambiente.

Los indicadores de disponibilidad, confiabilidad, y costos de operación, son muy importantes para saber que tan competitiva es una empresa y están siendo más difundidos en la industria cada día. En el presente estudio se ha encontrado grandes potenciales de mejoramiento de estos indicadores basándose en el enfoque Seis Sigma, analizando los procesos y haciendo las mejoras necesarias en cada etapa de los procesos. Por lo anterior, y con objeto de mejorar la disponibilidad y competitividad de los equipos se impulsan programas de mejoramiento de los sistemas de los equipos, innovaciones en el diseño, mejoramiento de los procedimientos, etc., y así determinar sus condiciones de operación y las oportunidades de ahorro que permitirán alcanzar tal fin.

Los problemas de la industria moderna están enfocados a:

- Adquirir competitividad en el ámbito internacional, lo cual obliga a que todos los productos, sean elaborados con la calidad exigida para cubrir las especificaciones establecidas y ser competitivos económicamente.
- Mantener o reducir los costos operativos, lo cual tan solo se logra al tomar acciones que contribuyan al uso racional y eficiente de los Recursos.

3.2. ENFOQUE DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

El diseño del programa de la gestión del Mantenimiento en la solución de los problemas que causan las fallas en los D11R-CAT, se enfoca a:

- Disminuir los Tiempos Down por Fugas Hidráulicas causadas por Fallas en Mangueras y disminuir el numero de Fallas por Contaminación del Sistema Hidráulico.

- Disminuir los Tiempos Down por Fugas de Refrigerante y Reducir el consumo de Refrigerante.
- Disminuir las Fallas Ocasionadas por Desgaste de la Baquelita del Soporte del Capot de los D11R.
- Disminuir el número de Fallas por Caída de las Bases del Sistema Supresor de Incendios.
- Disminuir el número de Fallas por Caída de las Bases de las Luces de los Cilindros de Levante de D11R.

3.2.1. Programa de Reducción de Fallas por Fugas Hidráulicas

- Cambio y Buen Enrutamiento de Mangueras en los PM, Taller y Campo.

Figura 68. Una Manguera Bien Erutadas puede durar hasta 10.000 horas

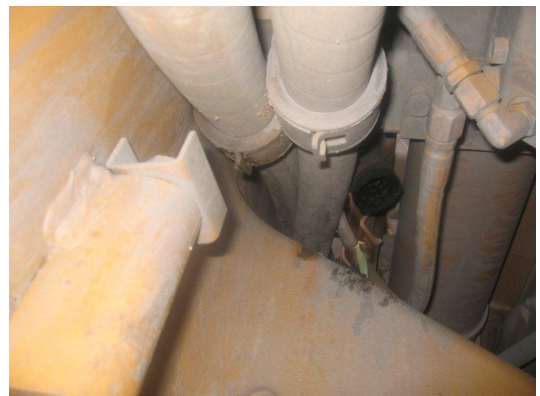
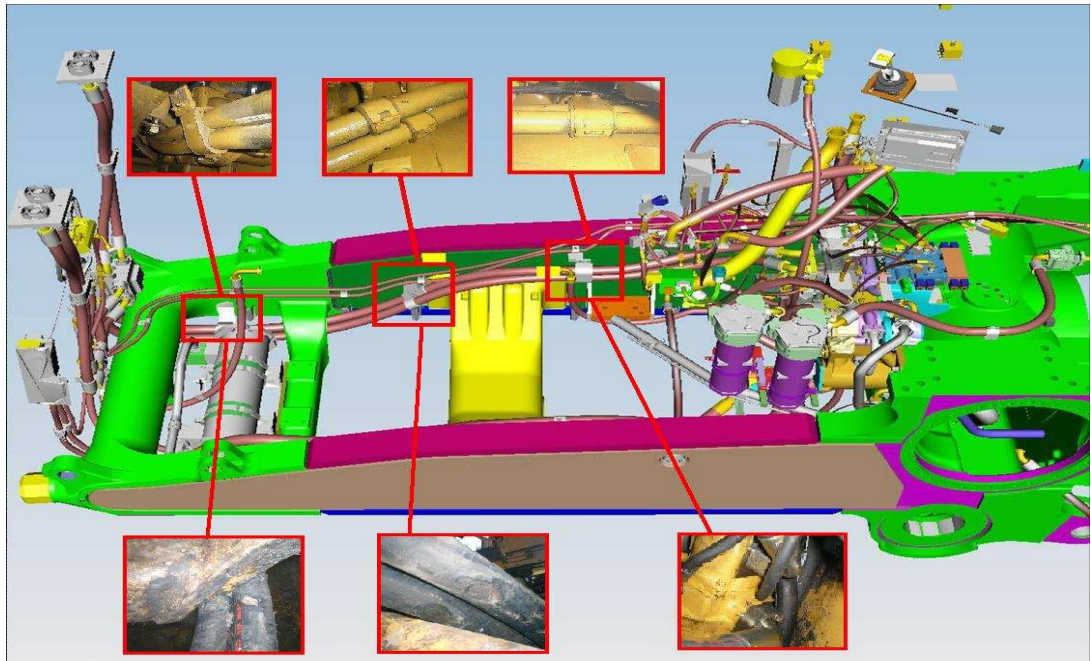


Figura 69. Esquema de enrutamiento de las mangueras para los D11R



Caterpillar en los manuales de mantenimiento ilustra con gráficos el procedimiento para realizar un correcto enrutamiento y las partes necesarias para cada tarea (ver figura 69).

Como se mencionó las fallas clásicas de mangueras se deben al rozamiento ya sea entre ellas mismas o contra partes fijas como tuberías, guardas y chasis principalmente. Para evitar lo anterior se debe asegurar que las abrazaderas (clamps) queden bien sujetas.

Para minimizar fallas debido a rozamiento entre mangueras, Caterpillar diseñó un nuevo material el cual es más resistente a la fricción llamado Tough guard. Esto sumando a las mejoras aplicadas a cada flota y aún correcto enrutamiento disminuirá gradualmente las horas down y aumentará la confiabilidad de la máquina.

Aunque caterpillar mejore la resistencia del material de fabricación de las mangueras, si estas no son correctamente erutadas pueden sufrir fallas prematuras por rozamiento causado fugas hidráulicas.

Un correcto enrutamiento de líneas hidráulicas durante una parada programada del equipo podrá evitarnos futuras detenciones en el campo, retrabados, fallas repetitivas y tiempo down que al final se traduce en una disminución en costos de mantenimiento e incremento de la confiabilidad y disponibilidad de las flotas.

- Remoción de Pecheras en PM H, para evaluar mangueras en mal estado o mal erutadas cambiarlas y enrutarlas bien. Fallas en Mangueras Hidráulicas y de Refrigerante por el roce de la tierra con las mangueras
- Revisión por parte del Supervisor de la Parte Inferior del Equipo para indicar los trabajos a realizar.
- Mangueras Prefabricadas en el taller de fabricación de Mangueras para agilizar instalación y suministro de Grommets y Clamps para asegurar las mangueras.
- Los Técnicos de PM y Campo tendrán Guías Rápidas de Búsqueda de partes de Mangueras Hidráulicas
- Programa de Organización de las Mangueras del sistema contra incendio.
- Programa de Control de Contaminación y Maquinas de Diálisis de Hidráulico.
- PCR de Bombas de Implementos, ventilador del motor y Motor del ventilador
- PCR de Mangueras en PCR de Componentes Mayores
- Instalación de Screen de Levante, Inclinación y Ventilador

3.2.2. Programa de Reducción de fugas y Consumo de Refrigerante

- Pruebas de Hermeticidad del Radiador en los PMS.

- Atención Inmediata a los Equipos que superan consumo diario de 10 Galones en Campo.
- Recuperación del Refrigerante Usado en PM, Taller y Campo.

Figura 70. Equipo para recuperar refrigerante



- Utilizar agua y NO refrigerante para hacer pruebas.
- Hacer un Buen Procedimiento de Limpieza para que el Refrigerante nuevo no se contamine.
- Programa de Mejoramiento de Fallas Repetitivas con Caterpillar.

Tabla 9. Promedio de consumo de refrigerante.

| Promedios de Consumo de Refrigerante Nuevo | Refill with new ELC | |
|--|---------------------|----------------|
| | Galones/Mes | Galones/Semana |
| Consumo | 2253 | 563 |
| Fuga | 1694 | 424 |
| Remocion de Componente | 564 | 141 |
| Contaminacion del Refrigerante | 22 | 6 |
| Cambio por horas de Trabajo | 31 | 8 |
| Total | 4565 | 1141 |

3.2.3. Disminuir las Fallas Ocasionadas por Desgaste de la Baquelita del Soporte del Capot de los D11R

- Modificación de los mounting (Baquelita) del capot, por un material más resistente y que tenga mejor respuesta a la vibración (Figura 71).

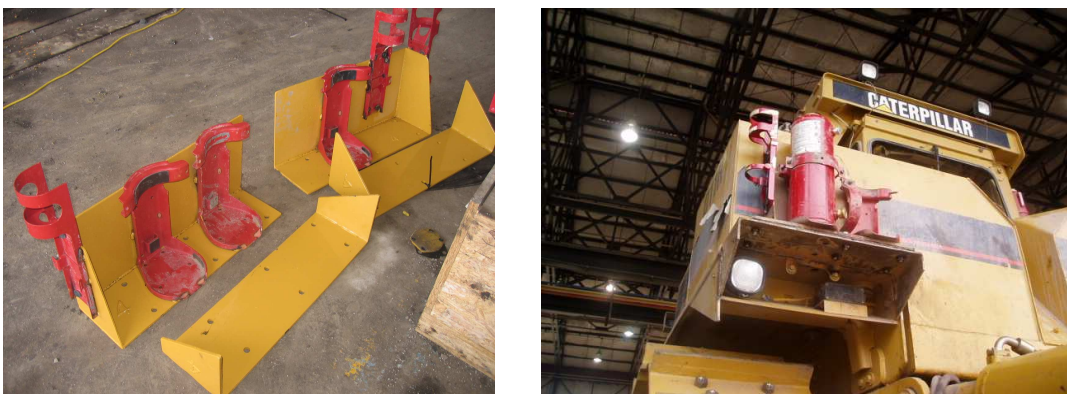
Figura 71. Soporte del capot del D11R



3.2.4. Disminuir el número de Fallas por Caída de las Bases del Sistema Supresor de Incendios

- Modificación de las bases de los tanques del sistema supresor de incendio, se colocaron nuevos soportes con mayor resistencia y protección (Figura 72).

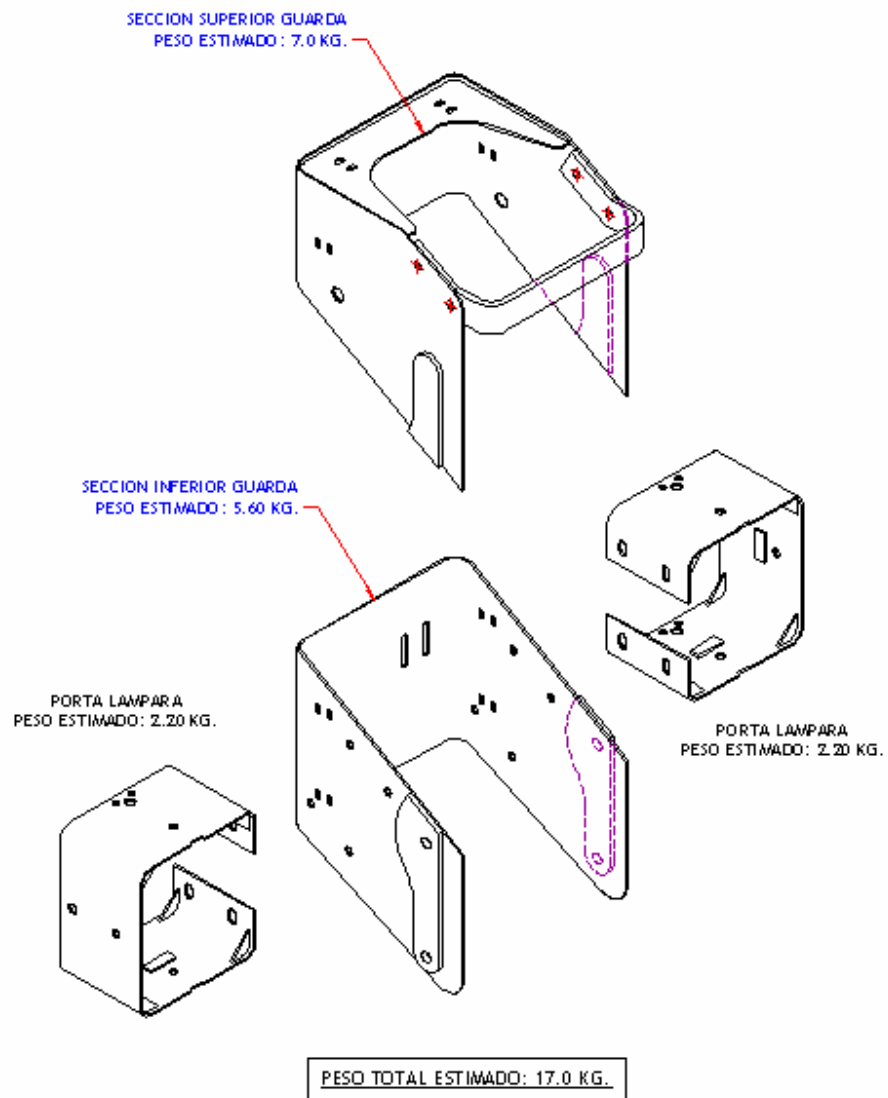
Figura 72. Bases de los tanques del sistema contra incendio



3.2.5. Disminuir el número de Fallas por Caída de las Bases de las Luces de los Cilindros de Levante

- Modificación de las bases de las luces de los cilindros de levante, por un material menos pesado pero igual de resistente (Figura 73).

Figura 73. Esquema de las bases de las luces de los cilindros de levante



3.2.6. Ejecución de Programas de Trabajo en los PM

- Revisión del Check List, Inspecciones Pre-operacionales, Análisis de aceites (SOS), Reporte de Rodaje, Herramientas de corte (Cuchilla, hoja topadora) y Backlogs pendientes.
- Listado de partes necesarias para las reparaciones programadas a realizar.
- Revisión del equipo al llegar al taller (revisión Pre-PM).
- Listado de partes necesarias para las reparaciones no programadas a realizar.
- Programación de los trabajos a realizar y cuales se reprogramaran con sus respectivos Backlogs.
- Orden en la ejecución de los trabajos y prever la ejecución de trabajos simultáneos.
- Tiempo estimado de entrega del equipo.
- Ejecución de trabajos a Realizar.
- Control de las tareas que se ejecutan
- Revisión final antes de entregar el equipo a producción
- Entregar el equipo operativo.
- Evaluación del desempeño del equipo después de las reparaciones realizadas.
- Seguimiento al Diligenciamiento de los Check list y Medición del MTBS de los PM y PCR

3.2.7. Aumentar vida útil de los Motores

- Prueba de Hermeticidad a Motores en PM cada 500 Horas.

Figura 74. Prueba de Hermeticidad de los motores para los D11R



- Instalación de un Filtro Separador de Agua.

Figura 75. Filtro separador de agua



- Instalación de Respiraderos de Tanques de Combustible.

Figura 76. Respiradero del tanque del combustible.



3.2.8. Programa de control de Contaminación

- Educar a los operadores de los equipos, al personal de servicio y al personal de mantenimiento, las causas básicas de la contaminación de los componentes, sus efectos y soluciones.
- Usar el programa de análisis y seguimiento de muestras de aceite SOS que recomienda el Dealer Caterpillar. Mejorar el tiempo de respuesta del laboratorio. Análisis en sitio
- Implementar el programa de control de contaminación dentro de las instalaciones y actividades del taller, en el almacén de repuesto, en estaciones y vehículos de servicio de lubricación, en reparaciones en el campo
- Revisiones periódicas y auditorias del programa por parte de personal experto.

3.2.9. Mejora en los sellos frontal y trasero del aftercooler

Se solicitó al dealer Caterpillar una investigación acerca de las causas de estas fugas y encontró fallas en la resistencia a la temperatura de los sellos utilizados en el aftercooler. Caterpillar suministró unos nuevos sellos con mayor resistencia a

altas temperaturas y se instalaron en algunos equipos de prueba que han arrojados mejores resultados.

3.2.10. Mejora en los sellos de las bombas principal y auxiliar de refrigerante

Se viene presentando excesivas fugas en las bombas principales y auxiliares en los motores de los D11R, estos componentes no esta durando las horas de vida útil esperadas y están fallando mucho antes que las horas esperadas del motor. Estas bombas vienen acopladas al motor y hacen parte de este, es por eso que se espera que su vida útil sea la misma que el motor.

La fuga por los sellos de estas Bombas, obligo al departamento de Mantenimiento a buscar la gestión del Dealer de Caterpillar, alternativas para minimizar estas fallas y disminuir reclamos de garantías y altos costos. Se esta experimentando unos nuevos sellos y mejorando el diseño de estas bombas, para disminuir los reportes de fallas de estos componentes, que son unas de las razones por las cuales los D11R, tienen baja disponibilidad.

3.2.11. Fuga por los sellos de los radiadores

Cuando se estaba haciendo el análisis de las razones de por que estos sellos de los radiadores fallaban tempranamente, inicialmente se censo que era por poca resistencia a la temperatura de trabajo del refrigerante y se ataco el problema desde esa perspectiva.

Se modificaron los sellos y se colocaron sellos mas resistentes a las altas temperaturas y el resultado siguió siendo desalentador, los equipos seguían presentando reportes de incremento de consumo de refrigerante y cambios de radiadores con pocas horas de servicio. Este resultado dio como reflexión que el problema principal de las fallas de los sellos ya no eran los deltas de temperatura del refrigerante si no otros factores que estaban incidiendo directamente en el desempeño de los sellos.

Se pudo determinar que después de realizar varios seguimientos más de cerca a la forma de operar los equipos y el comportamiento de los radiadores en el equipo, se pudo determinar que la causa de las fallas prematuras en los sellos de los radiadores es debida a las altas vibraciones que está sometido el radiador al momento de operar el equipo.

Ahora se ha reducido esta vibración solucionando las deficiencias en el montaje de los radiadores minimizando los agentes que la producen y mejorando: los mounting, arandelas, soportes, tornillos de sujeción, área de contacto.

3.2.12. Mejoras en los sellos de los cilindros de levante del dozer

Los cilindros de levante son los componentes que fallan más frecuentes en los D11R, tiene un bajo promedio de vida y esto se debe a la poca confiabilidad que brindan los sellos de estos componentes. La gran parte de las horas down por sistemas hidráulico, proviene de fugas y fallas en los cilindros de levantes e inclinación del dozer.

El departamento de Mantenimiento de Drummond LTD, ha realizado una intensa gestión para buscar otros sellos que puedan garantizar una buena resistencia y un esperado promedio de vida para estos componentes. Actualmente está en periodo de pruebas unos sellos distintos a los suministrados por el Dealer Caterpillar, con una mayor resistencia y que son completamente compatibles con los de CAT.

3.2.13. Disminución de las fugas de gases de escape por tornillos de culata del manifold de escape

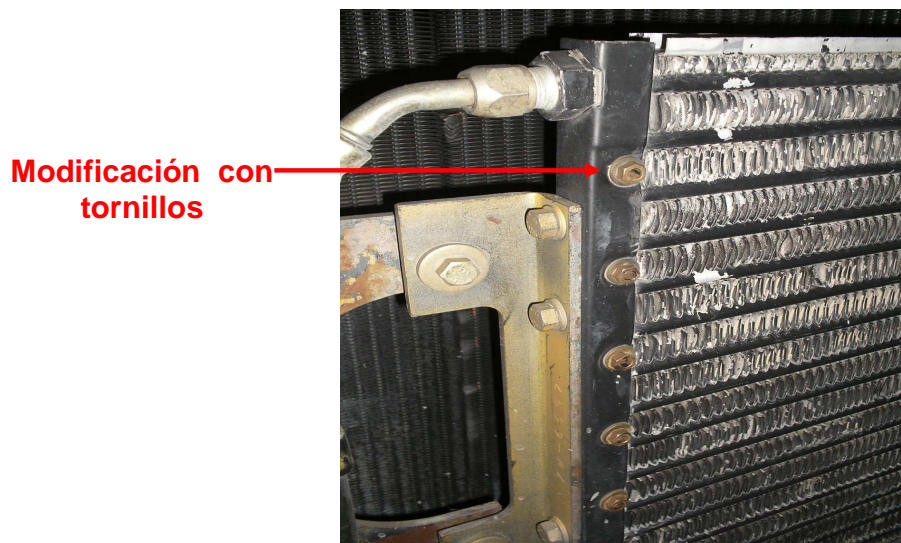
Anteriormente el torque aplicado a los tornillos de la culata del manifold de escape era de 85 N.m y con este ajuste los tornillos experimentaban fracturas produciéndose fugas de gases de escape.

Si disminuyo el torque de estos tornillos a 50 N.m y no se ha presentado reportes de fracturas de tornillos ni reportes de fugas de gases de escape en los manifold de los motores.

3.2.14. Mejoras en los remaches de los soportes laterales en los condensadores de aire acondicionado

Se cambiaron los remaches en los condensadores de aire acondicionado por tornillos y arandelas de sujeción. Esto logro desaparecer los reportes de fallas producidas por vibraciones al momento de operarse el equipo.

Figura 77. Condensador del sistema de aire acondicionado D11R



3.2.15. Medición de los tiempos utilizados en los mantenimientos Preventivos de los D11R y cálculo del MTBS

La medición regular de las variables involucradas en el proceso del mantenimiento Preventivo de los D11R es muy importante como base para encontrar eficiencias y puntos de oportunidades para mejorar. Permite contar con elementos racionales y técnicos para:

- Estudiar las condiciones actuales y calcular los indicadores.
- Fijar y revisar metas y comportamiento de indicadores.
- Proponer y estimar ahorros y mejoras.
- Entender la magnitud de los cambios necesarios y estimar inversiones.
- Tomar decisiones y establecer prioridades.

Realizando un experimento con 60 muestras de diferentes D11R que llegaron a Mantenimiento Preventivo en el mes de Junio 2007 para los diferentes tipos de PM, se pudo determinar el tiempo de duración de cada PM, el promedio mensual y el cálculo del promedio del MTBS del mes, arrojando los resultados mostrados en la tabla.

Como se pudo comprobar con estos resultados, el tiempo estimado de 8 horas para los tipos de PM largos: B, D, F y H no se estaba cumpliendo lo mismo que para los llamados PM cortos: A, C, E y G (ver tabla).

Tabla 10. Muestras de diferentes tiempos utilizados en la realización de los mantenimientos de los D11R en el mes de junio 2007.

| EQUIPO | TIPO PM | MTBS After PM | Date down | Date up | Down_Hrs | Minutos |
|--------|---------|---------------|------------------|------------------|----------|---------|
| 5231 | D | 52,7 | 06/01/2007 00:00 | 06/01/2007 11:00 | 11,00 | 660 |
| 5266 | B | 28,2 | 06/01/2007 03:56 | 06/01/2007 13:15 | 9,32 | 559 |
| 5267 | A | 31,8 | 06/02/2007 14:00 | 06/02/2007 21:00 | 7,00 | 420 |
| 5685 | F | 54,1 | 06/02/2007 17:00 | 06/03/2007 01:30 | 8,50 | 510 |
| 5669 | C | 12,0 | 06/03/2007 15:16 | 06/03/2007 23:00 | 7,73 | 464 |
| 5256 | G | 3,9 | 06/04/2007 12:45 | 06/05/2007 13:40 | 24,92 | 1495 |
| 5709 | E | 66,1 | 06/04/2007 20:00 | 06/05/2007 09:00 | 13,00 | 780 |
| 5720 | A | 12,9 | 06/06/2007 05:19 | 06/06/2007 13:00 | 7,68 | 461 |
| 5668 | C | 30,8 | 06/06/2007 07:34 | 06/06/2007 15:00 | 7,43 | 446 |
| 5704 | B | 22,0 | 06/07/2007 03:15 | 06/07/2007 12:00 | 8,75 | 525 |
| 5673 | A | 133,0 | 06/08/2007 08:38 | 06/08/2007 23:00 | 14,37 | 862 |
| 5695 | B | 29,4 | 06/09/2007 05:00 | 06/09/2007 16:00 | 11,00 | 660 |

| EQUIPO | TIPO PM | MTBS After PM | Date down | Date up | Down_Hrs | Minutos |
|---------------|----------------|----------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| 5735 | F | 40,4 | 06/09/2007 05:00 | 06/09/2007 18:00 | 13,00 | 780 |
| 5714 | H | 9,5 | 06/09/2007 14:00 | 06/10/2007 16:00 | 26,00 | 1560 |
| 5279 | A | 81,9 | 06/10/2007 06:00 | 06/10/2007 15:42 | 9,70 | 582 |
| 5270 | B | 38,6 | 06/10/2007 13:43 | 06/11/2007 00:00 | 10,28 | 617 |
| 5271 | D | 29,7 | 06/11/2007 04:30 | 06/11/2007 23:30 | 19,00 | 1140 |
| 5706 | B | 15,4 | 06/11/2007 06:00 | 06/11/2007 17:00 | 11,00 | 660 |
| 5677 | G | 5,3 | 06/11/2007 20:00 | 06/12/2007 22:00 | 26,00 | 1560 |
| 5276 | C | 131,1 | 06/11/2007 23:00 | 06/12/2007 15:20 | 16,33 | 980 |
| 5716 | H | 17,6 | 06/12/2007 04:00 | 06/13/2007 16:00 | 36,00 | 2160 |
| 5259 | D | 14,0 | 06/12/2007 14:27 | 06/13/2007 01:00 | 10,55 | 633 |
| 5269 | F | 6,9 | 06/12/2007 16:30 | 06/13/2007 17:00 | 24,50 | 1470 |
| 5675 | C | 34,3 | 06/14/2007 01:20 | 06/14/2007 11:00 | 9,67 | 580 |
| 5721 | D | 6,2 | 06/15/2007 08:00 | 06/16/2007 14:00 | 30,00 | 1800 |
| 5702 | A | 190,3 | 06/15/2007 09:00 | 06/15/2007 17:00 | 8,00 | 480 |
| 5688 | B | 27,5 | 06/17/2007 01:00 | 06/17/2007 12:00 | 11,00 | 660 |
| 5739 | G | 36,6 | 06/17/2007 21:19 | 06/18/2007 05:00 | 7,68 | 461 |
| 5264 | H | 53,0 | 06/18/2007 22:00 | 06/19/2007 15:00 | 17,00 | 1020 |
| 5665 | D | 35,9 | 06/19/2007 10:28 | 06/20/2007 15:00 | 28,53 | 1712 |
| 5712 | C | 23,9 | 06/19/2007 16:49 | 06/20/2007 01:21 | 8,53 | 512 |
| 5718 | E | 28,2 | 06/19/2007 23:22 | 06/20/2007 10:00 | 10,63 | 638 |
| 5678 | H | 33,2 | 06/20/2007 01:29 | 06/20/2007 14:00 | 12,52 | 751 |
| 5277 | F | 31,2 | 06/20/2007 05:20 | 06/21/2007 03:00 | 21,67 | 1300 |
| 5668 | C | 13,5 | 06/20/2007 16:50 | 06/21/2007 03:00 | 10,17 | 610 |
| 5267 | H | 33,5 | 06/20/2007 18:00 | 06/21/2007 14:00 | 20,00 | 1200 |
| 5720 | B | 88,7 | 06/21/2007 05:00 | 06/21/2007 14:00 | 9,00 | 540 |
| 5671 | D | 22,2 | 06/21/2007 15:58 | 06/22/2007 10:00 | 18,03 | 1082 |
| 5256 | G | 52,5 | 06/21/2007 16:45 | 06/22/2007 15:33 | 22,80 | 1368 |
| 5263 | B | 271,5 | 06/21/2007 18:00 | 06/22/2007 04:00 | 10,00 | 600 |
| 5715 | F | 111,8 | 06/21/2007 23:30 | 06/22/2007 12:00 | 12,50 | 750 |
| 5261 | E | 76,0 | 06/22/2007 06:00 | 06/22/2007 15:00 | 9,00 | 540 |
| 5262 | A | 125,9 | 06/22/2007 16:35 | 06/23/2007 00:03 | 7,47 | 448 |
| 5673 | H | 5,5 | 06/22/2007 22:00 | 06/23/2007 08:00 | 10,00 | 600 |
| 5280 | F | 28,0 | 06/23/2007 03:30 | 06/23/2007 12:00 | 8,50 | 510 |
| 5268 | D | 131,1 | 06/24/2007 00:00 | 06/24/2007 10:00 | 10,00 | 600 |
| 5687 | G | 34,8 | 06/24/2007 05:00 | 06/25/2007 01:00 | 20,00 | 1200 |
| 5258 | C | 57,6 | 06/25/2007 00:00 | 06/25/2007 10:00 | 10,00 | 600 |

| EQUIPO | TIPO PM | MTBS After PM | Date down | Date up | Down_Hrs | Minutos |
|----------------|---------|---------------|------------------|------------------|----------|----------|
| 5270 | H | 119,4 | 06/25/2007 15:40 | 06/26/2007 00:30 | 8,83 | 530 |
| 5676 | B | 37,3 | 06/26/2007 10:42 | 06/26/2007 19:00 | 8,30 | 498 |
| 5275 | F | 6,4 | 06/26/2007 19:00 | 06/27/2007 04:30 | 9,50 | 570 |
| 5266 | A | 149,0 | 06/26/2007 20:00 | 06/27/2007 13:00 | 17,00 | 1020 |
| 5704 | F | 13,3 | 06/27/2007 02:13 | 06/27/2007 13:00 | 10,78 | 647 |
| 5272 | H | 101,3 | 06/27/2007 06:30 | 06/28/2007 00:00 | 17,50 | 1050 |
| 5702 | E | 47,5 | 06/28/2007 05:20 | 06/28/2007 12:00 | 6,67 | 400 |
| 5738 | C | 41,1 | 06/28/2007 21:40 | 06/29/2007 03:27 | 5,78 | 347 |
| 5278 | G | 112,4 | 06/28/2007 23:30 | 06/29/2007 23:00 | 23,50 | 1410 |
| 5269 | B | 51,0 | 06/29/2007 10:00 | 06/29/2007 22:00 | 12,00 | 720 |
| 5708 | C | 66,6 | 06/29/2007 14:25 | 06/29/2007 23:00 | 8,58 | 515 |
| 5713 | H | 14,9 | 06/30/2007 04:30 | 06/30/2007 23:00 | 18,50 | 1110 |
| Prom. 53. hrs. | | | promedio | | 13.7 | 822 min. |

Tabla 11. Diferentes tipos de Mantenimientos Preventivos utilizados en los D11R

| Horas | TIPO DE PM | | | | | | | |
|--------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | A (3hr) | B (6hr) | C (3hr) | D (6hr) | E (3hr) | F (6hr) | G (3hr) | H (6hr) |
| | 250 | 500 | 750 | 1000 | 1250 | 1500 | 1750 | 2000 |
| Motor (15W-40) | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Mando Final | | | | X | | | | X |
| Transmisión HD30 | | X | | X | | X | | X |
| Sistema Hidráulico | | | | | | | | X |

Existían varios factores causantes que se presentara esta situación en el departamento de mantenimiento para los D11R y que han sido resaltados anteriormente en este proyecto. Cuando el equipo llegaba a los talleres para su mantenimiento, ocurría una de las siguientes situaciones:

- Faltaban técnicos suficiente para realizar el mantenimiento
- Poco o demasiado tiempo para el mantenimiento, no se tenía un tiempo claro de ejecución de las tareas
- Inadecuado distribución de las pautas o Check list para las actividades asignadas a cada técnicos.

- Los 8 tipos de PM que se les realizaba a los equipos D11R eran muy imprácticos y no iban acordes con la realidad actual del mantenimiento preventivo para estos equipos.
- El incremento de equipos down por fallas imprevistas (mantenimiento correctivo) en las diferentes áreas de trabajo en la mina, obligaban a suspender actividades en los equipos que se encontraban en los talleres en PM, para así poder suplir la necesidad de técnicos en esas áreas.
- Cuando el departamento de Producción tenía muchos equipos down, no entregaba los equipos programados para el mantenimiento preventivo, ocasionando mayor desgaste e incremento de los riesgos de fallas en los componentes de estos equipos.
- Había que suspender la totalidad de ejecución de tareas y backlogs de los equipos que estaban en proceso del mantenimiento preventivo, para poderlos enviar a trabajar al área de producción del carbón, y así poder suplir la necesidad de cumplir con el programa de producción por la falta de equipos disponibles.
- La falta de partes y componentes en stock, obligaba a que el equipo quedara down esperando parte y esto lógicamente afectaba la confiabilidad y la disponibilidad de la flota de los D11R.

3.2.16. Mejoras realizadas para lograr alcanzar los tiempos requeridos en el mantenimiento Preventivo de los D11R

- Se modificó completamente las pautas de los check list de los diferentes tipos de PM. Se diseñaron unas pautas más realistas, con menos número de hojas de información, de mejor manejo para los técnicos, donde cada uno tiene claro las actividades a realizar y hay una buena distribución del tiempo para cada actividad.
- Todos los diferentes tipos de PM quedaron de 8 horas máximo para su realización, es decir ya no habrá la diferencia de PM cortos y largos, los tipos

PM con el mismo tiempo de duración, pero con actividades específicas diferentes.

- En algunos tipos de PM se efectuaran tareas como: limpieza de pecheras, calibración del sistema hidráulico, prueba de hermeticidad del motor, cambios de componentes menores, etc. Que podrán ser efectuados en aquellos tipos donde no involucren cambios de todos los aceites y filtros de los sistemas, como se presenta por ejemplo en el PM tipo H.
- Se determino que el numero necesario para la realización de los PM, eran 3, 5 y 7 respectivamente y que la coordinación de las tareas y el numero de técnicos para cada una, es el secreto para cumplir con el tiempo destinado para la realización del mantenimiento y el cumplimiento de los backlogs programados.
- Se adquirió un compromiso con el departamento de producción de cumplir el tiempo de entrega de los equipos que llegan para los PM, pero que producción cumplirá la programación del departamento de planeación de mantenimiento eficientemente.
- Procurar que los equipos que estén en el taller de mantenimiento, realizándoles el PM, no suspenderles las actividades de mantenimiento y ejecución de backlogs en el tiempo estimado de 8 horas.
- Se diseño una lista completa de los componentes y partes más criticas de todos los sistemas del D11R para mantener en stock en el almacén, con el fin de evitar incremento del tiempo down esperando partes en los equipos.

4. ELEMENTOS PARA EL DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA

4.1. ETAPA DE DEFINICIÓN DEL PROYECTO

En la Etapa de Definición los responsables de aplicar el método SEIS SIGMA definen el problema de calidad, mediante una planeación que involucre las expectativas y necesidades de los clientes, la identificación del proceso y de sus interrelaciones; así como también las variables críticas.

4.2. CRITERIOS DE LA ETAPA DE DEFINICIÓN

La organización debe establecer en la Etapa de Definición los siguientes pasos para la implementación de esta filosofía de gestión:

- A través de un diagnóstico preliminar, la organización debe conocer e identificar las áreas susceptibles de mejora, definir las metas, objetivos y alcance del proyecto (ver Figura 78).
- Se debe identificar y evaluar percepción tanto de los clientes activos como de los potenciales, para mantener una respuesta acorde con sus necesidades y expectativas en cuanto se refiere a la fiabilidad del producto, impacto ambiental, disponibilidad, tiempo de entrega, costo y seguridad. Comprender las necesidades y expectativas de los clientes es un elemento fundamental para el éxito de una organización.
- De acuerdo con el análisis realizado en el diagnóstico se seleccionan los proyectos potenciales, se estiman los ahorros y el alcance razonable de tiempo que cada uno genera.

- La caracterización de los procesos (ver Figura 79) es de suma importancia para comprender que caracterizar el proceso radica en comprender cada una de las fases o de las diversas actividades que lo conforman, pues de ella depende el grado de confiabilidad del análisis para la toma de decisiones.

Figura 78. Cuadro Planeación de actividades

| Planeación del Proyecto | | | |
|---|---|---|--------------------------------|
| Importancia del problema en la organización | | | |
| Efecto Interno | Tipo de relación | | Efecto Externo |
| | Alta | Baja | |
| | | | |
| Metas y Objetivos | | | Responsable en la organización |
| | | | Nivel 1 |
| | | | Nivel 2 |
| | | | Nivel 3 |
| Fecha de aprobación del proyecto | | | |
| Planteamiento del Problema | | | |
| Etapas del seis sigma | Fechas establecidas para cada de las etapas | Funcionario responsable de la actividad | |
| Definir | | | |
| Medir | | | |
| Analizar | | | |
| Mejorar | | | |
| Controlar | | | |

Selección del Líder y el equipo del Proyecto: el líder debe ser un empleado de la organización con conocimientos y experiencias en el área involucrada en el proyecto, con una comprensión suficiente de la filosofía Seis Sigma y la aplicación de las diversas herramientas que exige el DMAMC, y lo más importante es la capacidad de transmitir al equipo sus ideas, motivaciones y encausarlo hacia los

resultados que la organización espera del proyecto. Los miembros restantes del equipo son seleccionados con base en la experiencia y el conocimiento del área implicada.

Figura 79. Cuadro Caracterización de un proceso

| | | |
|---|------------------------|--------------------------------|
| Membrete de la Organización | | Código del procedimiento |
| Versión: | | |
| Caracterización del proceso Productivo | | |
| Objeto | Documentos y registros | |
| | Internos: | |
| | Externos: | |
| | | |
| Entrada | Actividades | Salida |
| Interrelación con los otros procesos | | Responsable en la organización |
| | | Nivel 1: |
| | | Nivel 2: |
| | | Nivel 3: |
| Recursos de la organización (humanos y tecnologías) | | Requisitos a cumplir |
| | | |
| Medición y seguimiento | | |
| | | |
| Comunicación | | |
| Nivel 1: | | |
| Nivel 2: | | |
| Nivel 3: | | |
| Observaciones | | |
| | | |

El cuadro siguiente muestra la forma en que se debe organizar la información del proyecto.

Figura 80. Cuadro Planeación del proyecto del Departamento de Mantenimiento

| Planeación del Proyecto | | | |
|--|---|---|--|
| Importancia del problema en la organización <i>La disminución de la disponibilidad en los equipos D11R-CAT afecta la producción de la empresa</i> | | | |
| Efecto Interno | Tipo de relación | | Efecto Externo |
| | Alta | Baja | |
| <i>Tiempo perdido en retrabajos. Aumento de costos en el departamento de mantenimiento. Perdida de la confianza por parte del departamento de producción</i> | | | <i>Poca utilización de los equipos por parte del departamento de producción. Disminución de la producción de carbon. Incumplimiento con los clientes</i> |
| Metas y Objetivos | | | Responsable en la organización |
| <i>Incrementar la disponibilidad de los equipos. Confiabilidad en la utilización de los equipos por parte de producción para cumplir sus metas.</i> | | | Ing. De Contacto |
| | | | Jefe de Producción |
| Fecha de aprobación del proyecto | | | |
| <i>Junio 2 de 2007</i> | | | |
| Planteamiento del Problema | | | |
| <i>La disponibilidad de los D11R-CAT se esta disminuyendo enormemente</i> | | | |
| Etapas del seis sigma | Fechas establecidas para cada de las etapas | Funcionario responsable de la actividad | |
| Definir | <i>Julio de 2007</i> | <i>Gerencia</i> | |
| Medir | <i>Agosto de 2007</i> | <i>Jefe de Producción</i> | |
| Analizar | <i>Septiembre de 2007</i> | <i>Ing. De Contacto</i> | |
| Mejorar | <i>Septiembre de 2007</i> | <i>Grupo de Calidad</i> | |
| Controlar | <i>Desde Octubre de 2007</i> | <i>Personal del área.</i> | |

A modo ilustrativo, de cómo se presenta el enfoque de Seis sigma en la gestión de Mantenimiento, tenemos el caso del problema de baja disponibilidad que se está presentando en la multinacional Colombo-Americana de minería del carbón con operaciones en el departamento del Cesar DRUMMOND LTD.

Entraremos a tomar como referencia el ciclo Deming, cuyos criterios ya conocemos 1. Definir 2. Medir 3. Analizar 4. Mejorar 5. Controlar. Sus objetivos se centran en dar solución a las necesidades del cliente interno y externo, identificar las causas que generan los problemas de calidad del servicio de Mantenimiento preventivo en DRUMMOND LTD, las mediciones de las variables críticas, la aplicación de las diversas técnicas estadísticas y el seguimiento permanente de cada una de las actividades propuestas para eliminar un problema de calidad.

4.3. ETAPA DE MEDICIÓN DEL PROYECTO

Es importante destacar que las mediciones cobran su importancia cuando las decisiones se basan en hechos evidentes, por lo tanto, en esta instancia resulta fundamental el conocimiento que la organización tenga acerca de la aplicación de los métodos estadísticos. Si una empresa fundamenta el tratamiento de la información recolectada únicamente en técnicas estadísticas descriptivas, el análisis que se realice del proceso será superficial e implicaría toma de decisiones erradas, generando de esta manera elevados costos atribuibles de falta de calidad.

4.3.1. Medición de la Organización

La organización debe planificar e implementar procedimientos de seguimiento con el propósito de validar la información que toma del proceso, como la medición y evaluación del producto, la capacidad del proceso, los indicadores de gestión del proyecto y la satisfacción de los clientes externos e interno.

La filosofía de SEIS SIGMA posee un enfoque basado en procesos, es por ello imperativo entonces tomar la información de las fases que componen esta estructura. Las áreas en las cuales se debe tomar información son el área de entrada al proceso, el área que integra las distintas actividades del proceso, el área de salida del proceso y el área de satisfacción del cliente (ver figura 81).

Figura 81. Cuadro. Mediciones de las diferentes actividades de la organización.

| | | | |
|---|---|---|--|
| Revisión Pre-mantenimiento al equipo | Revisión del proceso de mantenimiento preventivo | Revisión al equipo después de terminado el mantenimiento | Revisión del funcionamiento del equipo en la operación |
| Eficacia de los proveedores | Eficiencia de la organización. Gestión del mantenimiento | Eficacia de la organización. Gestión del mantenimiento | Eficacia y eficiencia de la organización. Gestión del mantenimiento |
| Mediciones que se les exige a los proveedores | Mediciones a las variables críticas del proceso | Mediciones de las no conformidades presentes en los equipos | Mediciones del grado de satisfacción del cliente |

Una manera simple de recolectar la información necesaria se obtiene definiendo inicialmente en el planteamiento del proyecto un Plan de Recolección de Información, en el cual se debe plantear, en primera instancia, cuál es el objeto susceptible de medición, para ello se debe establecer qué tipo de variable se está midiendo u observando, es decir, si se trata de una variable discreta, continua o mixta, y cuáles son las especificaciones de cada una de las variables críticas del proceso. En la figura 83, se dan las pautas para una adecuada recolección de la información.

4.3.2. Medida del nivel de Seis Sigma

En segundo lugar, se debe medir la medida del nivel SEIS SIGMA en la organización, que expresa la variabilidad del proceso con respecto a las especificaciones establecidas por la organización o los requerimientos de los clientes. Esta medida se realiza mediante una tabla de información que muchos autores toman como base para establecer la medida de desempeño de la organización (Ver tabla 12). Estos cálculos se obtienen de cuantificar la medida de probabilidad de un proceso cuyo comportamiento sea una distribución normal estándar $X \sim N (u, \sigma^2)$ y cumpla con las especificaciones requeridas en el proceso.

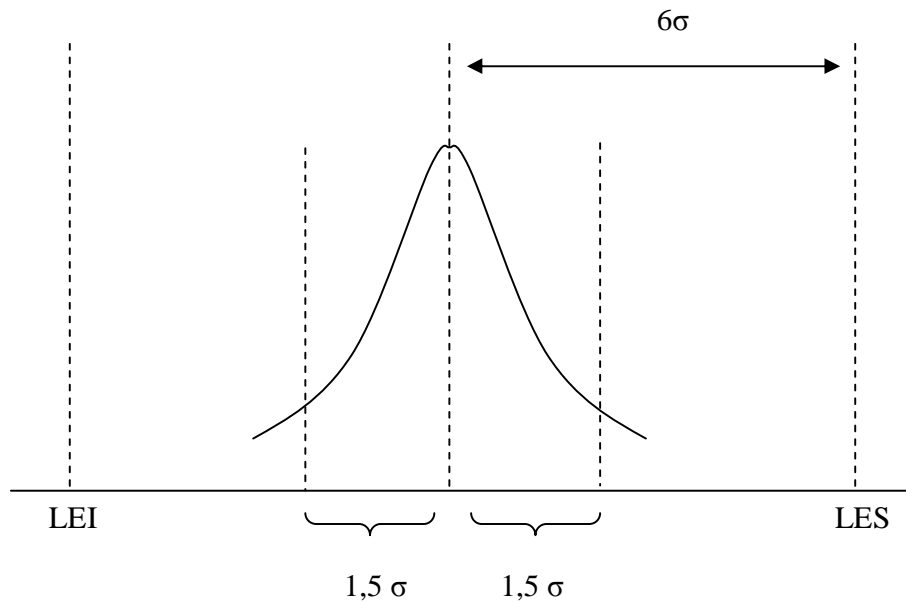
Sea les y lei los límites de especificación superior e inferior de un proceso, la probabilidad p de que un artículo sea o no conforme es:

$$p = p(X \leq lei) + p(X \geq les) = p \left[Z \leq \frac{lei - u}{\sigma} \right] + p \left[Z \geq \frac{les - u}{\sigma} \right] \quad (1)$$

Asumiendo que el promedio del proceso es el valor nominal de las especificaciones, tenemos entonces,

$$u = \frac{les + lei}{2}$$

Figura 82. Proceso cuyo índice de capacidad $C_p= 2$



Para un proceso cuyo índice de capacidad es la unidad

$$C_p = \frac{les - lei}{3\sigma} = 1$$

Tenemos que,

$$(Les - \mu) = - (lei - \mu) = (1) (3\sigma) = 3\sigma$$

Reemplazando en la ecuación (1)

$$p = p(Z \leq -3) + p(Z \geq 3) = 0.0027 (0.27\%)$$

Lo que implica que 0.27% de las unidades son no conforme o en forma equivalente se tiene en el proceso una producción no conforme de 2.7 por cada millón de unidades fabricadas.

Utilizando los mismos criterios anteriores con un $C_p = 2$, tenemos que

$$(Les - \nu) = - (Lei - \nu) = (2) (3\sigma) = 6\sigma$$

El cálculo del porcentaje de unidades no conforme es,

$$p = p(Z \leq 4.5) + p(Z \geq 4.5) = 0.0000034 (0.00034\%)$$

Es decir, por cada millón de unidades fabricadas 3.4 son no conformes, criterio utilizado en la filosofía del DMAMC.

Una manera más sencilla de realizar estos cálculos se da en el siguiente ejemplo: sí se calcula el rendimiento para un proceso que posea una medida o nivel de desempeño de tres sigma, se calcula el valor como $z = (\text{nivel} - 1.5)$ en este caso $z = (3 - 1.5) = 1.5$, se tiene que la probabilidad es $p(z \leq 1.5) = 0.9331928$ (93.32%), lo que indica que por cada millón de unidades fabricadas, 66807 unidades son no conformes.

Para una medida ideal de desempeño de SEIS SIGMA, $z = (6 - 1.5) = 4.5$, cuya probabilidad se expresó anteriormente.

4.3.3. Evaluación de la medida de desempeño

El procedimiento para el cálculo de la medida o nivel de desempeño consiste en determinar inicialmente los Factores Críticos de Calidad (FCC) de la organización o también llamadas Oportunidad de Error, que consiste en cualquier parte de la unidad o servicio que está expuesta a generar una no conformidad. Posteriormente se multiplica este valor por una muestra de artículos productivos (MAP) obteniendo de esta forma el total de Defecto Factibles (TDF = FCC x CP);

luego se toma el número de no conformidades o fallas presentes en el proceso (NC) y se divide entre el Total de Defectos Factibles (TDF) y esto a su vez se multiplica por un millón, para obtener los Defectos por Millón de Oportunidades (DPMO).

La formulación se presenta de la siguiente manera que:

$$DPMO = \frac{NC}{TDF} * 1.000.000 = \frac{NC}{FCC * MAP} * 1.000.000$$

Donde,

DPMO representa la cantidad de defectos por millón de oportunidades;

FCC es la cantidad de factores críticos de calidad de la organización;

MAP o MSR es el tamaño de una muestra de artículos producidos; o números de servicios realizados.

TDF es el total de defectos factibles;

NC es el número de no conformidades o fallas presentes en el proceso.

Existen maneras tradicionales para socavar la información que permita determinar la medida DPMO. Los factores críticos de calidad (FCC) se determinan mediante técnicas de muestreo aleatorio de clientes externos e internos del proceso en cada una de las etapas del mismo. Si se trata de un servicio, la mejor metodología constituye en aplicar un cuestionario a una muestra representativa de consumidores.

Figura 83. Cuadro. Plan de recolección de la información

| Variable del Proceso | | | | |
|---------------------------------------|----------|--|----------|--|
| Nombre de la variable critica | | | | |
| Tipo de Variable | Discreta | | Continua | |
| Especificación de la variable critica | | | | |

Figura 84. Cuadro. Criterios para determinar el valor del nivel Seis sigma.

| Criterios del Nivel Seis Sigma | |
|--|--|
| Nombre de las no conformidades | |
| Factores Críticos de calidad FCC | |
| Muestra de artículos Producidos MAP o servicios realizados MSR | |
| TDF | |
| Números de no Conformidades en el proceso | |

Tabla 12. Cuadro Medidas del nivel de Seis Sigma

| Rendimiento | Nivel del Sigma | DPMO |
|-------------|-----------------|---------|
| 6.680 | 0.00 | 933200 |
| 8.455 | 0.13 | 915450 |
| 10.56 | 0.25 | 894400 |
| 13.03 | 0.38 | 869700 |
| 15.87 | 0.50 | 841345 |
| 19.08 | 0.63 | 809200 |
| 22.66 | 0.75 | 773400 |
| 26.59 | 0.88 | 734050 |
| 30.85 | 1.00 | 691452 |
| 34.50 | 1.10 | 655422 |
| 38.20 | 1.20 | 617911 |
| 4.10 | 1.30 | 579260 |
| 46.00 | 1.40 | 539828 |
| 50.00 | 1.50 | 500000 |
| 69.10 | 2.00 | 308538 |
| 84.10 | 2.50 | 158655 |
| 93.30 | 3.00 | 66807.0 |
| 94.79 | 3.13 | 52100.0 |
| 95.99 | 3.25 | 40100.0 |
| 99.40 | 4.00 | 6210.00 |
| 99.98 | 5.00 | 233.000 |
| 9.9999.966 | 6.00 | 340.000 |

Retomando el ejemplo, en la compañía Drummond Ltd, para nuestro caso en particular se evalúa el nivel SEIS SIGMA del departamento de mantenimiento de equipo móvil CAT., a partir de la información necesaria para la determinación del DPMO, consignado en las Figura 85, 86. En la tabla 11, se observan las duraciones de los servicios de mantenimiento preventivo de los equipos D11R-CAT.

Figura 85. Cuadro. Variable problema y su caracterización

| Perfil de la característica de calidad | | | |
|--|--|--|------------|
| Nombre de la variable crítica | Se va a medir el tiempo exacto de los mantenimientos preventivos de los equipos D11R antes de ser entregados al departamento de producción el cual deben tener un tiempo promedio de 500 minutos (8 horas aprox.) | | |
| Tipo de Variable | Discreta | | Continua x |
| Especificación de la variable crítica | La meta busca tener una mínima variabilidad en el tiempo del mantenimiento y que este se encuentre más cerca de 500 minutos (8 horas aproximadamente). | | |

Figura 86. Cuadro. Criterios del nivel de Seis Sigma

| Criterios del Nivel Seis Sigma | |
|--|--|
| Nombre de las no conformidades | <ul style="list-style-type: none"> • Personal insuficiente • Tiempo por encima y tiempo por debajo de los mantenimientos • Falta de partes y componentes para la ejecución de Backlogs. Hay que recurrir a la improvisación |
| Factores Críticos de calidad FCC | 3 |
| Muestra de artículos Producidos MAP o servicios realizados MSR | 200 |
| TDF | 600 |
| Números de no Conformidades en el proceso | 32 |
| NC | 32 |

$$DPMO = \frac{32}{3 * 200} * 1.000.000 = \frac{32}{600} * 1.000.000 = 53333.3$$

Con la información recolectada se logra establecer que el proceso analizado tiene un número esperado de 53333.3 defectos por millón, cantidad que equivale, de acuerdo con la tabla del apéndice, a un desempeño de más de 3.13 desviaciones, para un rendimiento cercano a 95%.

Tabla 13. Cuadro. Información del tiempo de los tipos de mantenimiento preventivo de los equipos con diferentes grupos de técnicos.

| DRUMMOND LTD | | | | | |
|---|-----|-------------------------|--|--------------------|-----|
| DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO MOVIL | | | | | |
| CONTROL DE PROCESO | | | SERVICIO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LOS D11R-CAT | | |
| VARIABLE EVALUADA : TIEMPO | | | ESPECIFICACION ± 5 | | |
| INTERVALO DE MUESTREO CADA 8 horas | | | MAX: 525 Minutos | | |
| | | | MIN: 475 Minutos | | |
| | | | TIEMPO REQUERIDO 500 minutos (8Hrs) | | |
| TIPOS DE MANTENIMIENTO APLICADO | | | | | |
| TIPO A-C-E-G: 3 TECNICOS | | TIPO B-D-F : 5 TECNICOS | | TIPO H: 7 TECNICOS | |
| 485 | 498 | 509 | 505 | 512 | 509 |
| 489 | 500 | 498 | 504 | 511 | 505 |
| 490 | 501 | 510 | 502 | 504 | 509 |
| 495 | 495 | 480 | 509 | 501 | 505 |
| 499 | 498 | 485 | 509 | 503 | 500 |
| 500 | 495 | 490 | 503 | 515 | 500 |
| 502 | 501 | 499 | 510 | 509 | 501 |
| 510 | 505 | 518 | 495 | 518 | 502 |
| 500 | 507 | 490 | 500 | 521 | 524 |
| 520 | 496 | 498 | 520 | 521 | 517 |

El cálculo del nivel de desempeño se determina cuantificando los valores críticos del proceso desde la entrada de los equipos, salidas de los equipos y necesidades del cliente. Una vez recolectada la información se calcula el nivel DPMO cantidad de defectos por millón, que indicará el nivel de desempeño del proceso.

4.4. ETAPA DE MEJORAMIENTO DEL PROYECTO

La Etapa de Mejoramiento implica que la organización debe mejorar continuamente en términos de la eficacia de sus procesos, de tal manera que permita llevar a cabo nuevas técnicas o formas más efectivas de optimización. Para lograr este mejoramiento la organización debe comprometerse a determinar las tendencias del producto y a establecer el nivel de satisfacción del cliente, a la vez que debe realizar estudios comparativos de su desempeño y nivel de competitividad con respecto a otras organizaciones. Técnicas de mejoramiento como el AMEF, el DISEÑO EXPERIMENTAL ayuda a la toma de decisiones adecuadas en la organización.

4.4.1. Análisis del modo y efectos de fallas potenciales

Una herramienta útil para llevar a cabo la etapa de mejoramiento continuo es el Análisis del Modo y Efectos de Fallas, AMEF (ver Figura 87), mediante la cual se identifica el problema y sus posibles causas, así como también se proponen posibles soluciones, se estipula los responsables y las fechas establecidas para la ejecución de las mismas.

La técnica AMEF se basa fundamentalmente en procedimientos de observación y descripción constantes, por lo que es poco objetiva y su utilización se restringe a casos poco complejos de análisis.

Figura 87. Cuadro. Análisis del Modo y Efecto de falla potencial⁵

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|---------------------------------|---|-----------------------|----------------------------------|--|-----------------------|---------------------------------|------------------------|--|--|--|
| Parte Función | Modo potencial | efecto potencial de falla | S E V E R I D A D | C L A S E | causa o de falla potencial | O C U R R E N C I A | Controles actuales | R E S P O N S | Resultados de acciones | | | |
| | | | S V C | O C C | D E T | NP R | | | | | | |

4.4.2. Diseño experimental unifactorial

El diseño experimental es otras de las herramientas más aplicadas en el mejoramiento y optimización de un proceso. Aquí, mediante una técnica denominada análisis de varianza se cuantifica el efecto de diferentes niveles o tratamientos sobre una variable respuesta que se constituye en objeto de interés.

⁵ Tomado del Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación ICONTEC. Formación de aseguramiento de la calidad en Empresas de Manufactura. Manual del participante, 1998.

Uno de los principales objetivos del análisis de los datos en un diseño experimental es cuantificar y evaluar la importancia de las fuentes de variación atribuida a distintos niveles de uno o varios factores de clasificación o tratamientos.

En términos formales, el análisis de varianza, es un procedimiento sistemático que particiona la variabilidad total (o suma de cuadrados notables), en variabilidad explicada por los distintos niveles de los factores de clasificación o, simplemente, tratamientos y una variabilidad inexplicable debida a presencia inevitable de discrepancias, entre lo que se observa y debiera ser. La tabla de análisis de varianza resume el conocimiento acerca de la variabilidad de las observaciones del experimento. Se ha hecho una partición en dos de la suma total de cuadrados; una representa la variación entre las medidas de los tratamientos, la otra del error experimental.

El diseño uní factorial es aplicado cuando las observaciones de y_{ij} una variable respuesta de interés sufren la influencia de cierto factor, el cual se puede presentar en a niveles diferentes de forma que para cada uno de ellos se realizan muestras independientes de tamaño n_i con i mostrando los distintos niveles del factor de interés. Aquí, N representa el total general de observaciones en todos los niveles, y_i Representa el total para i –ésimo nivel del factor y $y_{...}$ es el gran total.

Es útil describir las observaciones de un experimento en forma de un modelo matemático. Para el diseño unifactorial el modelo tiene la forma:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \text{ con } i = 1, \dots, a \text{ y } j = 1, \dots, n$$

Donde y_{ij} es la j – ésima observación del i – ésimo factor, μ es un parámetro común a todos los tratamientos al que se le llama medida global, τ_i es un parámetro único del tratamiento i -ésimo al que se le llama efecto del tratamiento i -ésimo, ϵ_{ij} : es un componente del error aleatorio.

La ecuación anterior se conoce por lo general como el modelo de los efectos. Igualmente, a este modelo se le considera, por su facilidad de solución, como un modelo estadístico lineal, es decir la variable de respuesta y_{ij} es una función lineal de los parámetros del modelo. El modelo de efectos en el cual se investiga la influencia de un único factor se denomina modelo de análisis de varianza simple o de una vía. Además, es un requisito indispensable que el experimento se lleve a cabo en orden aleatorio para que el ambiente en el se apliquen los tratamientos sea lo más uniforme posible, por lo tanto, el diseño experimental es un diseño completamente aleatorizado. El objetivo principal de este tipo de diseño, es probar la hipótesis apropiada acerca de las medidas de los tratamientos y realizar su estimación.

Figura 88. Análisis de varianza para un diseño unifactorial

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadros medios | Valor de F de Fisher | Valor p |
|---------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------------|---|---------|
| Tratamiento | a-1 | SS _{tratamiento} | $\frac{SS_{tratamiento}}{a-1}$ | $f = \frac{\frac{SS_{tratamiento}}{a-1}}{\frac{SS_{error}}{N-a}}$ | P(F≥f) |
| Error | N - a | SS _{error} | $\frac{SS_{error}}{N-a}$ | | |
| TOTAL | N - 1 | SS _{total} | | | |

Las formulaciones planteadas en la Figura 88 de análisis de varianza se presentan a continuación.

La suma total de cuadrados es:

$$SC_{total} = \sum_{ij} y_{ij}^2 - \left[\frac{y^2_{..}}{N} \right]$$

La suma de cuadrados de los tratamientos se define como:

$$SC_{tratamiento} = \sum_{ij} \frac{y^2_{.i}}{n_i} - \left[\frac{y^2_{..}}{N} \right]$$

La suma de cuadrados del error se evalúa mediante la diferencia de la suma total de cuadrados y la suma de cuadrados del tratamiento,

$$SC_{error} = SC_{total} - SC_{tratamiento}$$

Si una variación debido a los tratamientos es significativamente mayor que el error experimental aleatorio, entonces se requiere una prueba de hipótesis. Para la prueba de hipótesis se utiliza una región crítica de un lado en la cola de la derecha. La hipótesis nula H_0 se rechaza para una probabilidad de un error tipo I de la siguiente forma:

$$f > F_{[\alpha(a-1), (N-a)]}$$

Donde $F_{[\alpha(a-1),(N-a)]}$ es el valor crítico de la distribución para un nivel de significancia α .

Aquí la hipótesis nula planteada es $H_0: \mu_i = \mu_j$. Mediante esta prueba se busca determinar que tan significativo es la influencia de los niveles del factor sobre la variable respuesta.

4.4.3. Ajuste superficie de respuesta

Para la optimización del proceso se puede modelar la información suministrada mediante un polinomio que se ajuste en forma adecuada a los datos. El modelo polinomial que se ajusta requiere que los a niveles o tratamientos sean cuantitativos o numéricos y equidistantes, siendo su formulación:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 P_1(x) + \dots + \alpha_n P_n(x) + \varepsilon$$

Donde $P_i(x)$ es un polinomio ortogonal de i , orden, es decir, para un experimento con a niveles del factor X , para $i \neq j$

$$\sum_{i,j=1}^a P_i(x)P_j(x) = 0$$

Las sumas de cuadrados en un diseño unifactorial se determinan de la misma manera como se indicó en la parte inmediatamente anterior.

El siguiente paso es determinar la idoneidad del modelo mediante el coeficiente de determinación, calculado de la siguiente forma:

$$R^2 = \frac{SC_{\text{modelo}}}{SC_{\text{total}}} = 1 - \frac{SC_{\text{error}}}{SC_{\text{total}}}$$

Algunos autores consideran que un modelo es idóneo o que interpreta en forma adecuada el fenómeno estocástico que pretende modelar cuando $R^2 \geq 0.9$.

Para ilustrar el procedimiento de ajuste nos remitimos una vez más al ejemplo trabajado en la empresa Drummond Ltd en su departamento de mantenimiento. La tabla 14 muestra la información referente a los tiempos de duración de los mantenimientos preventivos en los equipos de la flota de D11R-CAT para tres tipos distintos de pautas de PM. Los cálculos respectivos para ajustar un polinomio de segundo orden a los datos consignados en el cuadro se presenta continuación.

$$SC_{\text{total}} = (485^2 + \dots + 517^2) - \left(\frac{30207^2}{60} \right) = 5376.85$$

$$SC_{\text{modelo}} = \left(\frac{9986^2 + 10034^2 + 10187^2}{3} \right) - \left(\frac{30207^2}{60} \right) = 1101.9$$

$$SC_{\text{error}} = 5376.85 - 1101.9 = 4274.95$$

Tabla 14. Información de los tiempos en los mantenimientos preventivos de los equipos.

| DRUMMOND LTD | | | | | |
|---|-----|-------------------------|--|--------------------|-----|
| DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO MOVIL | | | | | |
| CONTROL DE PROCESO | | | SERVICIO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LOS D11R-CAT | | |
| VARIABLE EVALUADA : TIEMPO | | | ESPECIFICACION ± 5 | | |
| INTERVALO DE MUESTREO CADA 8 horas | | | MAX: 525 Minutos | | |
| | | | MIN: 475 Minutos | | |
| TIEMPO REQUERIDO 500 minutos (8Hrs) | | | | | |
| TIPOS DE MANTENIMIENTO APLICADO | | | | | |
| TIPO A-C-E-G: 3 TECNICOS | | TIPO B-D-F : 5 TECNICOS | | TIPO H: 7 TECNICOS | |
| 485 | 498 | 509 | 505 | 512 | 509 |
| 489 | 500 | 498 | 504 | 511 | 505 |
| 490 | 501 | 510 | 502 | 504 | 509 |
| 495 | 495 | 480 | 509 | 501 | 505 |
| 499 | 498 | 485 | 509 | 503 | 500 |
| 500 | 495 | 490 | 503 | 515 | 500 |
| 502 | 501 | 499 | 510 | 509 | 501 |
| 510 | 505 | 518 | 495 | 518 | 502 |
| 500 | 507 | 490 | 500 | 521 | 524 |
| 520 | 496 | 498 | 520 | 521 | 517 |
| 9986 | | 10034 | | 10187 | |

| TIPO A-C-E-G 3 TECNICOS | TIPO B-D-F 5 TECNICOS | TIPO H 7 TECNICOS | Total |
|----------------------------|--------------------------|----------------------|-------|
| 9986 | 10034 | 10187 | 30207 |

A continuación se calculan las sumas de cuadrados para cada uno de los tratamientos teniendo en cuenta la asignación de coeficientes para contrastes ortogonales que se presenta en la tabla 15.

Tabla 15. Asignación de los coeficientes de los contrastes ortogonales⁶.

| Números de técnicos utilizados | Totales de los tiempos utilizados | Coeficiente de contraste ortogonales | |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| | | Lineal P ₁ | Lineal P ₂ |
| 3 | 9986 | -1 | 1 |
| 5 | 10034 | 0 | -2 |
| 7 | 10187 | 1 | 1 |
| λ | | 1 | 3 |

El cálculo de las sumas de cuadrados para cada uno de los grupos de trabajo está definida por:

$$\frac{\left[\sum_{i=1}^a y_i \cdot C_i \right]^2}{\sum_{i=1}^a n_i C_i^2}$$

Donde el numerador y el denominador de la expresión anterior representan respectivamente el cuadrado de los efectos y la combinación muestra para cada uno de los miembros del polinomio a ajustar. En ambas expresiones C_i representa el coeficiente ortogonal asociado al *i*-ésimo tratamiento.

⁶ Información obtenida de la tabla for statisticians, vol. 1, 3, ed., por E.S. Pearson y H.O., Hartley, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

Los efectos para las partes lineales y cuadráticas del polinomio son, respectivamente,

$$\sum_{i=1}^3 y_i \cdot c_i = 9986(-1) + 10034(0) + 10187(1) = 201$$

$$\sum_{i=1}^3 y_i \cdot c_i^2 = 9986(-1) + 10034(-2) + 10187(1) = 105$$

La combinación muestra para las partes lineales y cuadráticas del polinomio es respectivamente:

$$n \sum_{i=1}^a c_i^2 = 20(-1^2) + 20(0) + 20(1^2) = 40$$

$$n \sum_{i=1}^a c_i^2 = 20(-1^2) + 20(-2^2) + 20(1^2) = 40$$

Teniendo en cuenta los cálculos realizados, las sumas de cuadrados para la parte lineal y cuadrática del polinomio son iguales a 1010.025 y 91.875, respectivamente. La tabla completa de análisis de varianza para el caso bajo estudio se presenta seguidamente en la tabla 16.

Tabla 16. Análisis de varianza para el modelo polinomial.

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Valor de F de Fisher | Valor P |
|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|---------|
| Tiempo | 2 | 1101.90 | 550.95 | 7.35 | 0.00150 |
| Lineal | 1 | 1010.02 | 1.010.025 | 137.41 | 0.00000 |
| Cuadrático | 1 | 91.875 | 91.875 | 12.5 | 0.00081 |
| Error | 57 | 4274.95 | 749.991 | | |
| Total | 59 | 5376.85 | | | |

Los primeros tres polinomios ortogonales evaluados en el ajuste de superficie de respuesta son:

$$P_0(x) = 1$$

$$P_1(x) = \lambda_1 \left[\frac{(x - \bar{x})}{d} \right]$$

$$P_2(x) = \lambda_2 \left[\left(\frac{x - \bar{x}}{d} \right)^2 - \left(\frac{a^2 - 1}{12} \right) \right]$$

Donde, d es la distancia entre los niveles de X ,

a es el número de niveles del experimento.

λ_i son constantes que aseguren que los polinomios toman valores enteros.

Las estimaciones para los parámetros α_i del modelo de polinomios ortogonales se determinan mediante la fórmula:

$$\hat{\alpha}_i = \frac{\sum_{i=0}^{a-1} y P_i(x)}{\sum_{i=0}^{a-1} [P_i(x)]^2}$$

Para el caso de los mantenimientos preventivos a los D11R, el cómputo de los estimadores de los coeficientes polinomiales arroja los siguientes resultados:

$$\hat{\alpha}_0 = 503.45 \quad \hat{\alpha}_1 = 5.025 \quad \hat{\alpha}_2 = 0.875$$

Teniendo en cuenta que para el caso objeto de estudio se tiene que $a = 3$, la distancia entre los niveles $d = 2$ y $\bar{x} = 5$, el ajuste del modelo polinomial toma finalmente la forma:

$$\hat{y} = 505.444 - 4.05x + 0.65625x^2$$

Ecuación que en primera instancia permite estimar el valor del tiempo de los mantenimientos para cantidades de técnicos utilizados. La utilidad de esta predicción se despeja en el momento que se evalúa el coeficiente de determinación:

$$R^2 = \frac{1101.9}{5376.85} = 1 - \frac{4274.95}{5376.85} = 0.2049$$

Lo que evidentemente indica que el modelo ajustado no es recomendable para predecir el tiempo de los mantenimientos si se toma como variable independiente el número de técnicos para el mantenimiento. En esta instancia, dados los resultados del ajuste, debemos explorar otros tipos de modelos y encontrar el que mejor se ajuste al fenómeno que se estudia.

4.5. ETAPA DE ANÁLISIS DEL PROYECTO

Es la etapa más importante de la filosofía Seis Sigma, ya que se deben aplicar todas las herramientas estadísticas que se ajusten a la información suministrada por el proceso. Una selección adecuada del método estadístico permitirá sin lugar a dudas obtener mejores beneficios y con ellos acceder a un análisis muy cercano a la realidad.

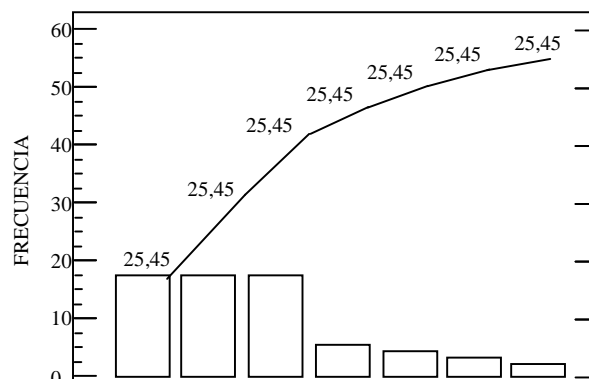
Entre los métodos de análisis, se encuentran desde los más sencillos como el Diagrama de Pareto, Diagrama de Causa y efecto como paso previo al análisis inicial. También se encuentran herramientas igualmente validas como son: el Diagrama de Dispersión, el Modelo Lineal con su coeficiente de correlación y determinación.

Existen herramientas especializadas que necesariamente el responsable en la organización de implementar el método **SS** debe conocer o en su defecto contratar el personal experto. Este es el caso de herramientas estadísticas tales como el Control Estadístico de Proceso y el Diseño Experimental.

4.5.1. Diagrama de Pareto

También conocido como Análisis de Pareto. Su objetivo principal es separar los problemas de calidad en pocos defectos vitales, que generan el ochenta por ciento (80%) de los problemas de calidad (variabilidad no natural), y los muchos defectos triviales. Los anteriores porcentajes son utilizados tradicionalmente, pero carecen de una rigurosidad estadística. Para la elaboración de este diagrama es necesario realizar el siguiente procedimiento:

Figura 89. Diagrama de pareto.



- Identificar el problema de calidad.
- Estratificar los datos.
- Metodología y tiempo de recolección de los datos.
- Diseñar una tabla de registro de los tipos de defectos existentes (ítems) en el problema de calidad con sus respectivos totales, los totales acumulados, la composición porcentual y el porcentaje acumulado.
- Organizar estos datos de acuerdo a la cantidad.
- Dibujar dos ejes verticales y un eje horizontal. En el eje horizontal coloque tantos intervalos como ítems existan.
- Construir para cada intervalo una barra y dibuje la curva acumulada.

Es importante recalcar que el Diagrama de Pareto se construye basado en la variable o problema de calidad; estos pueden ser clasificados como: Calidad del Proceso como los defectos, reparaciones. El Costo, en este caso la magnitud de la pérdida. La Entrega: inventarios, demoras y por último la Seguridad: accidentes e interrupciones.

4.5.2. Diagrama de causa y Efecto

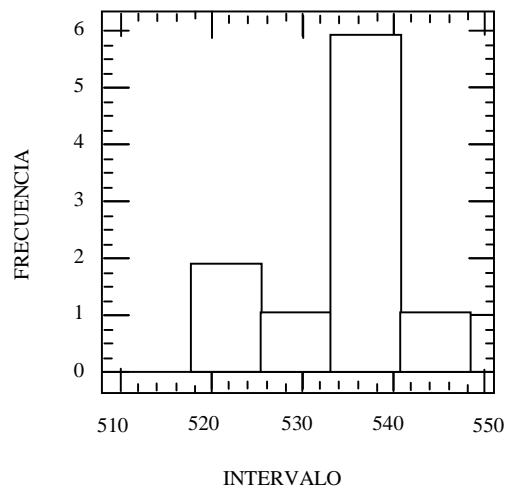
También llamado diagrama de espina de pescado, consiste en determinar todos los factores que influyen en el resultado de un proceso. A continuación se describen los pasos para la construcción del diagrama de Causa y Efecto o también llamado Espina de Pescado:

- Determinar el problema de calidad.
- Encerrar la característica de calidad en un cuadro y escríbalo al lado derecho prolongando una línea horizontal a la izquierda de dicho cuadro.
- Escribir las causas primarias y secundarias que afectan dicho problema de calidad conectándolas en la línea horizontal.

4.5.3. Prueba de Normalidad

Es indispensable conocer que cuando se aplica una herramienta estadística en donde se involucran variables continuas o cuantitativas es fundamental determinar si la información obtenida en el proceso, tiene un comportamiento mediante una distribución normal. Para ello la estadística posee algunas pruebas, entre ellas encontramos la prueba de Ji-cuadrado⁷, Kolmogorov-Smirnov Lilliefors, Shapiro y Wilks o la prueba de Anderson Darling; pero una manera muy sencilla de realizar la prueba de normalidad es construyendo un Histograma de Frecuencia, figura 90.

Figura 90. Histograma de frecuencia



4.5.4. Prueba de Normalidad mediante el método de Kolmogorov Smirnov Lilliefors

La prueba de kolmogorov Smirnov Lilliefors KSL es aplicada únicamente a variables continuas y calcula la distancia máxima entre la función de distribución empírica de la muestra seleccionada y la teórica, en este caso la normal.

⁷ En esta prueba toma el valor de la ji-cuadrada $\chi^2 = \sum \frac{(O-e)^2}{e}$ es la observación esperada. Este valor de chi-cuadrado se compara con el punto crítico $\chi^2_{(1-\alpha)(k-1)}$, con k-1 grados de libertad.

Sea una muestra X_1, \dots, X_n la muestra ordenada de la siguiente forma $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \dots \leq x_n$. La función de distribución empírica de esta muestra es de la forma:

$$F_n(x) = \begin{cases} 0 & x < x_1 \\ k/N & x_k \leq x \leq x_{k+1} \\ 1 & x \geq x_n \end{cases}$$

De tal manera que para que contrastar la hipótesis de que el modelo generado de los datos es $F(x)$ se calcula el estadístico $D_n = \text{máx. } |F_n(x) - F(X)|$ cuya distribución, cuando $F(x)$ es cierta se ha tabulado. Si la distancia calculada D_n es mayor que la encontrada en las tablas $D(\alpha, n)$, fijando un nivel de significancia α , rechazaremos el modelo $F(x)$ es decir $D_n \geq D(\alpha, n)$. Considerando el caso de los tiempos de duración en los mantenimientos preventivos de los equipos D11R de la empresa Drummond Ltd, se toma la información al final del proceso y estos son los resultados:

Tabla 17. Información de los tiempos en minutos de duración del mantenimiento con un grupo de 5 técnicos

| Tiempo del mantenimiento con un grupo de 5 Técnicos | |
|--|-----|
| | 485 |
| | 489 |
| | 490 |
| | 495 |
| | 499 |
| | 500 |
| | 512 |
| | 510 |
| | 508 |

Tabla 18. Construcción de la prueba de Kolmogorov Smirnov Llliefors KSL.

| K | x | F _n (X) | F(X) | F _n (X _{n-1})-F(X _n) | F _n (X _n)-F(X _n) | D _n (X) |
|---|-----|--------------------|---------|---|---|--------------------|
| 1 | 485 | 0.111 | 0.08099 | 0.08099 | 0.030107 | |
| 2 | 489 | 0.222 | 0.16130 | 0.030118 | 0.060895 | |
| 3 | 490 | 0.333 | 0.18759 | 0.03462 | 0.145732 | |
| 4 | 495 | 0.444 | 0.35377 | 0.02044 | 0.090665 | |
| 5 | 499 | 0.555 | 0.50964 | 0.06520 | 0.045910 | |
| 6 | 500 | 0.666 | 0.55428 | 0.00126 | 0.112376 | |
| 7 | 508 | 0.777 | 0.83024 | 0.16357 | 0.052468 | 0.1635 |
| 8 | 510 | 0.888 | 0.87693 | 0.09915 | 0.011954 | |
| 9 | 512 | 1.000 | 0.91378 | 0.02489 | 0.086212 | |

La información de la muestra se estima el promedio $E(\bar{x}) = \mu = 498.666$ y la desviación estándar $E(s) = \sigma = 9.7724$.

Se calcula posteriormente la función acumulada de la información asumiendo la normalidad de los datos,

$$F(x) = p(Z \leq z) = p \left[Z \leq \frac{x_i - 498.666}{9.7724} \right]$$

Para cada uno de los valores x_i de la muestra.

Ejemplo de ello, cuando se toma el valor de $x = 485$, el cálculo de la normal estandarizada resulta de la siguiente manera:

$$F(248) = p(Z \leq z) = p\left(Z \leq \frac{485 - 498.666}{9.7724}\right) = p(Z \leq -1.398) = 0.0809$$

Este procedimiento se realiza para cada uno de los valores obtenidos en la muestra seleccionada. Una vez calculado todos los valores se calcula las diferencias y se obtiene finalmente el valor máximo de D_n es 0.16357963.

Para obtener la diferencia $|F_n(x_{h-1}) - F(x_h)|$, por ejemplo tomando el primer valor $x = 485$ donde $F(x_k) = 0.0809$; un valor anterior de $F_n(x_{k-1}) = 0$, por lo tanto la diferencia resultante es $|0 - 0.0809| = 0.0809$. En el caso de la diferencia $|F_n(x_h) - F(x_h)|$ los valores se realizan de la siguiente manera: $|0.111 - 0.0809| = 0.0301$.

En la tabla del anexo 1, se obtienen para $n = 9$ (ver tabla anexo 1), $D(0.05, 9) = 0.271$ por lo que se acepta que la muestra se distribuye normalmente.

Escoger la herramienta estadística más adecuada en esta etapa, redundará en un análisis más profundo de la realidad. Existen muchas técnicas estadísticas que permiten efectuar una interpretación adecuada de la situación del proceso, tal es el caso de los Diagramas de Pareto, Causa Efecto, Diagramas de Dispersión y los Modelos lineales y el Diseño Experimental.

4.6. ETAPA DE CONTROL DEL PROCESO

Esta etapa permite verificar la efectividad y la eficacia de los diversos cambios que sufre el proceso a través de las diversas etapas de mejora. Es indispensable entonces definir unos indicadores que nos muestren el nivel de desempeño de la organización. Las ciencias estadísticas permiten utilizar un sin número de

aplicaciones para conocer el estado bajo los eventos que ofrece la información recolectada en la organización.

Entre los métodos o procedimientos aplicados para realizar el control a un proceso se encuentran herramientas tales como los Gráficos de Control Univariada por variables y Capacidad del proceso las anteriores herramientas son aplicadas cuando las variables son cualitativas, Gráficas de Control Multivariadas y el Diseño de Experimentos.

4.6.1. Gráficos de control univariados

Es un diagrama que presenta el comportamiento y a su vez se realiza el seguimiento de una característica de calidad en el tiempo. Detectando la existencia o no de inestabilidad del proceso, si ello ocurre se conoce como causa asignable (en estadística involucrada la variabilidad ajena a la información del proceso). La característica de calidad evaluada mediante el estadístico de las muestras o subgrupos que se toman del proceso.

Entre los estadísticos más utilizado tenemos el promedio \bar{x} , el rango R, la varianza s^2 , la proporción \hat{p} , el número de no conformidades en el subgrupo u . los tres primeros son aplicados en las Gráficas de Control por Variable y las dos últimas por las gráficas de control por atributos. El supuesto de normalidad e independencia se deben cumplir para la elaboración de estas gráficas de control.

4.6.2. Fundamentos teóricos de los gráficos de control univariados por variables

Esta gráfica es propuesta por Walter Shewhart (1924) es una de las herramientas más utilizadas en el control de calidad, permite monitorear y controlar el promedio de un proceso es conocido como gráfico \bar{x} , es una carta que se aplica para

controlar y mejorar la calidad media a través del valor promedio \bar{x} , calculando en cada subgrupo o muestra, es presentada simultáneamente con el gráfico R que permite controlar y mejorar la dispersión o variabilidad. Pero como la variación es inherente en cada subgrupo los promedios y los rangos varían en cada subgrupo permitiendo así dos tipos de errores:

Error tipo I: Ocurre cuando al tomar una muestra conduzca a tomar una acción, cuando en realidad no ha habido cambio alguno en el proceso.

Error tipo II: Sucede cuando al tomar una muestra la gráfica muestre un proceso bajo control cuando en realidad haya ocurrido un cambio en el proceso.

Para que un proceso de producción sea estable, ambas estadísticas, tanto el promedio como la dispersión deben estar en estado de control. Por tal motivo, para efectos prácticos, las cartas \bar{x} y R se dibujan en la misma hoja de papel. Esta etapa del proceso se conoce como FASE I.

La siguiente es la secuencia de actividades generales que se sigue en la elaboración de cartas de control \bar{x} y R:

- Establecimiento de objetos.
- Selección de variables a controlar: la variable o variables a controlar deben ser magnitudes susceptibles de medirse.
- Elección del criterio de formación de subgrupos.
- Elección de tamaño y frecuencia de los subgrupos.
- Determinación del método de medición.
- Obtención de las mediciones y registro de ellos.
- Cálculo de la media, \bar{x} de cada subgrupo.

- Cálculo de la amplitud R, de cada subgrupo: la amplitud de cada subgrupo se calcula restando el valor de la medición más baja de la más alta.
- Cálculo del rango promedio \bar{R} .
- Determinación de límites de control.

Los límites de control de la carta R se calculan de la siguiente manera:

$$lsc_R = D_4 \bar{R} \text{ y } lci_R = D_3 \bar{R}$$

Donde:

D_3 y D_4 son factores que dependen del tamaño de la muestra. Para la carta \bar{X} , los límites de control se expresa de la siguiente manera,

$$lcs_{\bar{X}} = \bar{x} + A_2 \bar{R} \text{ y } lci_{\bar{X}} = \bar{x} - A_2 \bar{R}$$

Donde A_2 es un factor que dependa del tamaño del subgrupo, está definida como:

$$A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}}$$

La metodología en la elaboración de cartas de control \bar{x} y s es similar que la establecida en las gráficas \bar{x} y R, calculando el valor de la desviación estándar de cada uno de los subgrupos y las formulaciones utilizadas para determinar los límites de control iniciales o FASE I son los siguientes, para los límites de control de s^8 se calcula $lcs = B_4 \bar{S}$ y $lci = B_3 \bar{S}$ donde B_3 y B_4 son factores que dependen del tamaño de la muestra.

⁸ Este tipo de gráfica de control S es tomada como medida de variabilidad. Es utilizada cuando el tamaño del subgrupo es variable. Por lo que el estadístico S, resulta mejor estimador para la desviación de la población σ .

Para la carta \bar{x} , los límites de control utilizados son evaluados mediante,

$$lcs = \bar{x} + \frac{3\bar{s}}{C_4\sqrt{n}} = \bar{x} + A_3\bar{s} \quad \text{Y} \quad lci = \bar{x} - \frac{3\bar{s}}{C_4\sqrt{n}} = \bar{x} - A_3\bar{s}$$

Donde A, es un factor que depende del tamaño de la muestra. Estos límites son obtenidos al estimar el valor σ mediante la desviación estándar evaluada en cada uno de los subgrupos. Sea $E(s) = C_4 \sigma$ siendo,

$$C_4 = \sqrt{\frac{2}{n-1}} \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}$$

Entonces la estimación de la desviación es,

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{s}}{C_4}$$

Donde \bar{s} es la desviación estándar para cada uno de los g subgrupos.

Algunas veces existen dificultades en la agrupación de la información debido a las condiciones naturales del proceso, por lo que se hace necesario aplicar cartas de control de una sola replica $n = 1$, los límites se obtiene de la siguiente forma,

$$lci = \bar{x} + 3\frac{\bar{R}_m}{d_2},$$

$$lc = \bar{x}$$

$$lci = \bar{x} - 3 \frac{\overline{R}_m}{d_2}$$

\overline{R}_m Es conocido como el rango móvil. El valor de d_2 depende del tamaño del agrupamiento que se realice en la información suministrada por el proceso. Los límites de control para el rango móvil son los siguientes:

$$lcs = D_4 \overline{R}_m, lc = \overline{R}_m, lcs = D_3 \overline{R}_m$$

Es importante recalcar que la prueba de normalidad es fundamental en este tipo de cartas de control, ya que en este caso no se tiene el efecto del Teorema del Limite Central, diferencia que se tiene cuando se calcula la media muestral a partir de un subgrupo.

Cuando el supuesto de normalidad, no se cumple se hace necesario transformar la información, de tal manera que cumplan los criterios de normalidad que exigen pruebas conocidas como Kolmogorov Smirnov o la prueba de Anderson Darling.

Cuando el tamaño del subgrupo es variable es conveniente utilizar las cartas \bar{x} y s , en donde n_i es el número de observaciones encontradas en el i -ésimo subgrupo, entonces los estadísticos o líneas centrales se calculan de la siguiente manera,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^g n_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^g n_i} \quad \bar{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^g (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^g (n_i - g)}}$$

Las constantes A_3 , B_3 y B_4 dependen del tamaño del subgrupo seleccionado.

4.6.3. Recalculo de los límites de control

Una vez obtenido los límites de control inicial o históricos, (se recomienda obtener la información durante los seis primeros meses) para posteriormente identificar los límites naturales o estándar del proceso, estos valores naturales se obtienen una vez identificado los puntos por fuera de los límites de control o si existen tendencias en el proceso.

Por supuesto, si la información histórica no presenta estas dos condiciones de fuera de control los límites iniciales o históricos serán considerados como límites naturales o estándar para el proceso.

Cuando se esta evaluando, si un proceso se encuentra fuera de control, la primera grafica que se debe analizar con mucho cuidado es la grafica de la medida de variabilidad en este caso la grafica R, que permite observar si existe homogeneidad en la variabilidad del proceso. Cuando en el proceso llegara a suceder lo contrario (alta variabilidad en la información) no se puede realizar un buen análisis en la carta de rangos y por su puesto en la carta de localización, grafica \bar{x} , si no se estabiliza la variabilidad (observe que los limites de control de la grafica de localización depende de la variabilidad en el proceso que en el ejemplo lo representa el rango o recorrido) el análisis que se realice del mismo esta totalmente alejado de la realidad.

Cuando existen puntos fuera de control se debe recalculer la media y el rango utilizando la siguiente fórmula, para recalculer el promedio,

$$\bar{x} = \frac{\sum \bar{x} - \bar{x}_d}{g - g_d} \quad \text{Y para recalculer el rango} \quad \bar{R} = \frac{\sum R - R_d}{g - g_d}$$

Donde los promedios, los rangos y la cantidad de subgrupos descartados son en su respectivo orden \bar{x}_d , R_d y g_d .

4.6.4. Estimación de la desviación estándar de la población

La teoría estadística proporciona una relación entre el promedio y la desviación estándar muestral (este promedio es el resultado de la sumatoria de las desviaciones estándar para cada subgrupo entre el número de subgrupos recogido en cada muestra) y la desviación estándar poblacional σ . Relación que está dada por la constante c_4 . Por ejemplo, el valor de c_4 para una muestra de cinco es de 0.94. Posteriormente se obtiene el promedio de la desviación estándar de los grupos en estudios. La estimación de la desviación poblacional mediante:

$$\sigma = \frac{s}{c_4}$$

También suministrada el valor esperado de la relación existente entre el recorrido R (calculado sumando los rangos obtenidos en todos los subgrupos entre el número de ellos) y la desviación estándar poblacional mediante el parámetro d_2 . La estimación de la desviación se estima,

$$\sigma = \frac{R}{d_2}$$

4.6.5. La FASE II o determinación de los límites de Control Estándar

Una vez establecido, mediante las cartas, que el proceso se encuentra bajo control estadístico (es el fundamento de los límites de control inicial, FASE I), el siguiente paso es calcular los límites de control estándar del proceso.

Para la medida de localización o promedio la formulación es la siguiente, el límite de control superior es $lcs = \mu + A\sigma$ donde:

$$\mu = \bar{x}$$

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Son los parámetros del proceso, promedio y desviación estándar; el límite central $lc = \mu$ y el límite de control inferior $lci = -A\sigma$. Para la medida de variabilidad tenemos para el límite superior estándar de control $lcs = D_2\sigma$, el límite central estándar $lc = R$ y el límite inferior estándar de control $lci = D_1\sigma$.

Los límites estándar de control estándar para las gráficas \bar{x} y s son para las medidas de localización $\bar{x}lcs = \mu + A\sigma$, los parámetros se estiman mediante,

$$\mu = \bar{x}$$

$$\sigma = \frac{\bar{s}}{c_4}$$

Son los parámetros del proceso, promedio y desviación estándar; el límite central $lc = \mu$ y el límite de control inferior $lci = \mu - A\sigma$. de otra parte la medida de variabilidad es calculada mediante la siguiente formulación $lcs = B_6\sigma$, $lc = c_4\sigma = S$ y $lci = B_5\sigma$.

En el siguiente ejemplo se observan como se elaboran los límites de control iniciales o FASE I para la media, el rango y la desviación estándar del tiempo de los mantenimientos preventivos de los equipos D11R.

Tabla 19. Observaciones de lo tiempos del mantenimiento D11R.

| Subgrupo | Observaciones Del sub. grupo N = 2 | | — X | — R | s |
|----------|--|----------------|--------|--------|------|
| | X ₁ | X ₂ | | | |
| 1 | 538 | 542 | 540 | 4 | 2.82 |
| 2 | 525 | 537 | 531 | 12 | 8.48 |
| 3 | 538 | 536 | 537 | 2 | 1.41 |
| 4 | 541 | 542 | 541.5 | 1 | 0.70 |
| 5 | 532 | 540 | 536 | 8 | 5.65 |
| 6 | 541 | 549 | 545 | 8 | 5.65 |
| 7 | 537 | 535 | 536 | 2 | 1.41 |
| 8 | 521 | 523 | 522 | 2 | 1.41 |
| 9 | 542 | 540 | 541 | 2 | 1.41 |
| 10 | 543 | 539 | 541 | 4 | 2.82 |
| 11 | 547 | 547 | 547 | 0 | 0 |
| 12 | 540 | 536 | 538 | 4 | 2.82 |
| 13 | 539 | 534 | 536.5 | 5 | 3.53 |
| 14 | 525 | 530 | 527.5 | 5 | 3.53 |
| 15 | 542 | 538 | 540 | 4 | 2.82 |

Determinación de límites de control, los límites de control de la carta R se calculan de la siguiente forma,

$$Lcs = D_4 \bar{R} \quad y \quad lci_R = D_3 \bar{R}$$

Son factores que dependen del tamaño de la muestra. Para la carta \bar{x} los límites de control se formulan de la siguiente manera:

$$lcs_{\bar{x}} = \bar{x} + A_2 \bar{R} \quad y \quad lci_{\bar{x}} = -A_2 \bar{R}$$

A_2 es un factor que depende del tamaño de la muestra.

4.6.6. Longitud Promedio de Corrida ARL

La longitud de Corrida RL (Run Length) está definida como el número de subgrupos graficado en la carta hasta que aparezca una señal fuera de control. Este valor de RL se comporta como una variable aleatoria, ya que al realizar el experimento en las mismas condiciones no se puede garantizar que el valor RL es el mismo. Este motivo justifica calcular un valor esperado de la longitud de Corrida, conocido como ARL o Longitud de Corrida Promedio.

El valor ARL es utilizado para determinar de manera aproximada la eficiencia de las cartas de control, por ejemplo cuando se toma una carta de control \bar{x} con n observaciones en cada subgrupo y los valores de \bar{x}_i se distribuyen normalmente independientes, el cálculo de que un subgrupo se encuentre fuera de control es,

$$p = p(\bar{X}_i \leq lci) + p(\bar{X}_i \geq lcs) = p\left(Z \leq \frac{lci - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}\right) + p\left(Z \geq \frac{lcs - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}\right)$$

Sea Y el número de subgrupos graficado en la carta hasta obtener un estado fuera de control, se verifica que esta variable Y sigue una distribución geométrica con parámetro p , de tal manera que $p = (Y = x) = p(1 - p)^{x-1}$ $x = 1, 2, 3, \dots$

El valor esperado de una distribución geométrica está definida como:

$$E(Y) = \frac{1}{p}$$

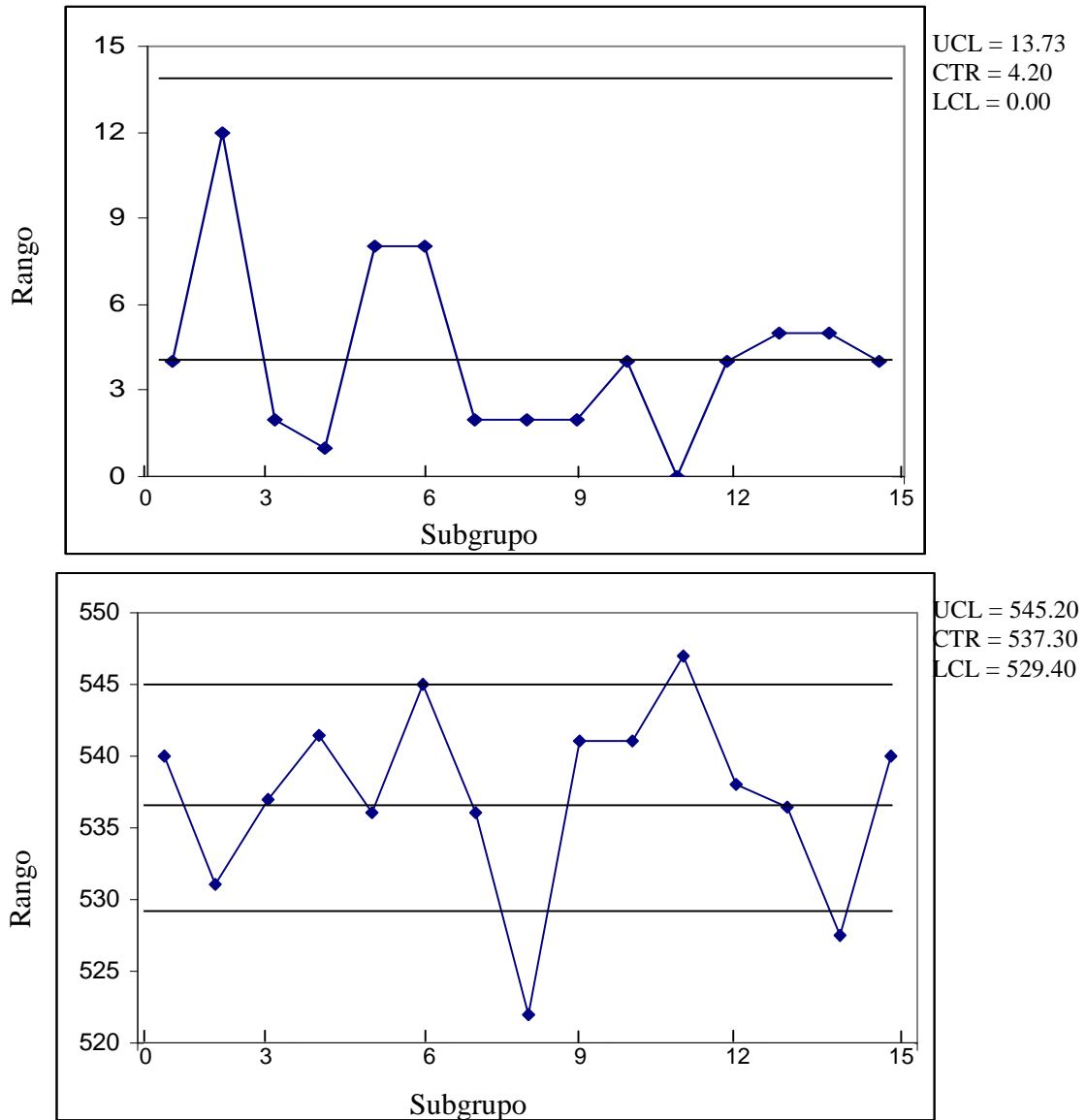
Y su varianza,

$$V ar(Y) = \frac{(1 - p)}{p^2}$$

Por lo tanto la Longitud Promedio de Corrida ARL está definida como:

$$ARL = E(Y) = \frac{1}{p}$$

Figura 91. Gráficos de control para la media, el rango de los tiempos del mantenimiento preventivo en los D11R-CAT



4.6.7. Estados fuera de control

Existen diversos comportamientos que nos indican un estado fuera de control. Entre estos comportamientos se encuentra:

- **El tipo mezcla:** En donde se sospecha de que el proceso existen dos o más poblaciones cuyo comportamiento es totalmente diferente uno de otro. Entre las causas que generan este tipo de comportamiento tenemos materia prima, operario y equipo.
- **La tendencia:** Es otro tipo de comportamiento que se presenta por una secuencia continua en forma ascendente o descendente del comportamiento de los subgrupos del proceso y es debido a desajuste de una pieza y descuido del operario.

El comportamiento **Tipo Cambio de Nivel** es la repentina modificación de las condiciones del proceso y es causada por la materia prima, operarios con diferentes procedimientos o el ajuste en el centramiento del proceso.

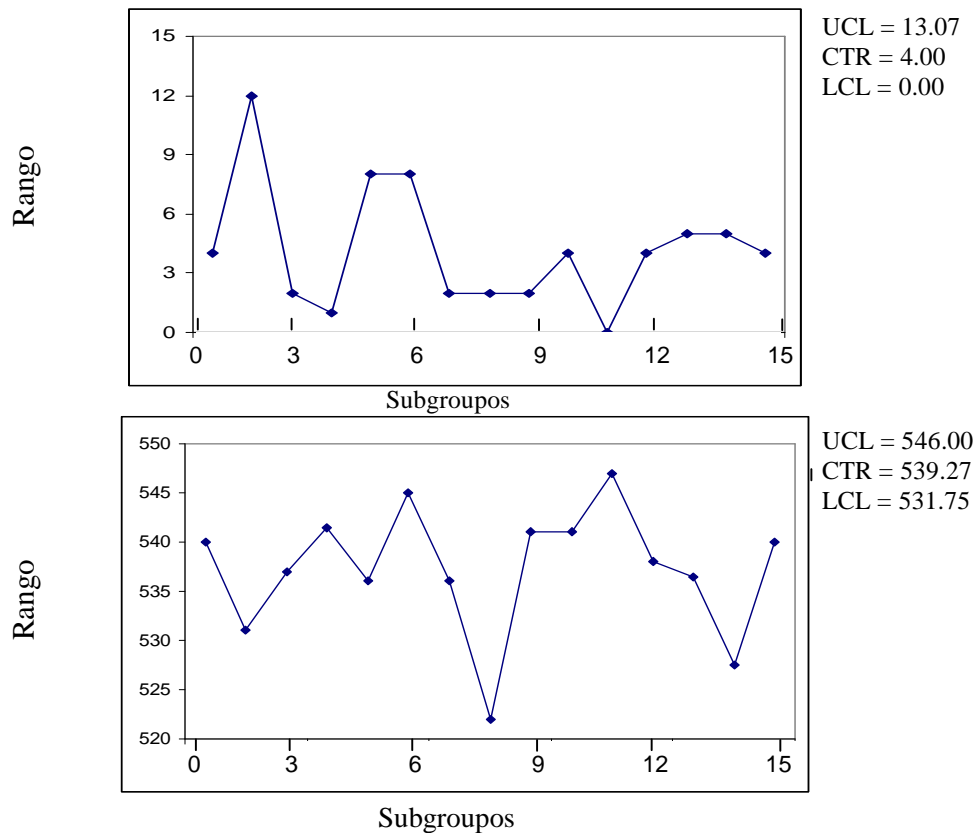
El Ciclo es el comportamiento que se debe a la rotación de factores del proceso tales como Equipo, Operario o Materia prima.

Existe otro tipo de metodología para detectar estados fuera de control como lo es, calculando la probabilidad de los límites de advertencia, para una desviación en donde la probabilidad que se encuentre dentro de control es $p(\mu - 1.0\sigma \leq x \leq \mu + 1.0\sigma) = 0.680$, para límites de advertencia a dos desviaciones la probabilidad dentro de control se mide como $p(\mu - 2.0\sigma \leq x \leq \mu + 2.0\sigma) = 0.950$ y finalmente a tres desviaciones de la media probabilidad de que un subgrupo cualesquiera este dentro del control es

$p(\mu - 3.0\sigma \leq x \leq \mu + 3.0\sigma) = 0.9973$ que implica que cada 10000 subgrupos, sólo 27 se encontrarán de manera natural fuera de los límites de control, y el proceso se considerará estadísticamente bajo control.

Es indispensable determinar los límites de control estándar del proceso una vez detectada las causas de un comportamiento no aleatorio en el proceso. En el caso de los tiempos de los mantenimientos de los equipos los límites de control una vez detectados los subgrupos fuera de control, debido a causas asignables se presenta en la figura 92.

Figura 92. Límites de control una vez detectados los subgrupos con causas asignables en su comportamiento. Proceso bajo control estadístico



Después de someter a control estadístico los tiempos de los mantenimientos preventivos para los D11R-CAT, el paso a seguir es evaluar los parámetros del proceso. El promedio μ y la desviación estándar σ ; que permite obtener los Límites Estándar de Control y la Capacidad del Proceso. Los cálculos establecidos indican que el promedio del proceso es $\mu = 539.273$ y la desviación resulta de:

$$\sigma = \frac{4.0}{1.128} = 3.546$$

Estos últimos cálculos, tanto de la media como la desviación estándar es el fundamento de la FASE I.

Con los parámetros del proceso evaluado el siguiente paso es obtener los límites estándar de control que se determinan de la siguiente forma:

Para el promedio:

$$lcs = 539.273 + (2.121)3.546 = 546.794, lc = 539.273$$

$$lci = 539.273 - (2.121)3.546 = 53.751$$

El rango se evaluará con las siguientes formulaciones:

$$lcs = (3.686)(3.546) = 13.070, lc = 4.0 \quad \text{Y} \quad lci = (0)(3.546) = 0$$

En el caso de la desviación se toman las siguientes formulaciones:

$$lcs = (2.606)(3.546) = 9.2408, lc = 2.83 \quad \text{Y} \quad lci = (0)(3.546) = 0$$

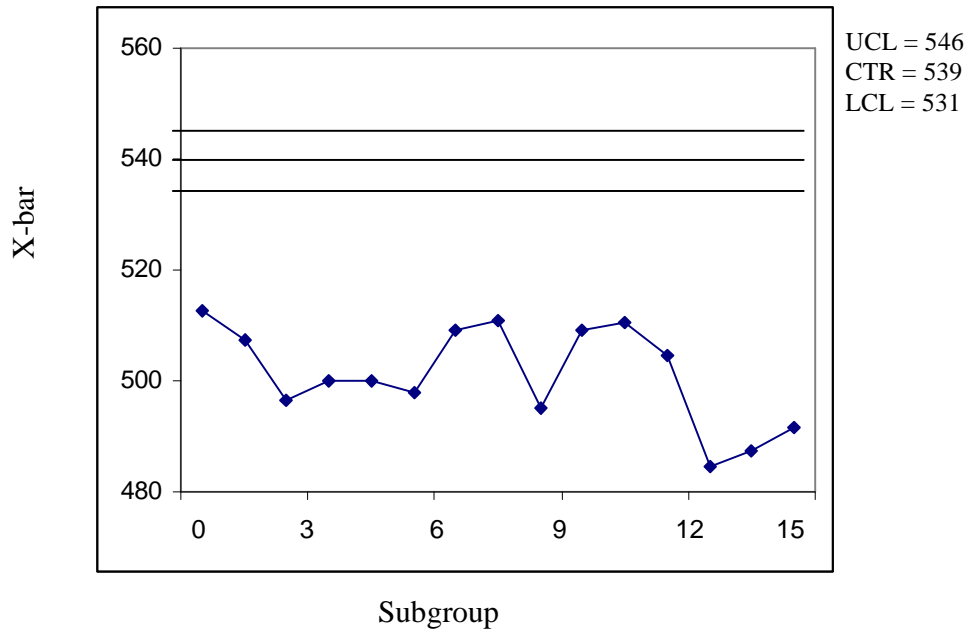
Una vez obtenido los límites estándar de control, el siguiente paso es realizar el control del proceso que es conocido como FASE II, que muchos pasan por alto

cuando utilizan estas técnicas estadísticas, consiste en tomar nueva información o subgrupos en el proceso; calcular sus estadísticos tales como el promedio, rango y la desviación estándar y llevarlos a la gráficas de control con los límites estándar calculados anteriormente. En el problema que estamos analizando se muestra la aplicación de este procedimiento.

Tabla 20. Observaciones obtenidas para realizar control tomando como referencia los límites estándar del proceso.

| Numero de Subgrupo | Observaciones Del sub. grupo | | \bar{X} | \bar{R} | s |
|--------------------|------------------------------|-------|-----------|-----------|---------|
| | X_1 | X_2 | | | |
| 1 | 525 | 500 | 512.5 | 25 | 17.67 |
| 2 | 515 | 500 | 507.5 | 15 | 10.606 |
| 3 | 496 | 497 | 496.5 | 1 | 0.7071 |
| 4 | 500 | 500 | 500 | 0 | 0 |
| 5 | 499 | 501 | 500 | 2 | 14.142 |
| 6 | 496 | 500 | 498 | 4 | 28.284 |
| 7 | 518 | 500 | 509 | 18 | 172.279 |
| 8 | 512 | 510 | 511 | 2 | 14.142 |
| 9 | 490 | 500 | 495 | 10 | 7.071 |
| 10 | 500 | 518 | 509 | 18 | 127.279 |
| 11 | 501 | 520 | 510.5 | 19 | 134.350 |
| 12 | 509 | 500 | 504.5 | 9 | 63.639 |
| 13 | 479 | 490 | 484.5 | 11 | 77.781 |
| 14 | 480 | 495 | 487.5 | 15 | 106.066 |
| 15 | 485 | 498 | 491.5 | 13 | 91.923 |

Figura 93. Gráfico del control del promedio.



La carta muestra un proceso fuera de control en cuanto a su promedio indicando que el proceso se está comportando de manera distinta a la información que permitió calcular los límites de estándar, esto ocurre también en menor grado en la gráfica de rangos y desviación estándar.

En este tipo de comportamiento no es difícil concluir que el proceso se encuentra fuera de control y se deben tomar las acciones correctivas, que induzcan a encontrar causas de dicha variación.

Figura 94. Gráfico de control del rango

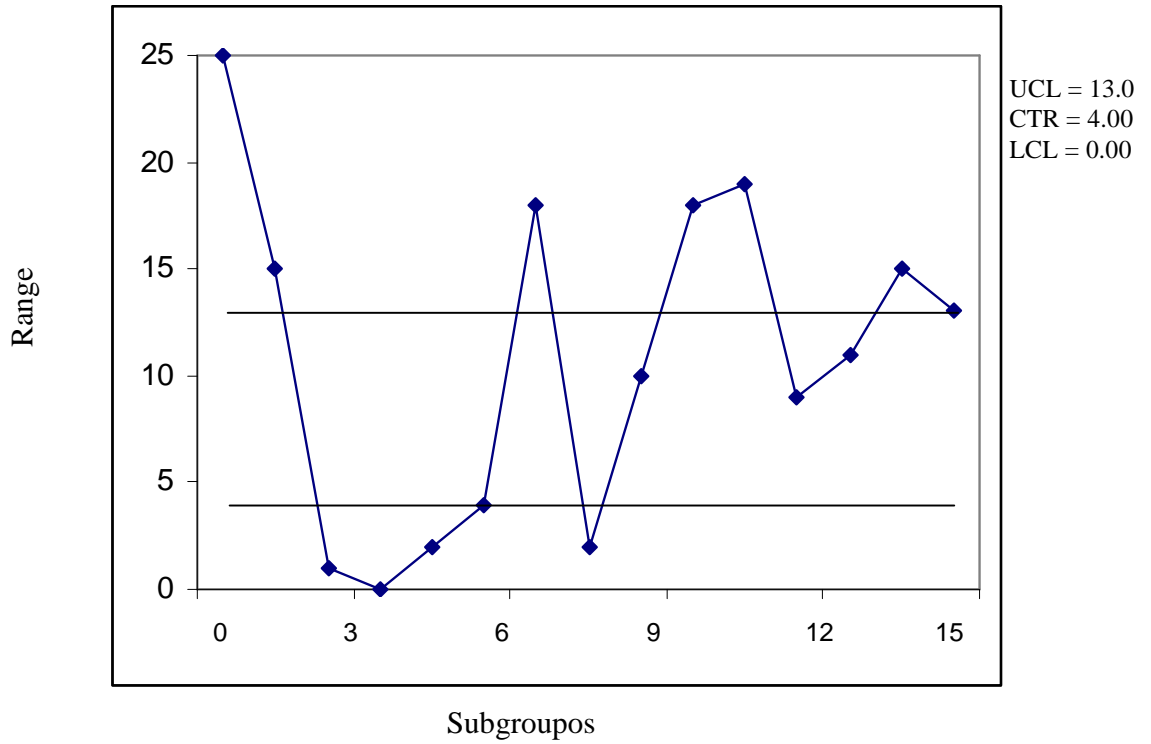
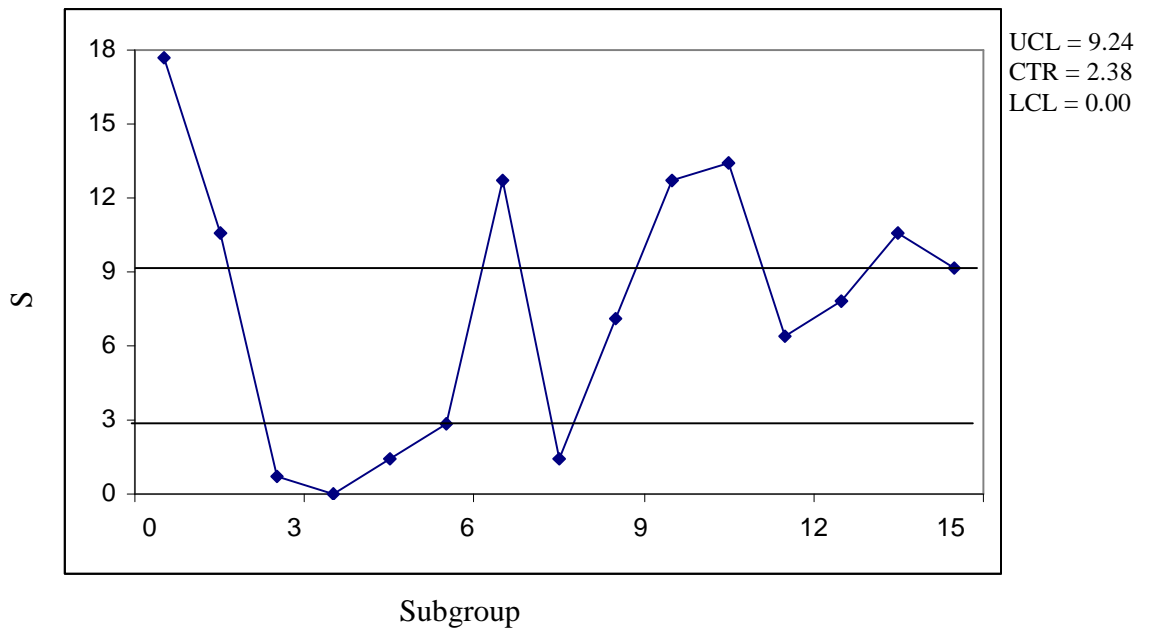


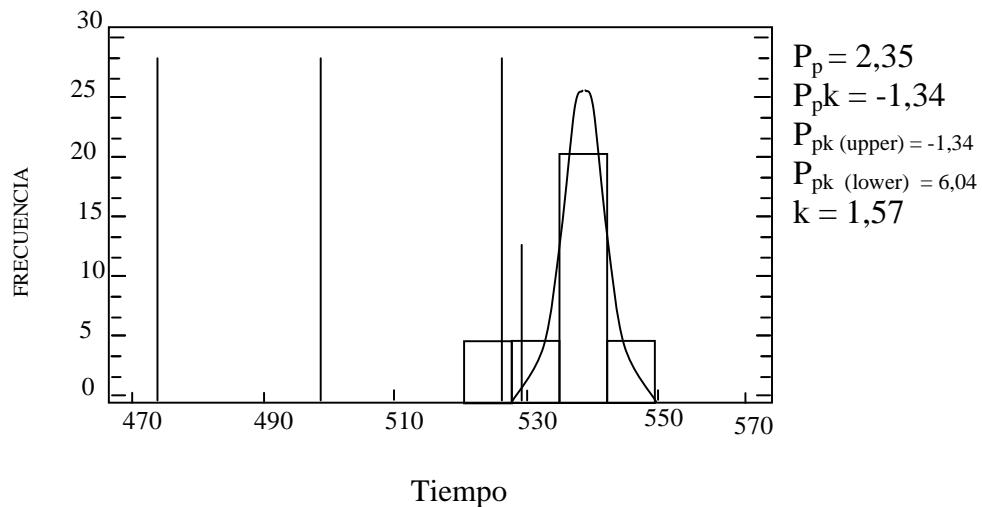
Figura 95. Gráfico de control para la desviación estándar



4.6.8. Capacidad del proceso

Cuando un proceso cumple con las especificaciones *establecidas en el diseño*, se dice que este es un proceso capaz.

Figura 96. Esquema de la capacidad de un proceso



Se pueden presentar tres contextos cuando un proceso encamina sus esfuerzos a cumplir con las especificaciones de diseño. La primera situación es que la capacidad del proceso sea mayor que las especificaciones $6\sigma_0 > les-lei$, es la situación más inestable dentro de un proceso. Aunque el proceso se encuentre dentro de control, este pueda que no cumpla con las especificaciones del producto, siempre y cuando sea informado a los clientes de este cambio. Otra posible solución sería desplazar el promedio del proceso ya sea de izquierda o derecha, logrando producir todo el rechazo por exceso o por defecto y por último disminuyendo la variabilidad del proceso, de tal manera que la distribución sea en forma de punta (esto significa que la mayor parte de la información se encuentra en la parte central de los datos) esto se logra con cambios sustanciales en el proceso.

El segundo contexto se manifiesta cuando la capacidad del proceso es igual a las especificaciones, a pesar que en esta situación el proceso está cumpliendo con las especificaciones $6\sigma_0=les-lei$, es indeseable tenerla porque en cualquier momento algunas informaciones del proceso pueden no ajustarse a las especificaciones.

El último contexto ocurre cuando la capacidad del proceso es menor que las especificaciones $6\sigma_0 < les-lei$, es el caso ideal, esto significa que la especificación al ser mayor que la capacidad del proceso, este puede encontrarse fuera de control, pero no ocurre producto de rechazo. La capacidad de un proceso debe ser menor que las diferencias de las especificaciones $les-lei$ para determinar si un proceso se encuentra capaz de cumplir con las especificaciones.

➤ **Medida de la Capacidad del Proceso:** para medir esta capacidad es utilizado el índice de capacidad definido como,

$$C_p = \frac{les - lei}{6\sigma}$$

Este valor adimensional indica, que tanto; las condiciones actuales del proceso permiten el cumplimiento de las especificaciones establecidas en el proceso.

Otras de las medidas útiles para especificar el cumplimiento de las especificaciones el Índice de Capacidad Promedio C_{pk} , que determina hacia donde está el desplazamiento del proceso con respecto a las especificaciones. La formulación aplicada es:

$$C_{pk} = \text{minimo} \cdot \text{valor} \left\{ C_{pl} = \frac{\mu - LEI}{3\sigma} \quad C_{pu} = \frac{LES - \mu}{3\sigma_0} \right\}$$

En esta fórmula se escoge el valor mínimo entre C_{pl} y C_{pu} . Es vital contar los siguientes criterios cuando se calcula la capacidad promedio del proceso:

1. El índice de capacidad promedio es menor o igual el índice de capacidad $C_{PK} \leq C_p$.
2. $C_{pk} = 0$. El promedio del proceso coincide con una de las especificaciones.
3. $C_{pk} < 0$. Casi todo el proceso está desplazado por fuera de las especificaciones.

Otro de los índices aplicados en la capacidad de un proceso es el índice de desvío C_{pm} que involucra dentro de la variabilidad del proceso de desvío de la media con respecto al valor objetivo N , cuya formulación es,

$$C_{pm} = \frac{les - lei}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}} \quad (4-2)$$

Modificando la ecuación 2, multiplicando y dividiendo por σ tenemos,

$$C_{pm} = \frac{C_p}{\sqrt{1 + \left[\frac{\mu - N}{\sigma}\right]^2}}$$

Cuando el valor $\mu = N$, entonces $C_{pm} = C_p$. otras de las modificaciones que se puede realizar es con respecto al índice de capacidad promedio, en donde se reemplaza el valor C_{pk} en la ecuación 2; obteniendo el siguiente índice de capacidad,

$$C_{pmk} = \frac{\min(les - \mu, \mu - lei)}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}}$$

Si el valor es de, $\mu = \frac{1}{2}(les + lei)$ entonces $C_{pm} = C_{pk}$.

El índice de capacidad es una variable aleatoria sujeta al valor de la desviación estándar σ , que es estimada mediante a desviación estándar mostrada s , de esta manera al índice de capacidad real está definido como,

$$\hat{C}_p = \frac{les - lei}{6\hat{\sigma}}$$

Por lo que es posible realizar una estimación de C_p mediante un intervalo de confianza, usando el hecho de que,

$$\frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} \approx X^2_{(n-1)}$$

$$P \left[X^2_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} \leq \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} \leq X^2_{(n-1, 1-\frac{\alpha}{2})} \right] = 1-\alpha$$

$$P \left[\frac{1}{s} \sqrt{\frac{X^2_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}}{n-1}} \leq \frac{1}{\sigma} \leq \frac{1}{s} \sqrt{\frac{X^2_{(n-1, 1-\frac{\alpha}{2})}}{n-1}} \right] = 1-\alpha$$

Multiplicando por *les-lei* en el intervalo de confianza tenemos,

$$P \left[\frac{les-lei}{6s} \sqrt{\frac{X^2_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}}{n-1}} \leq \frac{les-lei}{6\sigma} \leq \frac{les-lei}{6s} \sqrt{\frac{X^2_{(n-1, 1-\frac{\alpha}{2})}}{n-1}} \right] = 1-\alpha$$

Así que el intervalo $(1 - \alpha)$ 100% de confianza para C_p es,

$$\left[\hat{C}_p \sqrt{\frac{X^2_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}}{n-1}}, \hat{C}_p \sqrt{\frac{X^2_{(n-1, 1-\frac{\alpha}{2})}}{n-1}} \right]$$

En el caso de los tiempos en los mantenimientos preventivos para los D11R-CAT en donde el índice de capacidad para el tiempo es,

$$C_p = \frac{les-lei}{6\sigma} = \frac{525-475}{6(3.546)} = 2.35$$

Valor que manifiesta que el proceso es eficaz para el cumplimiento de las especificaciones técnicas exigidas en el proceso.

El intervalo de confianza para este Índice de Capacidad es estimado según la formulación como,

$$\left[2.35 \sqrt{\frac{X^2_{(29, 0.05)}}{30-1}}, 2.35 \sqrt{\frac{X^2_{(29, 0.95)}}{30-1}} \right] = [1.83629, 2.84632]$$

Los valores de la distribución ji-cuadrado son $X^2_{(29,0.05)} = 17.70$ y $X^2_{(29,0.95)} = 42.55$ (ver anexo 6).

4.6.9. Fundamentos de los Gráficos de Control por Atributos

Algunas veces es deseable en un proceso centrarse en las especificaciones de una característica de calidad, sino clasificar las unidades fabricadas en “unidades conformes” y “no conformes o determinar el número de no conformidades que posee cada unidad o subgrupo”. El seguimiento gráfico de este tipo de característica de calidad se conoce como gráficas de control por atributos.

- **Gráficos de Control para el Número de Unidades No conformes (Diagrama p):** Un gráfico p muestra la variación que existe en la fracción de no conformes en un proceso, en donde p se conoce como la fracción defectuosa. El comportamiento de esta fracción de no conformes es una distribución Binomial en donde se asume que la probabilidad de que una unidad no esté conforme es p y que las unidades fabricadas son independientes. Al seleccionar en forma aleatoria una muestra con n unidades, y si X es una variable aleatoria que está representando el número de unidades no conformes en la muestra. Entonces se afirma que X tiene una distribución Binomial con parámetros n y p. la fracción de unidades no conformes está especificada como

$$\hat{p} = \frac{X}{n} \text{ como } X \approx b(n, p) \text{ entonces,}$$

$$\hat{p} \approx b\left(p, \frac{p(1-p)}{n}\right)$$

Si el valor de p es conocido en el proceso, los límites de control se definen como,

$$lcs = p + 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}, lcs = p, lci = p - 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

Estos límites permiten realizar el control o monitoreo de las fracciones de no conformidades \hat{p} calculada en la muestra n .

La experiencia indica que el valor de la fracción de no conformes p es por lo general desconocido, obligando a estimarlo mediante un conjunto de g subgrupos de tamaño n , en donde se define X_i como el número de unidades de la i -ésima muestra, entonces la estimación de la fracción de no conformes es, el promedio de esta fracción de no conforme es:

$$\hat{p}_i = \frac{X_i}{n_i} \quad i = 1, 2, \dots, g$$

El promedio de esta fracción de no conforme es:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^g X_i}{\sum_{i=1}^g n_i} \quad i = 1, 2, \dots, g$$

De esta forma el valor de \bar{p} es utilizado como un estimador de los límites de control en este caso son de la forma,

$$lcs = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}}, \quad lcs = \bar{p}, \quad lci = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$$

Si el tamaño del subgrupo es constante, es fácil suponer que los límites de control se presentan de la siguiente manera:

$$lcs = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}, lcs = \bar{p}, lci = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$$

En donde el valor de p es estimado donde:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^g X_i}{gn} \quad i = 1, 2, \dots, g$$

➤ **Gráficas de control de unidades no conformes:** Los siguientes son los pasos necesarios para construir un gráfico de control de las unidades no conformes:

- Trazamos un diagrama preliminar para determinar si el proceso se encuentra en control, calculando inicialmente el promedio defectuoso durante el periodo en que se tomó la información histórica.
- Para ello, tomamos el número total de partes defectuosas sobre el número total de inspecciones realizadas.
- Evaluar los límites de control superior, central e inferior de control.
- Determinar la existencia de subgrupos fuera de control y si existen causas asignables en el comportamiento del proceso.
- Se analizan nuevamente los datos para obtener la base, en cuanto a los límites de control (límites de control estándar), que se utilice para producciones futuras.

Utilizando los datos de los mantenimientos preventivos en los equipos se elabora una gráfica de control p , en donde las causas atribuibles han sido encontradas en el caso de todos los puntos situados fuera de los límites de control, con un tamaño de muestra de 200 unidades por subgrupos.

Tabla 21. Número de unidades no conforme por exceso de tiempo.

| Semana del estudio | Números de unidades no conformes X_i | Fracción de no conformes P |
|--------------------|---|---------------------------------|
| 1 | 6 | 0.030 |
| 2 | 6 | 0.030 |
| 3 | 6 | 0.030 |
| 4 | 5 | 0.025 |
| 5 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 |
| 7 | 6 | 0.030 |
| 10 | 4 | 0.020 |
| 11 | 0 | 0 |
| 12 | 1 | 0.005 |
| 13 | 8 | 0.040 |
| 14 | 2 | 0.010 |
| 15 | 4 | 0.020 |
| 17 | 7 | 0.035 |

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^{14} X_i}{\sum_{i=1}^{14} n_i} = \frac{55}{2800} = 0.0196 \approx 0.020$$

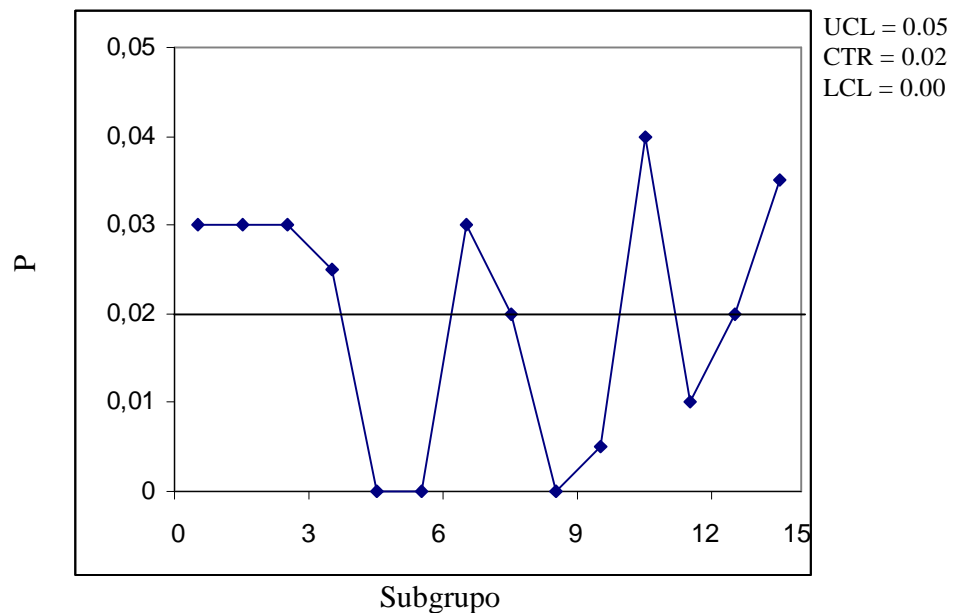
Los límites de control resultante son:

$$lcs = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} = 0.0196 + 3\sqrt{\frac{0.0196(1-0.0196)}{200}} = 0.0496 \approx 0.050$$

$$lc = 0.0196 \approx 0.020$$

$$lci = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} = 0.0196 - 3\sqrt{\frac{0.0196(1-0.0196)}{200}} = -0.009805 \approx 0.00$$

Figura 97. Límites de control inicial para las unidades no conformes.



Estos límites de control iniciales son tomados como límites de control estándar después de detectar que el proceso se encuentra estadísticamente en control, lo que es conocido como FASE I dentro de la estructura metodológica de las gráficas o diagramas de control. Esto permite realizar un control al proceso con la información que se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Número de unidades no conforme por exceso de tiempo sometidas a control.

| Semana del estudio | Números de unidades no conformes X_i | Fracciones de no conformes P |
|--------------------|--|--------------------------------|
| 1 | 1 | 0.005 |
| 2 | 3 | 0.015 |
| 3 | 1 | 0.005 |
| 4 | 4 | 0.020 |
| 5 | 0 | 0 |
| 6 | 4 | 0.020 |
| 7 | 15 | 0.075 |

Siendo $p = 0.0196$ conocido tomado de la FASE I, cuando el proceso se encuentra bajo control estadístico, los límites de control estándar son calculados mediante,

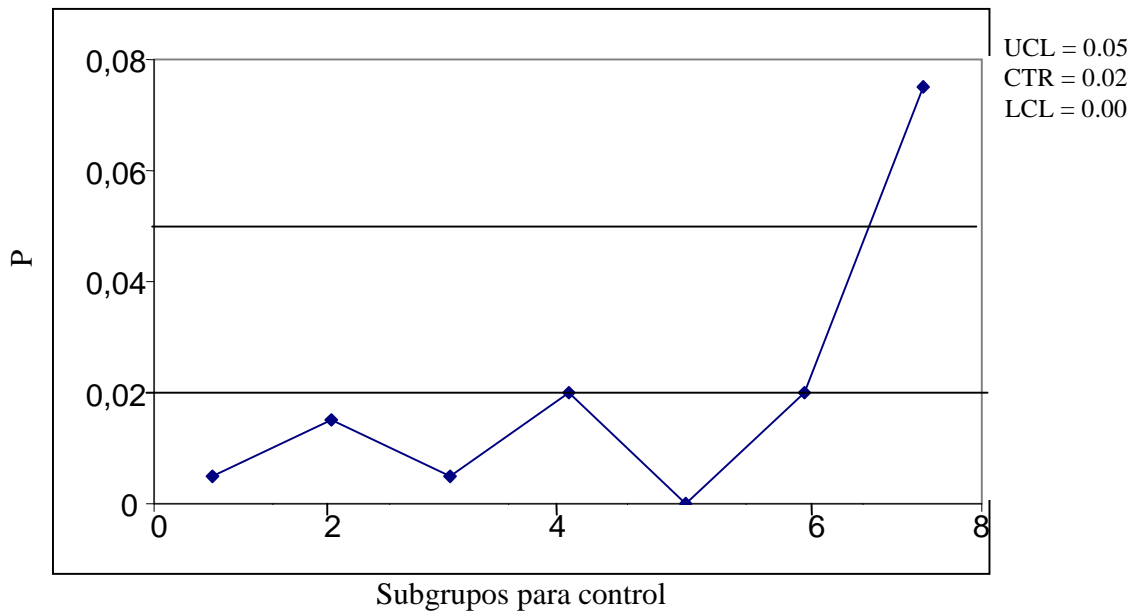
$$lcs = 0.0196 + 3\sqrt{\frac{0.0196(1-0.0196)}{200}} = 0.0469 \approx 0.050$$

$$lc = 0.0196$$

$$lci = 0.0196 - 3\sqrt{\frac{0.0196(1-0.0196)}{200}} = -0.0098 \approx 0.00$$

Monitoreando la información suministrada en el cuadro 27 (FASE II), la gráfica muestra que el último subgrupo presenta un comportamiento atípico dentro del proceso, lo que implica un estado fuera de control estadístico.

Figura 98. Información sometida a control tomando los límites estándar como referencia



- **Gráfica de control para la cantidad de unidades no conformes:** El gráfico de control np muestra la variación existente en la fracción defectuosa de un proceso, en donde p se conoce como la fracción defectuosa y el tamaño de subgrupo n es constante. El cálculo de los límites de control se presenta a continuación, para el límite superior de control,

$$lcs = \bar{np} + 3\sqrt{\bar{np}(1 - \bar{p})}$$

Para el límite central de control.

$$lcs = \bar{np}$$

Y el límite inferior de control,

$$lci = \bar{np} - 3\sqrt{\bar{np}(1 - \bar{p})}$$

Siendo $\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^g X_i}{gn}$ $i = 1, 2, \dots, g$ y $\bar{np} = \frac{\sum_{i=1}^g X_i}{g}$ permite calcular los estadísticos de cada uno de los subgrupos.

- **Gráfica de control para el número de no conformidades:** La aplicación de la gráfica del número de no conformidades c es útil para controlar el número de defectos c presentes en una unidad o subgrupo predeterminado. En este gráfico, el tamaño de la muestra debe ser fijo. El uso es especialmente conveniente cuando no existe una unidad natural de producto y se requiere controlar la cantidad de no conformidades o fallas sobre una superficie o a lo largo de una longitud constante. Sea X el número de no conformidades presente en el subgrupo, cuyo comportamiento es una distribución Poisson con parámetro c , el número de no conformidades está definida como,

$$\hat{c} = \frac{X}{n}, X \approx p(c)$$

Se tiene entonces: $\hat{c} \sim p(c)$.

Cuando el parámetro c es conocido los límites de control son evaluados mediante,

$$lcs = c + 3\sqrt{c}$$

$$lc = c$$

$$lci = c - 3\sqrt{c}$$

En la práctica, el valor del parámetro c es desconocido, por lo que es estimado en razón de tomar un conjunto de g subgrupos de tamaño n , donde X_i el número de no conformidades en la muestra, entonces,

$$\hat{c} = \frac{X_i}{n} \quad i = 1, 2, \dots, g$$

Y el promedio de no conformidades se define como:

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^g X_i}{gn} = \frac{\sum_{i=1}^g \hat{c}_i}{n}$$

De esta forma, el valor de \bar{c} es un estimador del parámetro c y la construcción de los límites de control para este tipo de gráfica son,

$$lcs = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$$

$$lc = \bar{c}$$

$$lci = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$$

- **Gráfico de control para el número de no conformidades por unidad:** El gráfico de control para c , no conformidades por unidad de producto, se utiliza cuando la inspección del producto cubre más de una característica.

Bajo esta circunstancia, varios no conformidades pueden presentarse en una unidad de producto en forma independiente y una mejor medida del nivel de calidad se obtiene, mediante el conteo de todas las no conformidades observadas divididas por el número de unidades inspeccionando para obtener un valor de defectos por unidad. Este cociente de c/n , se presenta por el símbolo μ .

Aunque el valor de μ , no sigue una distribución Poisson tal como ocurre con c , podemos deducir los límites de control de μ , de la siguiente forma:

$$Var(u) = Var\left(\frac{c}{n}\right) = \frac{1}{n^2} Var(c) = \frac{1}{n^2} \bar{c} = \frac{\bar{c}}{n} = \frac{\bar{u}}{n}$$

Los límites de control para la carta μ están definidos como,

$$lcs = \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$$

$$lcc = \bar{u}$$

$$lci = \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$$

El promedio de no conformidades por unidad es calculado mediante,

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^g c_i}{\sum_{i=1}^g n_i}$$

4.6.10. Gráfico del control multivariado

Durante la Segunda Guerra Mundial la técnica estadística de gráficas de control univariadas fue la más utilizada a pesar de que los procesos y productos que se analizaban poseían en su gran mayoría dos o más características de calidad, con el tiempo se dio la necesidad de aplicar herramientas estadísticas multivariadas para controlar en forma simultánea dos o más variables.

Sin embargo las técnicas multivariadas de control son las técnicas muy complejas de utilizar, por los conceptos matemáticos que se manejan. Esta dificultad es superada posteriormente con el avance de los programas o software especializados en control estadístico de procesos, lo que originó un interés de las técnicas de control multivariado.

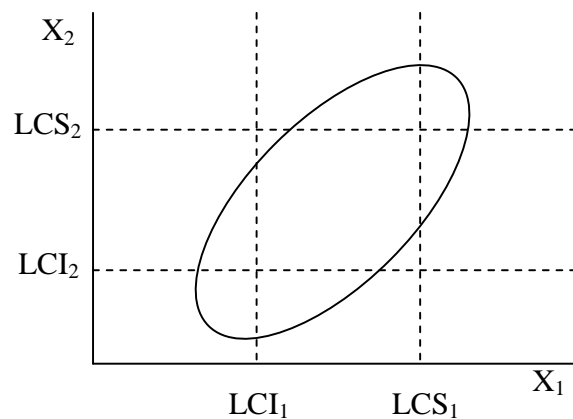
El número de características de calidad en una carta multivariada es representada por p . el principal objetivo en este tipo de carta es determinar bajo un contraste de hipótesis si las p variables se encuentran bajo control estadístico,

Para resolver este problema se propuso dos métodos: 1) realizar una carta de control a cada una de las p variables y rechazar la hipótesis cuando cualquiera de estas variables indiquen una señal fuera de control, obteniendo de esta forma un error tipo I; $1 - (1 - \alpha)^p$; 2) rechazar la hipótesis cuando todas las cartas indiquen que la variable a controlar posea una señal fuera de control, en este caso la

probabilidad de error tipo I es de α^p . Sin embargo, ninguna de estas propuestas explica el grado de correlación que puedan tener las variables, relación que se presenta frecuentemente.

Considere, el caso en que se controlan dos características de calidad, que se distribuyen en forma normal bivariada. Posteriormente seleccione una muestra n de observaciones para cada una de las características de calidad y evalúe un estadístico cualesquiera. El método a considerar consiste en construir separadamente dos cartas superpuestas para cada una de la variable, ver figura 99.

Figura 99. Regiones de control elípticas y rectangulares para dos características de Calidad evaluada en forma simultánea.



Si el estadístico del subgrupo, en este caso la media, queda dentro de la región rectangular se considera el proceso bajo el control estadístico. Sin embargo, la región antes mencionada, realmente es de naturaleza elíptica, lo que implica que al tomar referencia la región rectangular posibilita la aparición de errores que conlleve a conclusiones lejanas de la realidad del proceso.

4.6.11. Gráfico de control Multivariado para observaciones individuales

La técnica gráfica de control multivariado se elabora para determinar cuatro importantes propiedades que están definidas de la siguiente forma:

- Determinar si el proceso se encuentra o no en control.
- Mantener constante el error tipo I o nivel de significancia α .
- Con este tipo de herramienta se puede determinar el tipo de relación existente entre las variables involucradas en el proceso.
- Si el proceso está “fuera de control” ¿Cuál es la variable que causó dicho inconveniente?

4.6.12. Procedimiento por su elaboración

Considere un vector p – dimensional X que contiene las observaciones de las características de calidad. El vector X se encuentra distribuido normalmente $N \approx (\mu, \Sigma)$, en donde el error tipo I o nivel de significancia α , es el establecido en forma diferente al gráfico uní variado, en el caso multivariado se establecería de la siguiente manera: tomando como ejemplo dos variables $1 - 0.95^2 = 0.0975 \approx 0.1$.

Para la elaboración de las gráficas de control se han propuesto dos fases, similar a las establecidas en las cartas de control uní variadas, la FASE I está compuesta por dos etapas. En la Etapa I se determina si el proceso se encuentra bajo control con la información suministrada por cada uno de los subgrupos, también es conocida como etapa de retrospectiva. En la Etapa II se prueba si el proceso continúa bajo control con los nuevos subgrupos seleccionados. LA FASE II es utilizada para detectar los posibles desvíos los procesos respecto a un valor estándar u objetivo μ_0 .

En las etapas iniciales del proceso los valores de μ_0 y Σ generalmente se desconocen, estimándose a partir de un conjunto de g observaciones cuando el proceso se encuentra bajo control.

Sea \bar{X} y V la media y la matriz de covarianza muestrales obtenidas en los g

subgrupos. La media muestral se determina $\bar{X} = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g X_i$ y la covarianza:

$$V = \frac{1}{g-1} \sum_{i=1}^g (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})'$$

La estadística T^2 para la i -ésima observación está definida como:

$$T^2 = (X_i - \bar{X})' V^{-1} (X_i - \bar{X})$$

En la etapa I, esta estadística está distribuida en forma Beta.

$$T_i^2 \sim \frac{(g-1)^2}{g} B\left(\frac{p}{2}, \frac{g-p-1}{2}\right)$$

El límite de control superior es obtenido mediante la siguiente ecuación,

$$lcs = \frac{(g-1)^2}{g} B\left(\frac{p}{2}, \frac{g-p-1}{2}, \alpha\right)$$

$B(\partial_1, \partial_2, \alpha)$ es el percentil $(1-\alpha)$ de la distribución beta con parámetros ∂_1, ∂_2 . El interior de la frontera del elipsoide la describe la desigualdad $T^2 \leq lcs$ De dimensiones p con centro \bar{X} . Si un subgrupo definido centro. Si un subgrupo definido como X_i se encuentra dentro de elipsoide, entonces se dice que el proceso se encuentra bajo control estadístico. Lo contrario implica que se deben encontrar las razones o causas especiales que motivaron la señal fuera de control. Una vez detectada y corregida la causa, las observaciones multivariadas se eliminan del conjunto de datos. Entonces los límites de control son recalculados con la información restante y el procedimiento se repite nuevamente.

En la Etapa II la distribución T^2 está relacionada con la conocida distribución F, el límite de control superior es calculado mediante las siguientes formulaciones,

$$lcs = \frac{p(g+1)(g-1)}{g(g-p)} F_{(p, g-p, \alpha)}$$

$$lcs = \frac{gp}{(g-p+1)} F_{(p, g-p+1, \alpha)}^9$$

Donde $F_{(p, g-p, \alpha)}$ es el percentil $(1-\alpha)$ de la distribución F con p y $g-p$ grados de libertad, g es el número de observaciones utilizadas para estimar los parámetros de la Etapa I.

Una vez se considere el proceso bajo control estadístico en la Etapa II, se asume posteriormente que los valores finales \bar{X} y V son los estimadores de los verdaderos parámetros. De este modo, para que se construya una carta X^2 con p grados de libertad para la FASE II, pues,

⁹ Propuesta por Edgar Jackson, 1985 y T.P. Ryan, 1988 respectivamente.

$$X^2 = (X_i - \mu_0)' \sum^{-1} (X_i - \mu_0)$$

Sigue una distribución ji-cuadrado con X^2 grados de libertad. Entonces el límite de control superior es de la forma,

$$lcs = X_{p,\alpha}^2$$

Una señal fuera de control para una observación X_i ocurre cuando

$$X_i^2 \geq X_{p,\alpha}^2 .$$

El SS posee seis principios filosóficos que son en su orden: enfoque al cliente externo e interno como base esencial de toda organización, análisis de la información veraz y oportuna, un enfoque basado en proceso para simplificar las diversas variables de la estructura organizacional, poseer una actitud preventiva y no correctiva, trabajo en equipo como fundamento para favorecer la comunicación entre los miembros de la organización y realizar las actividades de mejoramiento necesarias al proceso.

El equipo de Mejoramiento, es el encargado de forjar los principios del SS, para su instauración en la organización debe pasar por seis etapas a saber; identificar y seleccionar el proyecto, formar los Equipos de Mejoramiento de acuerdo a los problemas presentes en la organización, desarrollar el Plan de Mejoramiento, capacitar a los miembros del equipo, ejecutar el DMAMC y traspasar la solución a otros equipos de la organización. Las funciones de estos Equipos de Mejoramiento se basan en los criterios filosóficos de las artes marciales, encontrando niveles de cinturones tales como el Cinturón Negro, el Cinturón Verde, el Primer Dan, el esponsor y el Líder de la Implementación.

La implementación del SS inicialmente parte de la disposición de cambio que posean los directivos de la organización. En segundo lugar la organización debe gozar de un sistema de información que determine el nivel de Seis Sigma sin ningún tipo de sesgamiento, en tercer lugar se debe definir los requisitos o necesidades de los clientes e inmediatamente se aplica la metodología de DMAMC, una vez empleada se comprueba si las mejoras producidas en el proceso son efectivas en la organización, por lo que se hace necesario evaluar el DPMO.

Una organización que está dispuesta a implementar el SS en su organización debe realizar grandes esfuerzos en capacitar su personal en gestión de calidad y sin lugar a dudas este debe poseer los conocimientos suficientes en las Ciencias Estadísticas con el fin de aprovechar de la mejor manera la información suministrada por el proceso. Conocimientos básicos de probabilidad para determinar la posibilidad de ocurrencia de un evento, las distribuciones continuas y discretas que en forma frecuente son aplicadas en los procesos, con el objetivo de determinar el comportamiento estadístico de un fenómeno o evento evaluados en el proceso y así poder evaluar mediante estimaciones y prueba de hipótesis los parámetros, tales como la media y la desviación que permitan posteriormente medir el nivel de Seis Sigma de la organización.

A finales de la década pasada se hizo evidente que todas las empresas manufactureras habían entrado en un nuevo entorno que hizo necesario el reconducir esfuerzos para sobrevivir, ser competitivos y exitosos. Los altos niveles de exigencia por parte del mercado en términos de calidad y costo, una feroz competencia globalizada, mayor respeto y exigencias al ambiente y por ende al personal e integridad mecánica de los equipos y sistemas, caracterizan esta etapa crucial que ha tocado vivir.

El entorno antes delineado ha obligado a las compañías exitosas a la revisión de la visión sobre las funciones que ha cumplido la gestión de mantenimiento dentro de las industrias, haciéndolas objeto de una serie de transformaciones profundas a nivel tecnológico, organizacional, económico y humano.

Mantenimiento es el medio que tiene toda empresa para conservar operable con el debido grado de eficiencia y eficacia su activo fijo. Engloba al conjunto de actividades necesarias para:

- Mantener una instalación o equipo en funcionamiento.
- Restablecer el funcionamiento del equipo en condiciones pre-determinada.

El mantenimiento incide, por lo tanto, en la cantidad y calidad de la producción. En efecto, la cantidad de producción a un nivel de calidad dado está determinada por la capacidad instalada de producción y por su disponibilidad, entendiéndose por tal al cociente del tiempo efectivo de producción entre la suma de éste y el tiempo de parada por mantenimiento.

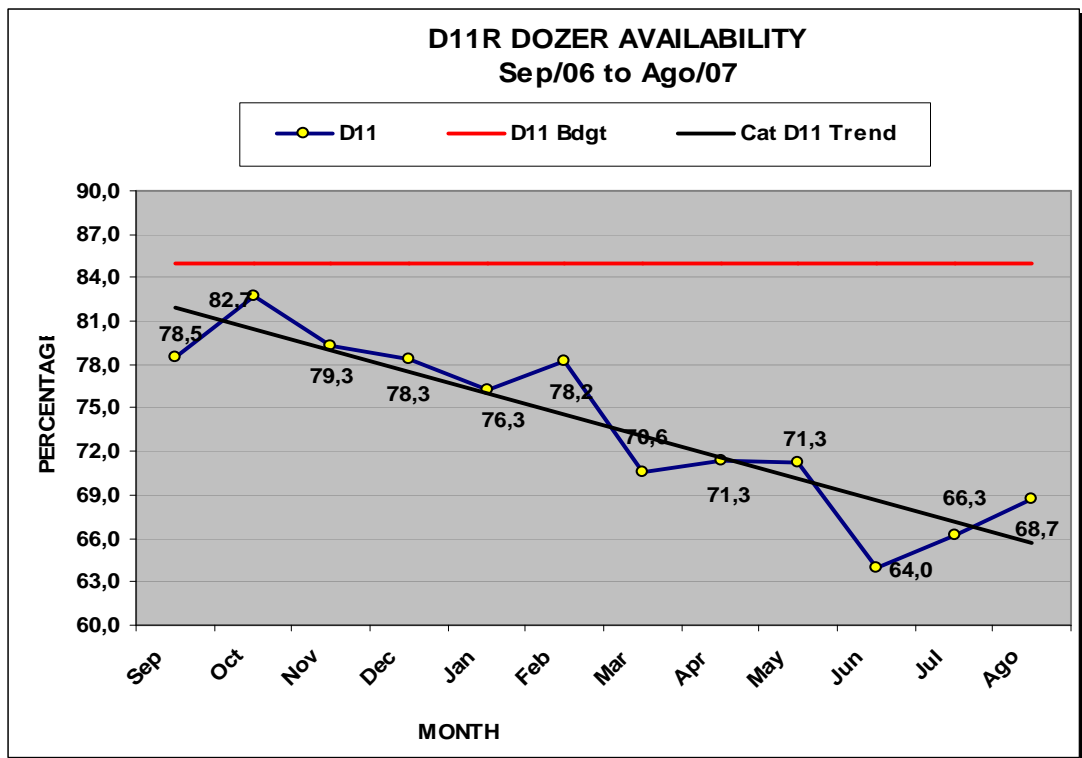
El departamento de mantenimiento de Drummond LTD entendiendo la importancia de estos cambios necesarios en su gestión de mantenimiento para resolver su problema de baja disponibilidad de sus equipos D11R, realizó los esfuerzos necesarios para tratar de corregir todas estas causas que ocasionaban una situación incómoda para la compañía

Durante dos meses se realizó mantenimiento correctivo y preventivo a cada uno de los D11R con el fin de minimizar la baja confiabilidad de estos equipos y buscar controlar todos los problemas que ocasionaban la baja disponibilidad de estos.

En la figura 40 se muestra el periodo analizado de la disponibilidad donde se puede ver la mejoría que se logró en los meses de julio y agosto posteriores a los procesos de mejoramiento de los equipos D11R.

Esta mejoría es una muestra alentadora que sirve para demostrar que las actividades generadas en la gestión del mantenimiento pueden llegar alcanzar el objetivo final de lograr que la flota de D11R sea altamente confiable y con bajo costos de mantenimiento

Figura 100. Disponibilidad de los D11R durante el período de Septiembre 2006 – Agosto 2007.



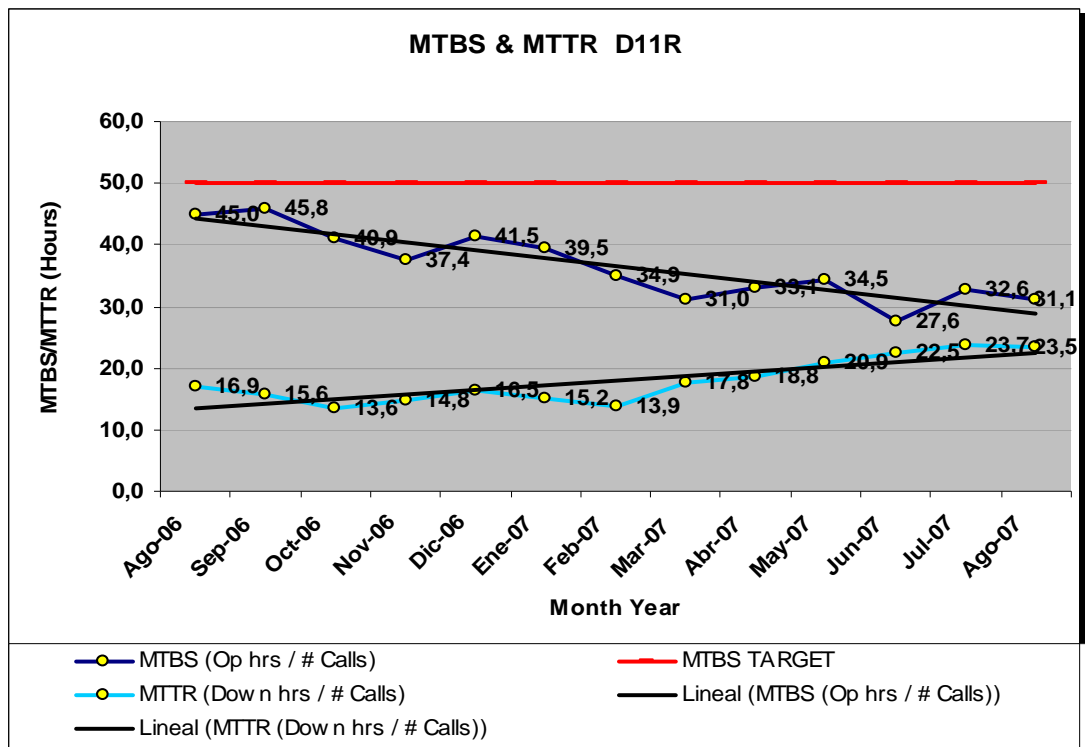
El objetivo del departamento de Mantenimiento de Drummond Ltd, es asegurar la disponibilidad planeada al menor costo dentro de las recomendaciones de garantía y uso de los fabricantes de los equipos e instalaciones y las normas de seguridad. Para ello actúa sobre la continuidad de la operación de producción, es decir, la confiabilidad que se mide por el tiempo medio entre fallas consecutivas (MTBS).

El tiempo de paradas (MDT) cuando éstas se producen. El tiempo de paradas incluye el tiempo efectivo de reparación (Mantenibilidad) (MTTR) que es función del diseño, herramientas disponibles y destreza y capacitación del personal y, del tiempo de espera (MWT) (Soporte) que es función de la organización (sistemas y rutinas, herramientas y talleres disponibles, documentación técnica, capacitación, entrenamiento y suministro de piezas y/o repuestos).

$$\text{Disponibilidad} = \text{MTTF} / (\text{MTBS} + \text{MDT}) = \text{MTBS} / [\text{MTBS} (\text{MTTR} + \text{MWT})]$$

En la figura 42, podemos ver el cálculo del MTBS y MTTR para el mes de julio y Agosto donde se puede ver una tímida mejoría en los valores con respecto a la tendencia de los meses anteriores.

Figura 101. MTBS Y MTTR de los D11R durante el período de Agosto 2006 – Agosto 2007

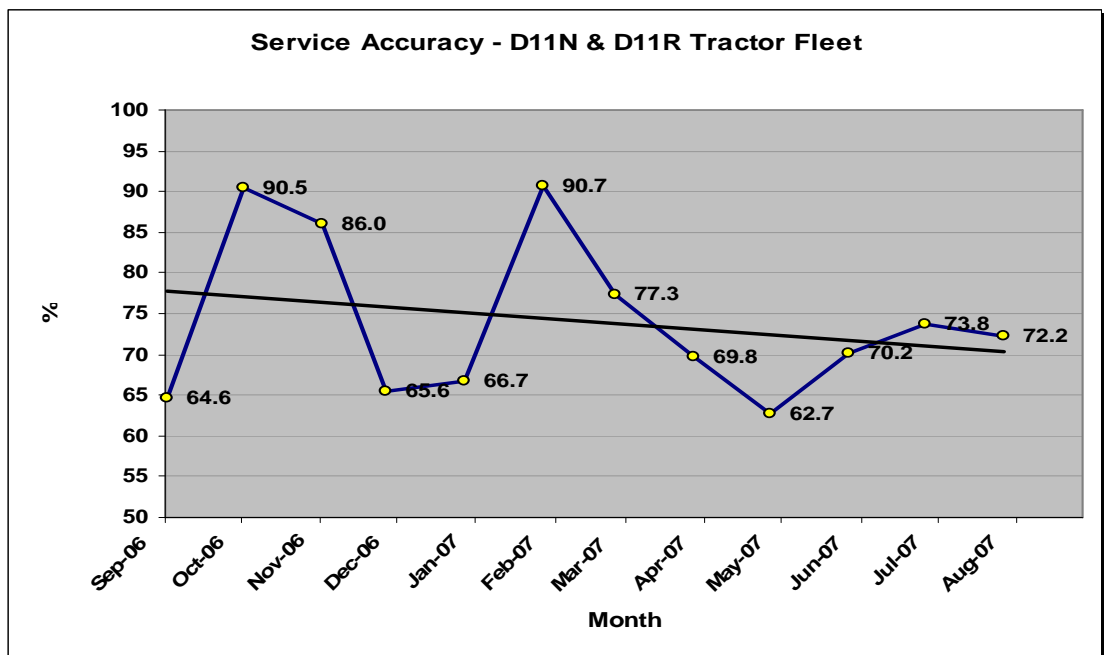


Después que a los D11R se le realizo todas las modificaciones y reparaciones necesarias para mejorar su disponibilidad y evitar tantas fallas repetitivas y horas down, la confiabilidad de toda la flota mejoro y esto se vio reflejado en la efectividad de la ejecución del mantenimiento Preventivo.

La figura 42 muestra la gran mejoría que se logro obtener, gracias a que la programación de los mantenimiento preventivos se desarrollo de forma eficiente y los equipos se le realizo el mantenimiento en el tiempo y fecha estipulado por el departamento de planeación de mantenimiento.

También es bueno resaltar que debido a la mejoría de la confiabilidad de los equipos, el departamento de producción, entregaba los equipos a tiempo para el mantenimiento y esto lógicamente se ve reflejado en la efectividad de cumplimiento de los PM, mostrado en la figura.

Figura 102. Serviré Accuracy de los D11R durante el período de Agosto 2006 – Agosto 2007.

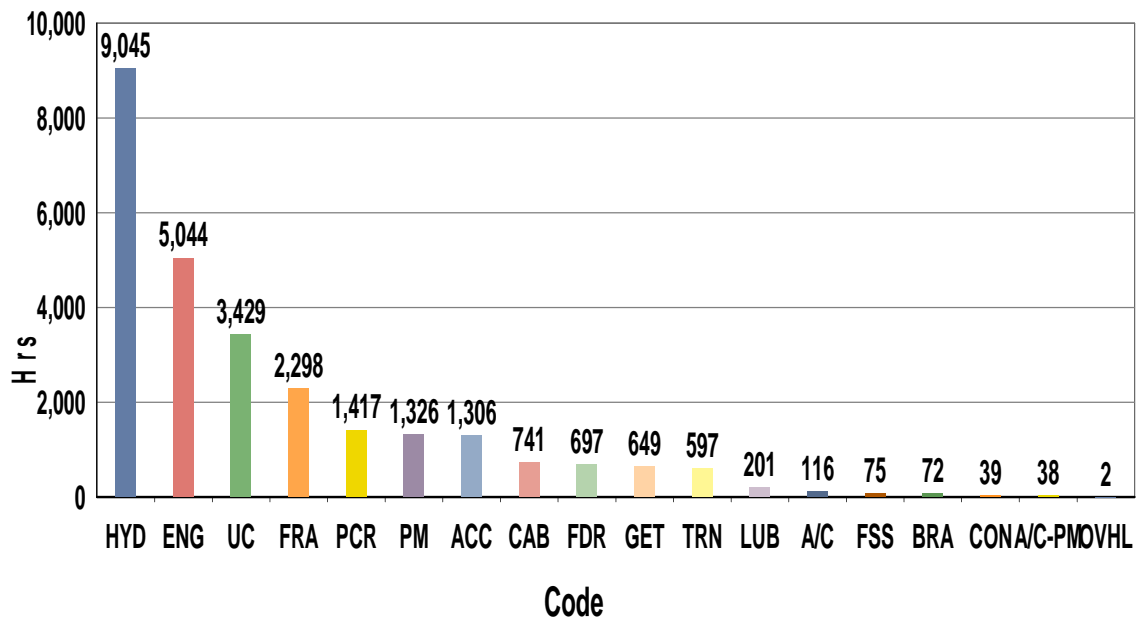


El hacer mantenimiento con un concepto actual no implica reparar equipo roto tan pronto como se pueda, sino mantener el equipo en operación a los niveles especificados. En consecuencia, un buen mantenimiento no consiste en realizar el trabajo equivocado en la forma más eficiente; su primera prioridad es prevenir fallas y, de este modo reducir los riesgos de paradas imprevistas.

Otro de los indicadores que muestra lo buenos resultados que se lograron con la buena gestión de mantenimiento bajo el enfoque de Seis sigma es la reducción de las horas down por cada uno de los sistemas de los D11R.

Como se puede ver en la figura 40 el diagrama de Pareto para el mes de agosto muestra la disminución notable de las horas down por cada sistema en comparación con el mes de junio (ver figura).

Figura 103. Pareto distribución de los tiempos Down en Agosto 2007 de los D11R



Diferentes fuentes, nacionales y extranjeras indican que los costos de mantenimiento en las empresas pueden sobrepasar el 50% del presupuesto total de operación de las mismas por lo cual la optimización de la gestión de mantenimiento debe ser vista como oportunidad de mejora.

Aun más, el costo de la pérdida de oportunidad (lo que se deja de producir) producto de fallas no detectadas y repetitivas, sobrepasa con creces los costos anuales de mantenimiento y operación (entre 2 a 15 veces más) siendo ésta la verdadera oportunidad de mejora.

La transición de nuestras organizaciones orientadas a reparación de equipos, a nuevas organizaciones orientadas a la confiabilidad de plantas, exige mayor focalización en el registro histórico de datos, uso intensivo de tecnologías y grupos departamentales centrados en “evitar fallas”, alta responsabilidad ante las mismas e integración de los niveles gerenciales en el desarrollo de los planes de confiabilidad operacional y gerencia de activos.

Tradicionalmente la gestiones de mantenimiento se han desarrollado a organizaciones orientadas a reparación de equipos por lo cual la creencia de que las fallas ocurrirán por norma (de cualquier forma y en cualquier momento) hace cierto que la misión de mantenimiento es ser “la mejor y mayor fuerza” para responder rápidamente y solventar el daño de los equipos, restituyendo su función y evitar el menor impacto en el negocio. Los talleres y cantidad de recursos se han dimensionado para atacar cualquier falla aún si ésta ocurre en días no laborables.

Dicho plan, es una tarea compleja que requiere el involucramiento y participación de diferentes personas que tendrán que ejecutar análisis y alcanzar decisiones por consensos sobre las acciones proactivas necesarias para evitar la recurrencia de fallas o disminuir a un nivel tolerable la probabilidad de ocurrencia. Lo anterior debe ser responsabilidad de todos aquellos que forman parte activa en la

selección, el diseño, procura, instalación, operación y mantenimiento de los equipos y sistemas.

Después de haber analizado los indicadores de los logros alcanzados en la disponibilidad, el servicio Accuracy, el downtime, el MTBS y MTTR de los D11R, debido a las mejoras realizadas en los equipos bajo el enfoque de la metodología seis sigma, entramos a analizar las mejoras logradas en los costos de mantenimiento que es el factor mas importante quizás en todas las empresas desde el punto de vista como negocio.

En la tabla 2 podemos ver el costo de mantenimiento de la flota de los D11R durante el mes de enero hasta agosto 2007 mes en que finalizo el estudio.

Vemos que en el mes de junio fecha en que se decidió implementar la metodología de Seis sigma, los costos tuvieron un incremento con respecto al mes de mayo y por ende fue la razón de la preocupación de la gerencia por la situación que se estaba presentando con la flota de los D11R, acompañado de la baja disponibilidad.

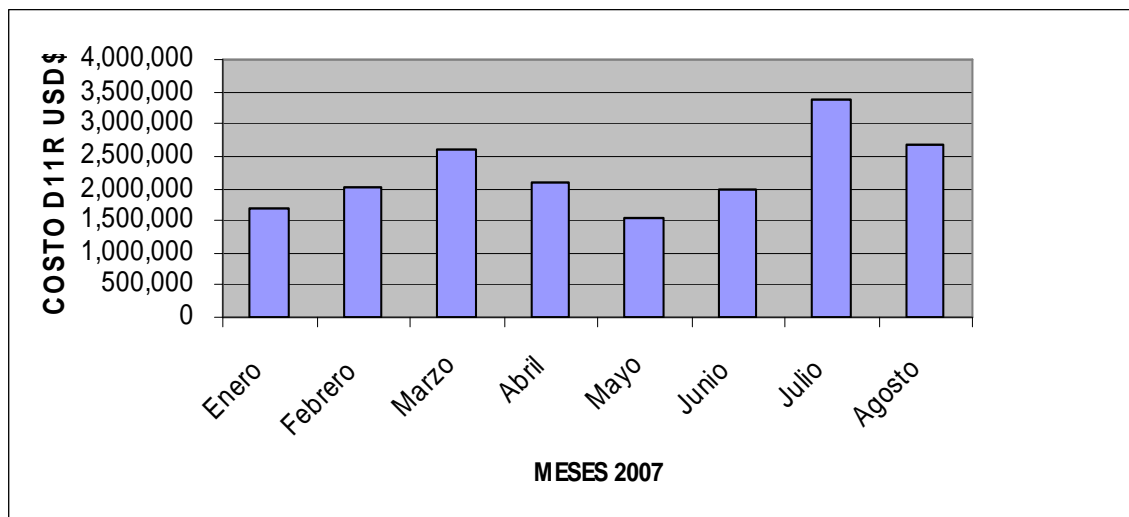
Durante el mes de julio los costos se incrementaron aun mas, y esto es fácilmente demostrable porque fue en este mes donde la flota tuvo el máximo costo de mantenimiento y reparación de todo el año debido al acondicionamiento de los equipos para corregirle los problemas presente en cada uno y que estaban ocasionando el problema de baja confiabilidad y mala disponibilidad (ver tabla 2).

Pero los resultados esperados comenzaron a dar su frutos, en el mes de agosto, donde se ve reflejado la enorme disminución en los costos de mantenimiento de toda la flota, a pesar que sigue siendo alto en comparación al resto de los meses, la efectiva ejecución de los PM y la demostrable disminución de las horas down en

el mes de agosto, son síntomas claro que las mejoras realizadas a los equipos garantizaran que en el futuro los costos pueden estar controlados.

Tabla 23. Costos (USD\$) del mantenimiento y reparación de la flota D11R-CAT desde enero – Agosto 2007

| ESES | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Grand Total |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Costos D11R Mantenimiento USD\$ | 1,679,955 | 2,025,723 | 2,610,686 | 2,087,694 | 1,540,639 | 1,982,995 | 3,386,850 | 2,693,445 | 18,007,987 |



Debemos preguntarnos lo siguiente: Si existen tiempo y conocimientos para reparar fallas ¿Por qué nunca se dedica los suficientes recursos para evitar que estas ocurran?

¿Será más fácil justificar recursos para reparar, que los que deben invertirse para confiabilidad?

Las respuestas a estas preguntas soportan la creación de una cultura de la Administración del Desempeño de Activos, donde se comprenda que al igual que la seguridad, la confiabilidad es parte y responsabilidad de cada uno de los

trabajadores. El sentido de pertenencia, conciencia de costos y autoestima, entre otros, debe ser Inter analizado para alcanzar menor accidentalidad y mayor rentabilidad para la inversión que realiza la empresa.

La motivación y orientación hacia tareas sencillas realizadas con un mínimo de exigencias por parte de los trabajadores podrá disminuir notablemente la necesidad de trabajos especiales, no planificados y con alto riesgo para su ejecución.

CONCLUSIONES

Con la Gestión de mantenimiento Realizada bajo el enfoque de la metodología seis sigma se logro analizar, identificar e implementar los cambio necesarios en el proceso del mantenimiento, se realizaron las mejoras y las reparaciones necesarias en los equipos para que el proceso del mantenimiento preventivo de la flota de los D11R Caterpillar en la empresa Drummond LTD sea más efectivo y confiable. Se identifico la mejor manera de realizar las actividades, se consiguió que con esas mejoras en los equipos, la disponibilidad mejorara notablemente y ahora presentara una tendencia a seguir mejorando.

Se optimizo de una mejor manera la utilización de los recursos disponibles como el número de técnicos necesarios para los diferentes tipo de mantenimiento aplicado a los equipos, se midió el tiempo necesario para cada actividad, se identificaron las herramientas necesarias para un buen desempeño de los técnico al momento de realizar su trabajo, se mejoro la gestión de la adquisición de los repuestos mejorando el stock de partes necesarias en el mantenimiento de los equipos y principalmente se logro un mayor control de los costos de mantenimiento.

Todo el proceso de mantenimiento fue revisado bajo el enfoque Seis Sigma y se mejoraron las actividades que ocasionaban retrabajos y pérdida de tiempo para la empresa, se les dio un mejor manejo a los indicadores de la gestión de mantenimiento y se pudo tomar mejores decisiones acorde con la realidad de la empresa reflejada en esos indicadores.

Cada uno de los cambios realizados en los sistemas de los equipos, fueron justificados en base a datos reales estadísticos de fallas repetitivas y se logró disminuir el tiempo down de estas fallas

Se reestructuraron todos los tipos de mantenimiento preventivo que se le aplicaban a la flota de los D11R, dejándose de realizar mantenimientos de 3 horas de duración y se estandarizaron todos a 8 horas para poder realizar los backlogs y las actividades de mantenimiento programadas que sería uno de los puntos más sensibles encontrados con la metodología Seis sigma como es el manejo efectivo del tiempo.

La nueva redacción y presentación que se les efectuaron a las pautas de mantenimiento (check list) logró que los técnicos trabajaran de manera más organizada y coordinada. Esto mejoró el control del supervisor en las actividades de su personal y la información se logró obtener de manera más clara y efectiva para poderla interpretar e ingresar al sistema de mantenimiento.

La Gerencia de Mantenimiento conciente de la importancia de su personal técnico, en acuerdo con las empresas proveedoras y contratistas de insumos y servicios, programaron actividades de entrenamiento al personal de todos los sistemas de los equipos para mejorar el tiempo de caza fallas, diagnósticos de evaluación y reparación

Se le dio a los talleres una mejor distribución del área para que el personal estuviera todavía más cómodo y seguro en el momento de realizar los mantenimientos a los equipos.

Se mejoró la señalización dentro de los talleres y se iniciaron campañas de concientización de la utilización de los elementos de seguridad industrial y orden y aseo.

Se demostró por intermedio del enfoque seis Sigma que el proceso de mantenimiento preventivo es un proceso que debe ser controlado y analizado por métodos estadísticos donde los datos sirvan para tomar las decisiones correctas para la gestión de Mantenimiento y hacer los ajustes necesarios.

Se identificó y se dio a conocer las necesidades de cambio y la conveniencia de explorar acerca de la adopción de esta filosofía y estrategia de negocios. Es conveniente verificar la condición de partida de la organización, tomando en consideración la gran cantidad de actividades y prioridades que generalmente se tiene dentro de ella.

En la gestión del mantenimiento, la información concreta, el adecuado manejo de la documentación y el manejo de los registros de daños e intervenciones a los equipos, son de vital importancia para la toma de decisiones con mayor acierto

Al implementar la metodología de Seis Sigma a la gestión de Mantenimiento, se busca la minimización de las tareas emergentes y la ampliación del tiempo de intervención de los equipos, permitiendo al personal centrar sus conocimientos de actividades específicas de mejoramiento para aumentar la confiabilidad.

La relación producción-mantenimiento se hará más proactiva, lo cual redundará en beneficios para la compañía.

Gracias al uso de herramientas sistemáticas en la gestión del mantenimiento, se obtiene mayor agilidad en el proceso de recolección y manejo de la información, siendo esta una fuente valiosa en la toma de decisiones y en la programación y planeación del mantenimiento.

Es beneficioso hacer participe al personal de producción en las actividades de mantenimiento sistemático (limpieza, lubricación, inspecciones diarias). Esto proporciona un mayor grado de pertenencia y una herramienta valiosa en la detección de averías y propuestas de mejoras.

La tendencia de la globalización de las economías crea la necesidad de mejorar los procesos productivos o de servicios en todos los sectores, generando un alto grado de competitividad. La metodología de Seis Sigma en la gestión de Mantenimiento contribuye a esta necesidad, optimizando los procesos.

Este trabajo es básico, para toda empresa que desee implementar un modelo de gestión de mantenimiento basado en la metodología Seis Sigma, y desee obtener mejores resultados en sus procesos.

Con la implementación del modelo de Gestión de Mantenimiento, se asegura el ordenamiento del departamento de mantenimiento, logrando un manejo de información sistematizada, para procurar una mayor eficiencia y mejores resultados de gestión.

La estructura del modelo de Seis Sigma en la gestión de mantenimiento permite: Conocer los equipos de la organización, Conocer las averías que influyen en su vida útil, elegir el modo de mantenimiento a aplicar, la generación de valor a través de la unidad productiva de mantenimiento.

Es de gran importancia, contar con el talento humano para la realización de todas las actividades de mantenimiento, para lo cual debe brindarse apoyo, motivación, entrenamiento y capacitación, en los roles encaminados a la implementación de la metodología de Seis Sigma.

La administración del mantenimiento es una decisión estratégica del negocio no dependiente del tipo de organización cuyo fin es la rentabilidad para que los resultados puedan predecirse, medirse y por supuesto administrarse.

Seis Sigma es una metodología rigurosa que utiliza herramientas y métodos estadísticos, para definir los problemas y situaciones a mejorar, Medir para obtener la información y los datos, analizar la información recolectada, incorporar y emprender mejoras al o a los procesos y finalmente, controlar o rediseñar los procesos o productos existentes, con la finalidad de alcanzar etapas optimas lo que a su vez genere un ciclo de mejora continua.

BIBLIOGRAFIA

- ARCENIEGAS, Carlos. Mantenimiento Productivo Total. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2002
- AVILA E., Rubén. Fundamentos del mantenimiento. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores, México (1995).
- BARBA, Enric. Seis Sigma – Una iniciativa de calidad total. Editorial Gestión 2000. Barcelona (2000).
- BARBA, Enric. La excelencia en el proceso de desarrollo de nuevos productos. Editorial Gestión 2000. Barcelona (2001).
- BREYFOGLE, F. W. Implementing Six Sigma: smarter solutions using statistical Methods. Editorial Jhon Wiley y Sons. 2000.
- CUATRECASAS, Lluís. Gestión integral de la calidad. Implantación, control y certificación. Editorial Gestión 200. Barcelona (1999).
- ECKES, George, The Six Sigma Revolution. Editorial John Wiley y Sons. 2000.
- ESCALANTE VAZQUEZ, Edgardo J. Seis Sigma-Metodología y Técnicas. México: Editorial LIMUSA, S. A. de C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES, 1995.
- FUKUDA, Ryuji. Ingeniería de dirección: Técnicas para mejorar la calidad y la productividad en las áreas de trabajo. Editorial Tecnologías de Gerencia y Producción. Madrid (1990).
- GONZALEZ BOHORQUEZ, Carlos Ramón. Principios de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (2001).
- GONZALEZ BOHORQUEZ, Carlos Ramón. Seminario IV: Evaluación de la investigación. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (1998).
- GONZALEZ JAIMES, Isnardo. Seminario I: La investigación Científica. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (2001).
- GONZALEZ JAIMES, Isnardo. Seminario II: Monografía de especialización. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (1998)

GONZALEZ JAIMES, Isnardo. Seminario III: Monografía de especialización. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (1998).

HARRY, Mikel J. The Vision of Six Sigma, case Studies and Applications. Editorial Sigma Publishing Company

MARTINEZ CLEVEZ, William. Mantenimiento Predictivo – Termografía. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (2002).

MOJICA, Melquicedec. Mantenimiento Predictivo – Análisis de vibraciones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (2002).

MORA, Luís Alberto; HIGUITA, Camilo. Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. Medellín. 2002 135p Ensayo.

ORTIZ, German. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (2002).

PANDE, Peter; NEUMAN, Robert; y CAVANAGH, Roland R. The six Sigma Way. How GE, Motorola and other Companies are Having their performance. Ed. McGraw-Hill, 2000.

PEREZ-WILSON, Mario. Six Sigma: Understanding the concept implications and challenges, advanced Systems Co, 1999.

PFEIFER, Tilo; TORRES Fernando. Manual de Gestión e ingeniería de calidad. Editorial Mira Editores, Zaragoza (1999).

PINILLA CELIS, Pablo. Sistema de información en Mantenimiento. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga (2002).

PYZDEC, Thomas. The Complete Guide to six Sigma.

SADERRA JORBA, Lluís. La Calidad Total. Editorial Técnicas Rede. S.A. Barcelona (1994).

SANTAMARIA DE LA CRUZ, Aleck. Sistemas de información – MCC. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (2002).

SCHOEDER, Roger. Six Sigma Quality Improvement, 1st World Conference on Production Operation Management. Sevilla (2000).

SHINGO, Shigeo. Tecnologías para el cero defectos: Inspecciones en la fuente y el sistema poka-yoke. Editorial Tecnologías de gerencia y producción S.A. Madrid (1990).

SUZAKI, Kiyoshi. Competitividad en fabricación de la década de los 90. Técnicas para la mejora continúa. Editorial TGP. Madrid (1987).

TAMAYO DOMINGUEZ, Carlos Mario. Organizaciones del Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (2002).

TAMAYO DOMINGUEZ, Carlos Mario. Mantenimiento Preventivo. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (2002).

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Seminario-Mantenimiento Total Productivo. Bogota (2000).

WIREMAN, Terry. Desarrollo de Indicadores de desempeño para administración de mantenimiento. Ed. Rojas Eberhard Editores. 2001

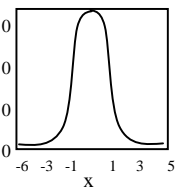
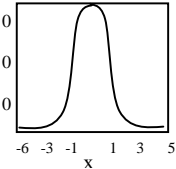
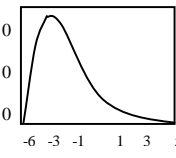
WU, Yuin y WU, Alan. Diseño robusto utilizando los métodos Taguchi. Editorial Díaz de Santos, Madrid (1997).

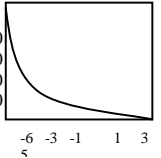
ANEXOS

ANEXO A. DISTRIBUCIÓN DISCRETA MÁS APLICADA

| Nombre de la Distribución | Formula aplicada | Primer momento | Segundo momento | Observaciones |
|---------------------------|---|----------------|---------------------------------|--|
| Binomial | $p(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$ | np | $Np(1-p)$ | P Porcentaje de no conformes |
| Poisson | $p(X = x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$ | λ | λ | λ Promedio del numero de no conformidades |
| Hipergeometrica | $p(X = x) = \frac{\binom{k}{x} \binom{N-k}{n-x}}{\binom{N}{n}}$ | $\frac{nk}{N}$ | $\frac{nk(N-k)(N-n)}{N^2(N-1)}$ | K no conformes del lote N |
| Geométrica | $p(X = x) = p^x (1-p)$ | $\frac{1}{p}$ | $\frac{1-p}{p^2}$ | P Porcentaje de no conformes |
| Binomial negativa | $p(X = x) = \binom{n-x}{r-1} p^x (1-p)^r$ | $\frac{r}{p}$ | $\frac{r(1-p)}{p^2}$ | P Porcentaje de no conformes |

ANEXO B. DISTRIBUCIÓN CONTINÚA MÁS UTILIZADAS

| Nombre de la distribución | Formula aplicada | Primer momento | Segundo momento | observaciones | Gráficas |
|---------------------------|--|-----------------------|-------------------------|--|---|
| Normal | $N(x, \nu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\nu}{\sigma}\right]^2}$ $-\infty \leq x \leq \infty$ $-\infty \leq \nu \leq \infty$ $\sigma \geq 0$ $F(z) = p(Z \leq z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\nu}{\sigma}\right]^2}$ | $E(x) = \mu$ | $V(x) = \sigma$ | Es la distribución mas utilizada sobre todo los fenómenos físicos |  |
| Normal estándar | $N(z, 0, 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2}$ $-\infty \leq x \leq \infty$ $\nu = 0$ $\sigma = 1$ $F(z) = p(Z \leq z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2}$ | $E(z) = \mu$ | $V(z) = \sigma^2 = 1$ | Es la distribución mas utilizada sobre todo en fenómenos físicos en este caso se estandariza la variable. X es la variable Z, de la siguiente forma $z = \frac{x - \nu}{\sigma}$ |  |
| Gama | $G(x, \theta, \sigma) = \frac{1}{\tau(\sigma)\theta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\theta}}$ $x > 0$ $\theta, \alpha > 0$ $F(x, \theta, \alpha) = p(x \leq x) = 1 - \left[\frac{1 + \frac{x}{\theta} + \frac{1}{2}\left(\frac{x}{\theta}\right)^2 + \frac{1}{6}\left(\frac{x}{\theta}\right)^3 + \dots}{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\alpha-1}} \right] e^{-\frac{x}{\theta}}$ | $E(x) = \alpha\theta$ | $V(x) = \alpha\theta^2$ | Es la distribución mas utilizada sobre todo los fenómenos físicos | Para $\sigma = 2$ y $\Theta = 1$  |

| | | | | | |
|-------------|--|-----------------|-------------------|---|---|
| Exponencial | $E(x, \theta) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{x}{\theta}}$ $x > 0$ $\theta > 0$ $F(x, \theta) = P(X \leq x) = 1 - e^{-\frac{x}{\theta}}$ | $E(x) = \theta$ | $V(x) = \theta^2$ | Tiempo de servicio, tiempo de vida de un objeto | Caso particular de la distribución Gama $\alpha = 1$ $\Theta = 1$  |
|-------------|--|-----------------|-------------------|---|---|

ANEXO C. TABLA DE KOLMOROV SMIRNOV LILLIEFORS

| Tamaño de la muestra n | Nivel de significancia | | | | |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.01 |
| 4 | 0.300 | 0.319 | 0.352 | 0.381 | 0.417 |
| 5 | 0.285 | 0.299 | 0.315 | 0.337 | 0.405 |
| 6 | 0.265 | 0.277 | 0.294 | 0.319 | 0.364 |
| 7 | 0.247 | 0.258 | 0.276 | 0.300 | 0.348 |
| 8 | 0.233 | 0.244 | 0.261 | 0.285 | 0.331 |
| 9 | 0.223 | 0.233 | 0.249 | 0.271 | 0.311 |
| 10 | 0.215 | 0.224 | 0.239 | 0.258 | 0.294 |
| 11 | 0.206 | 0.217 | 0.230 | 0.249 | 0.284 |
| 12 | 0.199 | 0.212 | 0.223 | 0.242 | 0.275 |
| 13 | 0.190 | 0.202 | 0.214 | 0.234 | 0.268 |
| 14 | 0.183 | 0.194 | 0.207 | 0.227 | 0.261 |
| 15 | 0.177 | 0.187 | 0.201 | 0.220 | 0.257 |
| 16 | 0.173 | 0.182 | 0.195 | 0.213 | 0.250 |
| 17 | 0.169 | 0.177 | 0.189 | 0.206 | 0.245 |
| 18 | 0.166 | 0.173 | 0.184 | 0.200 | 0.239 |
| 19 | 0.163 | 0.169 | 0.179 | 0.195 | 0.235 |
| 20 | 0.160 | 0.166 | 0.174 | 0.190 | 0.231 |
| 25 | 0.149 | 0.153 | 0.165 | 0.180 | 0.203 |
| 30 | 0.131 | 0.136 | 0.144 | 0.161 | 0.187 |
| > 30 | $\frac{0.736}{\sqrt{n}}$ | $\frac{0.768}{\sqrt{n}}$ | $\frac{0.805}{\sqrt{n}}$ | $\frac{0.886}{\sqrt{n}}$ | $\frac{1.031}{\sqrt{n}}$ |

ANEXO D. DISTRIBUCIÓN DE MUESTREO

| Nombre | Estadístico aplicada | Nombre | Funcione de probabilidad |
|------------------|---|------------------------------------|---|
| Para la medida | $z = \frac{x - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$ | Normal estándar Para la muestra | $N(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2}$ $-\infty \leq x \leq \infty$ $-\infty \leq x \leq \infty \quad \sigma \geq 0$ |
| | $t = \frac{x - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$ | t student | $f(t, \nu) = \frac{\tau[(\nu+1)/2]}{\sqrt{\pi\nu}\tau[(\nu/2)]} \left[1 + (t^2/\nu)\right]^{-\frac{(\nu+1)}{2}}$ $\nu > 0 \quad -\infty \leq t \leq \infty$ |
| Para la varianza | $X^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2}$ | Ji-cuadrado | $f(y, n-1) = \frac{1}{\tau[(n-1)/2] 2^{\frac{(n-1)}{2}}} y^{\frac{n-1}{2}} e^{-\frac{y}{2}}$ $x > 0$ |
| | $F = \frac{s^2_1}{s^2_2}$ | F De fisher | $f(f, \nu_1, \nu_2) = \frac{\tau[(\nu_1 + \nu_2)/2] \nu_1^{\frac{\nu_1}{2}} \nu_2^{\frac{\nu_2}{2}}}{\sqrt{\pi\nu}\tau[(\nu/2)]} f^{\frac{\nu_1-2}{2}} (\nu_2 + \nu_1 f)^{-\frac{(\nu_1+\nu_2)}{2}}$ $\nu > 0$ $-\infty \leq t \leq \infty$ |

ANEXO E. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MODELO DE REGRESIÓN

| Fuente de Variación | Grados de de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Valor F |
|------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---|
| Regresión | p | $SS_{\text{regresión}}$ | $\frac{SS_{\text{regresión}}}{p}$ | $f = \frac{\frac{SS_{\text{regresión}}}{p}}{\frac{SS_{\text{error}}}{(n-p)}}$ |
| Error | $n - p$ | SS_{error} | $\frac{SS_{\text{error}}}{(n-p)}$ | |
| Total | $n - 1$ | SS_{total} | | |

ANEXO F. DISTRIBUCIÓN JI-CUADRADA

| v | 0,005 | 0,01 | 0,025 | 0,05 | 0,1 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 0,9 | 0,95 | 0,975 | 0,99 | 0,995 |
|------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 0,002 | 0,001 | 0,0039 | 0,0158 | 0,1015 | 0,4549 | 1,3233 | 2,7055 | 3,8415 | 5,0239 | 6,6349 | 7,8794 |
| 2 | 0,01 | 0,0201 | 0,0506 | 0,1026 | 0,2107 | 0,5754 | 1,3863 | 2,7726 | 4,6052 | 5,9915 | 7,3778 | 9,2103 | 10,5966 |
| 3 | 0,0717 | 0,1148 | 0,2158 | 0,3518 | 0,5844 | 1,2125 | 2,366 | 4,1083 | 6,2514 | 7,8147 | 9,3484 | 11,3449 | 12,8382 |
| 4 | 0,207 | 0,2971 | 0,4844 | 0,7107 | 1,0636 | 1,9226 | 3,3567 | 5,3853 | 7,7794 | 9,4877 | 11,1433 | 13,2767 | 14,8603 |
| 5 | 0,4117 | 0,5543 | 0,8312 | 1,1455 | 1,6103 | 2,6746 | 4,3515 | 6,6257 | 9,2364 | 11,0705 | 12,8325 | 15,0863 | 16,7496 |
| 6 | 0,6757 | 0,8721 | 1,2373 | 1,6354 | 2,2041 | 3,4546 | 5,3481 | 7,8408 | 10,6446 | 12,5916 | 14,4494 | 16,8119 | 18,5476 |
| 7 | 0,9893 | 1,239 | 1,6899 | 2,1673 | 2,8331 | 4,2549 | 6,3458 | 9,0371 | 12,017 | 14,0671 | 16,0128 | 18,4753 | 20,2777 |
| 8 | 1,3444 | 1,6465 | 2,1797 | 2,7326 | 3,4895 | 5,0706 | 7,3441 | 10,2189 | 13,3616 | 15,5073 | 17,5345 | 20,0902 | 21,955 |
| 9 | 1,7349 | 2,0879 | 2,7004 | 3,3251 | 4,1682 | 5,8988 | 8,3428 | 11,3888 | 14,6837 | 16,919 | 19,0228 | 21,666 | 23,5894 |
| 10 | 2,1559 | 2,5582 | 3,247 | 3,9403 | 4,8652 | 6,7372 | 9,3418 | 12,5489 | 15,9872 | 18,307 | 20,4832 | 23,2093 | 25,1882 |
| 11 | 2,6032 | 3,0535 | 3,8157 | 4,5748 | 5,5778 | 7,5841 | 10,341 | 13,7007 | 17,275 | 19,6751 | 21,92 | 24,725 | 26,7568 |
| 12 | 3,0738 | 3,5706 | 4,4038 | 5,226 | 6,3038 | 8,4384 | 11,3403 | 14,8454 | 18,5493 | 21,0261 | 23,3367 | 26,217 | 28,2995 |
| 13 | 3,565 | 4,1069 | 5,0088 | 5,8919 | 7,0415 | 9,2991 | 12,3398 | 15,9839 | 19,8119 | 22,362 | 24,7356 | 27,6882 | 29,8195 |
| 14 | 4,0747 | 4,6604 | 5,6287 | 6,5706 | 7,7895 | 10,1653 | 13,3393 | 17,1169 | 21,0641 | 23,6848 | 26,1189 | 29,1412 | 31,3193 |
| 15 | 4,6009 | 5,2293 | 6,2621 | 7,2609 | 8,5468 | 11,0365 | 14,3389 | 18,2451 | 22,3071 | 24,9958 | 27,4884 | 30,5779 | 32,8013 |
| 16 | 5,1422 | 5,8122 | 6,9077 | 7,9616 | 9,3122 | 11,9122 | 15,3385 | 19,3689 | 23,5418 | 26,2962 | 28,8454 | 31,9999 | 34,2672 |
| 17 | 5,6972 | 6,4078 | 7,5642 | 8,6718 | 10,0852 | 12,7919 | 16,3382 | 20,4487 | 24,769 | 27,5871 | 30,191 | 33,4087 | 35,7185 |
| 18 | 6,2648 | 7,0149 | 8,2307 | 9,3905 | 10,8649 | 13,6753 | 17,3379 | 21,6049 | 25,9894 | 28,8693 | 31,5264 | 34,8053 | 37,1565 |
| 19 | 6,844 | 7,6327 | 8,9065 | 10,117 | 11,6509 | 14,562 | 18,3377 | 22,7178 | 27,2036 | 30,1435 | 32,8523 | 36,1909 | 38,5823 |
| 20 | 7,4338 | 8,2604 | 9,5908 | 10,8508 | 12,446 | 15,4518 | 19,3374 | 23,8277 | 28,412 | 31,4104 | 34,1696 | 37,5662 | 39,9968 |
| 21 | 8,0337 | 8,8972 | 10,2829 | 11,5913 | 13,2396 | 16,3444 | 20,3372 | 24,9348 | 29,6151 | 32,6706 | 35,4789 | 38,9322 | 41,4011 |
| 22 | 8,6427 | 9,5425 | 10,9823 | 12,338 | 14,0415 | 17,2396 | 21,337 | 26,0393 | 30,8133 | 33,9244 | 36,7807 | 40,2894 | 42,7957 |
| 23 | 9,2604 | 10,1957 | 11,6886 | 13,0905 | 14,848 | 18,1373 | 22,3369 | 27,1413 | 32,0069 | 35,1725 | 38,0756 | 41,6384 | 44,1813 |
| 24 | 9,8862 | 10,8564 | 12,4012 | 13,8484 | 15,6587 | 19,0373 | 23,3367 | 28,2412 | 33,1962 | 36,415 | 39,3641 | 42,9798 | 45,5585 |
| 25 | 10,5197 | 11,524 | 13,1197 | 14,6114 | 16,4734 | 19,9393 | 24,3366 | 29,3389 | 34,3816 | 37,6525 | 40,6465 | 44,3141 | 46,9279 |
| 26 | 11,1602 | 12,1981 | 13,8439 | 15,3792 | 17,2919 | 20,8434 | 25,3365 | 30,4346 | 35,5632 | 38,8851 | 41,9232 | 45,6417 | 48,2899 |
| 27 | 11,8076 | 12,8785 | 14,5734 | 16,1514 | 18,1139 | 21,7494 | 26,3363 | 31,5284 | 36,7412 | 40,1133 | 43,1945 | 46,9629 | 49,6449 |
| 28 | 12,4613 | 13,5647 | 15,3079 | 16,9279 | 18,9392 | 22,6572 | 27,3362 | 32,6205 | 37,9159 | 41,3371 | 44,4608 | 48,8782 | 50,9934 |
| 29 | 13,1211 | 14,2565 | 16,0471 | 17,7084 | 19,7677 | 23,5666 | 28,3361 | 33,7109 | 39,0875 | 42,557 | 45,7223 | 49,5879 | 52,3356 |
| 30 | 13,7867 | 14,9535 | 16,7908 | 18,4927 | 20,5992 | 24,4776 | 29,336 | 34,7997 | 40,256 | 43,773 | 46,9792 | 50,8922 | 53,672 |
| 35 | 17,1918 | 18,5089 | 20,5694 | 22,465 | 24,7967 | 29,054 | 34,3356 | 40,2228 | 46,0588 | 49,8018 | 53,2033 | 57,3421 | 60,2748 |
| 40 | 20,7065 | 22,1643 | 24,433 | 26,5093 | 29,0505 | 33,6603 | 39,3353 | 45,616 | 51,8051 | 55,7585 | 59,3417 | 63,6907 | 66,766 |
| 50 | 27,9907 | 29,7067 | 32,3574 | 34,7643 | 37,6886 | 42,9421 | 49,3349 | 56,3336 | 63,1671 | 67,5048 | 71,4202 | 76,1539 | 79,49 |
| 60 | 35,5345 | 37,4849 | 40,4817 | 43,188 | 46,4589 | 52,2938 | 59,3347 | 66,9815 | 74,397 | 79,0819 | 83,2977 | 88,3794 | 91,9517 |
| 80 | 51,1719 | 53,5401 | 57,1532 | 60,3915 | 64,2778 | 71,1445 | 79,3343 | 88,1303 | 96,5782 | 101,8795 | 106,6286 | 112,3288 | 116,3211 |
| 90 | 59,1963 | 61,7541 | 65,6466 | 69,126 | 73,2911 | 80,6247 | 89,3342 | 98,6499 | 107,565 | 113,1453 | 118,1359 | 124,1163 | 128,2989 |
| 100 | 67,3276 | 70,0649 | 74,2219 | 77,9295 | 82,3581 | 90,1332 | 99,3341 | 109,1412 | 118,498 | 124,3421 | 129,5612 | 135,8067 | 140,1695 |
| 200 | 152,241 | 156,432 | 162,728 | 168,2786 | 174,835 | 186,1717 | 199,3337 | 213,1022 | 226,021 | 233,9943 | 241,0579 | 249,4451 | 255,2642 |
| 300 | 240,663 | 245,9725 | 253,912 | 260,8781 | 269,068 | 283,1353 | 299,3336 | 316,1384 | 331,7885 | 341,3951 | 349,8745 | 359,9064 | 366,8444 |
| 400 | 330,903 | 337,1553 | 346,482 | 354,641 | 364,207 | 380,5767 | 399,3336 | 418,6969 | 436,649 | 447,6325 | 457,3055 | 468,7245 | 476,6064 |
| 500 | 422,303 | 429,3875 | 439,936 | 449,1468 | 459,926 | 478,323 | 499,3335 | 520,9505 | 540,9303 | 553,1268 | 563,8515 | 576,4928 | 585,2066 |
| 600 | 514,529 | 522,3651 | 534,019 | 544,1801 | 556,056 | 576,2859 | 599,3335 | 622,9876 | 644,8004 | 658,0936 | 669,7692 | 683,5156 | 692,9816 |
| 700 | 607,38 | 615,9075 | 628,577 | 639,6131 | 652,497 | 674,4128 | 699,3335 | 724,8607 | 748,3591 | 762,6607 | 775,2107 | 789,9735 | 800,1314 |
| 800 | 700,725 | 709,8969 | 723,513 | 735,3624 | 749,185 | 772,6694 | | 826,604 | 851,6712 | 866,9114 | 880,2753 | 895,9843 | 906,7862 |
| 900 | 794,475 | 804,2518 | 818,756 | 831,3702 | 846,075 | 871,0321 | | 928,2413 | 954,7819 | 970,9036 | 985,032 | 1,001,63 | 1,013,04 |
| 1000 | 888,564 | 898,9125 | | 927,5944 | 943,133 | | | | 1,057,72 | 1,074,68 | 1,089,53 | 1,106,97 | 1,118,95 |