



# **UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

### **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**CAPACIDAD DE PROCESO EN ANÁLISIS DE VISCOSIDAD  
CINEMÁTICA POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ATÓMICA  
Y FT-IR DE ACEITE LUBRICANTE DEL MOTOR DE UN  
TRACTOR D8T PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. CARLOS HUMBERTO JULI QUISPE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2020**



## DEDICATORIA

*A Dios y Jesucristo nuestro señor por ser mi fortaleza y fuente de apoyo cuando sentía que no podía alcanzar mis sueños y metas.*

*Con mucho cariño a mi principal tesoro, mi madre Claudia Maritza, en reconocimiento a sus múltiples esfuerzos, ayuda constante, aliento moral, su gran paciencia y comprensión que ayudó a forjar mis aprendizajes, culminación de mi profesión y realización de este trabajo.*

*A mis tíos Lourdes S. y Abel por sus consejos, palabras de aliento y apoyo anímico.*

*A mis hermanos: Alexander y Madeleine M. por acompañarme, brindarme siempre su apoyo y a mis fieles compañeras de cuatro patitas.*

*A mis amigos Oscar y Nilton por su tiempo compartido desde el inicio de esta gran carrera de la ingeniería química, a mis amigos de la FNI – UTO Bolivia de las carreras de Ingeniería de Procesos Químicos, Moisés y Diana, e Ingeniería metalúrgica y unos cuantos amigos de la UNA, no es necesario mencionarlos porque ellos saben quiénes son.*

*A mi adorada Astrid K. por su paciencia, aliento, cuidados y confianza en mí.*

*A las memorias de María Vicentina & Lyly QEPD*

**Carlos Humberto**



## AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer primeramente a Dios, por darme la grandiosa dicha de la vida que me permite seguir avanzando y vivir cada día nuevas experiencias con mis seres queridos.

Este Proyecto de Tesis de la capacidad de proceso en el aceite lubricante ha sido posible gracias a la colaboración y enseñanzas de la Ingeniera Nohely Dina Gómez Velásquez Jefa del Laboratorio de Lubricantes de la Empresa MUR-WY S.A.C, que me enseñó la importancia del análisis en los aceites lubricantes, además de guiarme siempre con su experiencia y ejemplo, en el tiempo de mi permanencia bajo su supervisión.

Al área de producción de la Empresa CAL & CEMENTO SUR S.A. por ayudarme en la consolidación de los conocimientos aplicados a la ingeniería de procesos y el estricto control de variables aplicado en los procesos, guiado por los ingenieros de planta.

A las diferentes áreas de AEROPUERTOS ANDINOS DEL PERÚ - JULIACA, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, brindándome muchos puntos de vistas necesarios para el aprendizaje y entendimiento como persona y profesional.

A los Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la UNA – Puno, los cuales contribuyeron en mi formación profesional.

A mis Jurados de Tesis Dra. Lidia Ensueño Romero Iruri, M.Sc. Janette Rosario Ramos Pineda, al M.Sc. José Néstor Mamani Quispe, por sus correcciones y excelentes aportes a esta tesis; asimismo al director/asesor de tesis al M.Sc. Salomón Tito León, en sus aportes y su experiencia que fue muy importante.

*Carlos Humberto*



## ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 19**

**ABSTRACT..... 20**

### **CAPITULO I**

#### **INTRODUCCIÓN**

**1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 23**

1.1.1 Formulación del problema ..... 23

1.1.2 Problemas específicos ..... 24

**1.2 ANTECEDENTES ..... 24**

1.2.1 Antecedentes internacionales ..... 24

1.2.2 Antecedentes nacionales ..... 30

**1.3 OBJETIVOS..... 32**

1.3.1 Objetivo general..... 32

1.3.2 Objetivos específicos ..... 32

**1.4 JUSTIFICACIÓN ..... 32**

1.4.1 Justificación del proyecto ..... 34

1.4.2 Justificación ambiental ..... 34



1.4.3 Justificación social.....	35
1.4.4 Justificación tecnológica.....	35

## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

<b>2.1 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>36</b>
2.1.1 Lubricante .....	36
2.1.2 Tipos de sustancias lubricantes.....	36
2.1.3 Función del aceite lubricante .....	37
2.1.4 Composición de un aceite lubricante .....	37
2.1.5 Bases lubricantes.....	38
2.1.6 Propiedades de los aceites lubricantes .....	38
2.1.7 Espectrometría infrarroja con transformada de fourier en aceites lubricantes .....	45
2.1.8 Espectrometría de emisión atómica .....	51
2.1.9 Z. Bench.....	57
2.1.10 La capacidad de proceso .....	58
2.1.11 Límites de control y límites condenatorios.....	62
<b>2.2 MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>63</b>
2.2.1 Definición de términos.....	63
<b>2.3 HIPOTESIS.....</b>	<b>70</b>
2.3.1 Hipótesis general.....	70
2.3.2 Hipótesis específica .....	70



## CAPITULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1 GENERALIDADES.....</b>	<b>71</b>
<b>3.2 MATERIALES Y EQUIPO .....</b>	<b>71</b>
3.2.1 Equipos .....	71
3.2.2 Materiales.....	72
i. Recolección de muestras .....	73
ii. Procedimiento de muestreo del aceite .....	73
iii. Análisis de viscosidad cinemática a 100 °C .....	77
iv. Análisis por espectrometría FT-IR .....	79
v. Análisis por espectrometría de emisión atómica (EEA).....	81
vi. Recopilación de datos .....	84
vii. Ámbito de estudio .....	85
viii. Condiciones ambientales de trabajo .....	85
<b>3.3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>85</b>
3.3.1 Obtención y evaluación de los límites de control y los análisis de capacidades empleando los datos de las características fisicoquímicas del aceite los metales producto de desgaste y contaminantes del aceite lubricante.....	85
3.3.2 Evaluación de datos fuera de los parámetros de los límites de control para crear un historial de confiabilidad para el mantenimiento preventivo.....	92
3.3.3 Optimizar el análisis de los límites condensorios para la implementación de un plan de mantenimiento preventivo en el motor de un tractor D8T .....	93
3.3.4 Diagrama de flujos.....	96



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1 OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONTROL Y EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN LOS DATOS DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS METALES DE DESGASTE Y CONTAMINANTES. ....</b>	<b>97</b>
<b>4.2 EVALUACIÓN DE LOS DATOS FUERA DE LOS PARÁMETROS EN LOS LÍMITES DE CONTROL PARA LA CREACIÓN DE UN HISTORIAL DE CONFIABILIDAD PARA EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO. ....</b>	<b>120</b>
<b>4.3 OPTIMIZAR EL ANÁLISIS DE LOS LÍMITES CONDENATORIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN EL MOTOR DE UN TRACTOR D8T. ....</b>	<b>125</b>
4.3.1 Resumen de resultados del análisis de capacidad del motor .....	139
4.3.2 Resumen de los límites condenatorios .....	140
4.3.3 Resumen de resultados y comparativas .....	141
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>142</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>144</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>145</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>154</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>154</b>
<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>156</b>
<b>ANEXO 3 .....</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO 4 .....</b>	<b>158</b>
<b>ANEXO 5 .....</b>	<b>161</b>



<b>ANEXO 6</b> .....	<b>164</b>
<b>ANEXO 7</b> .....	<b>165</b>
<b>ANEXO 8</b> .....	<b>166</b>
<b>ANEXO 9</b> .....	<b>168</b>
<b>ANEXO 10</b> .....	<b>171</b>
<b>ANEXO 11</b> .....	<b>172</b>
<b>ANEXO 12</b> .....	<b>173</b>
<b>ANEXO 13</b> .....	<b>174</b>
<b>ANEXO 14</b> .....	<b>183</b>
<b>ANEXO 15</b> .....	<b>209</b>
<b>ANEXO 16</b> .....	<b>248</b>

**Área: Ciencias de la ingeniería**

**Línea: Ingeniería de procesos**

**FECHA DE SUSTENTACIÓN: 10 de Setiembre del 2020**



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de comportamiento viscosidad-temperatura para aceites con diferente índice de viscosidad .....	43
Figura 2. Características aproximadas de vida-temperatura de un aceite mineral: aceite A sin antioxidante, aceite B con antioxidante .....	45
Figura 3. Sustracción espectral de oxidación, nitración sulfatación y fosfatos antidesgaste sustracción espectral de oxidación, nitración sulfatación y fosfatos antidesgaste.....	50
Figura 4. Movimiento de electrón en átomo excitado por energía externa alta.....	52
Figura 5. Espectro de emisión del hidrógeno .....	52
Figura 6. Espectro de emisión del hierro .....	52
Figura 7. Muestra del espectrómetro con la muestra de aceite siendo quemada .....	54
Figura 8. Extracción de muestra de aceite lubricante .....	73
Figura 9. Cerrado de frasco de muestra de aceite lubricante .....	74
Figura 10. Rotulado de muestra.....	74
Figura 11. Etiquetado de muestra .....	74
Figura 12. Recipiente de transporte de muestra.....	75
Figura 13. Envío de muestra para análisis .....	75
Figura 14. Análisis de aceite lubricante en el viscosímetro.....	77
Figura 15. Capilares con muestras de aceite lubricante.....	78
Figura 16. Equipo FT-IR .....	80
Figura 17. Varilla de grafito con rodamiento de grafito y black cup con muestra de aceite lubricante. ....	82
Figura 18. Equipo de análisis por espectrometría de emisión atómica (EEA). ....	84



Figura 19. Gráfica de normalidad de variables.....	87
Figura 20. Capability Sixpack .....	87
Figura 21. Gráfica Xbarra.....	88
Figura 22. Gráfica R .....	88
Figura 23. Gráfica de subgrupos.....	88
Figura 24. Gráfica de probabilidad normal.....	89
Figura 25. Histograma de capacidad.....	90
Figura 26. Intervalo de tolerancia .....	91
Figura 27. Análisis de capacidad .....	92
Figura 28. Distribución de las medias muestrales .....	93
Figura 29. SPC Tres sigma o distribución de Límites de control normal.....	95
Figura 30. Diagrama de Flujo de Proceso.....	96
Figura 31. Tendencia viscosidad a 100°C. ....	98
Figura 32. Z. Bench para viscosidad a 100°C.....	98
Figura 33. Cpk & Ppk para viscosidad a 100°C .....	99
Figura 34. Tendencia de nitración .....	100
Figura 35. Tendencia de oxidación.....	101
Figura 36. Tendencia de hollín .....	102
Figura 37. Tendencia de sulfatación .....	103
Figura 38. Tendencia de TBN.....	104
Figura 39. Z. BENCH para FT-IR .....	105
Figura 40. Cpk & Ppk para FT-IR .....	106
Figura 41. Tendencia de desgaste de cobre .....	107



Figura 42. Tendencia de desgaste de hierro.....	108
Figura 43. Tendencia de desgaste de cromo .....	109
Figura 44. Tendencia de desgaste de aluminio .....	110
Figura 45. Tendencia de desgaste de plomo .....	111
Figura 46. Tendencia de contaminación por silicio.....	112
Figura 47. Tendencia de contaminación por sodio .....	113
Figura 48. Cantidad de metales de desgaste analizados .....	114
Figura 49. Análisis de metales contaminantes .....	115
Figura 50. Z. BENCH metales.....	116
Figura 51. Cpk & Ppk para metales .....	117
Figura 52. Z. BENCH para metales contaminantes.....	118
Figura 53. Comparación de mejora Cpk & Ppk para metales contaminantes .....	119
Figura 54. Histograma General de causas asignables.....	120
Figura 55. Límites de control superior e inferior en la viscosidad a 100°C .....	126
Figura 56. Límites de control superior e inferior en la nitración .....	127
Figura 57. Límites de control superior e inferior en la oxidación .....	128
Figura 58. Límites de control superior e inferior en el Hollín .....	129
Figura 59. Límites de control superior e inferior en la sulfatación.....	130
Figura 60. Límites de control superior e inferior en el TBN .....	131
Figura 61. Límites de control superior e inferior en el desgaste de cobre .....	132
Figura 62. Límites de control superior e inferior en el desgaste de hierro .....	133
Figura 63. Límites de control superior e inferior en el desgaste de cromo.....	134
Figura 64. Límites de control superior e inferior en el desgaste de aluminio.....	135



Figura 65. Límites de control superior e inferior en el desgaste de plomo.....	136
Figura 66. Límites de control superior e inferior en la contaminación con silicio .....	137
Figura 67. Límites de control superior e inferior en la contaminación con sodio .....	138
Figura 68. Prueba de normalidad de la viscosidad del motor a 100°C.....	174
Figura 69. Capacidad sixpack del proceso en la viscosidad a 100°C .....	175
Figura 70. Prueba de normalidad de la viscosidad a 100°C .....	176
Figura 71. Capacidad sixpack del proceso en la viscosidad a 100°C .....	176
Figura 72. Prueba de normalidad de la viscosidad a 100°C .....	177
Figura 73. Capacidad sixpack del proceso en la viscosidad a 100°C .....	178
Figura 74. Prueba de normalidad de la viscosidad a 100°C .....	179
Figura 75. Capacidad sixpack del proceso en la viscosidad a 100°C .....	179
Figura 76. Intervalos de tolerancia para la viscosidad del motor a 100°C .....	180
Figura 77. Capacidad sixpack del proceso en la viscosidad a 100°C .....	181
Figura 78. Análisis de capacidad en la viscosidad a 100°C.....	181
Figura 79. Prueba de normalidad de nitración .....	183
Figura 80. Capacidad sixpack del proceso de nitración.....	184
Figura 81. Intervalos de tolerancia para nitración .....	185
Figura 82. Capacidad sixpack del proceso de nitración.....	186
Figura 83. Análisis de capacidad de la nitración .....	186
Figura 84. Prueba de normalidad oxidación .....	187
Figura 85. Capacidad sixpack del proceso oxidación.....	188
Figura 86. Prueba de normalidad de oxidación .....	189
Figura 86. Capacidad sixpack del proceso de oxidación .....	189



Figura 88. Intervalos de tolerancia para oxidación.....	190
Figura 89. Capacidad sixpack del proceso oxidación.....	191
Figura 90. Análisis de capacidad en la oxidación.....	191
Figura 91. Prueba de normalidad de hollín.....	192
Figura 92. Capacidad sixpack del proceso de hollín .....	193
Figura 93. Prueba de normalidad de hollín.....	194
Figura 94. Capacidad sixpack del proceso hollín .....	194
Figura 95. Prueba de normalidad hollín.....	195
Figura 96. Capacidad sixpack del proceso hollín .....	196
Figura 97. Intervalos de tolerancia para hollín .....	197
Figura 98. Capacidad sixpack del proceso de hollín .....	197
Figura 99. Análisis de capacidad hollín.....	198
Figura 100. Prueba de normalidad sulfatación .....	199
Figura 101. Capacidad sixpack de proceso sulfatación .....	199
Figura 102. Prueba de normalidad sulfatación .....	200
Figura 103. Capacidad sixpack del proceso sulfatación .....	201
Figura 104. Intervalos de tolerancia sulfatación .....	202
Figura 105. Capacidad sixpack del proceso sulfatación .....	202
Figura 106. Análisis de capacidad en la sulfatación.....	203
Figura 107. Prueba de normalidad TBN.....	204
Figura 108. Capacidad sixpack de TBN .....	204
Figura 109. Prueba de normalidad TBN .....	205
Figura 110. Capacidad sixpack del proceso TBN.....	206



Figura 111. Intervalos de tolerancia para TBN.....	207
Figura 112. Capacidad sixpack del proceso de TBN.....	207
Figura 113. Análisis de capacidad TBN .....	208
Figura 114. Prueba de normalidad del desgaste de hierro .....	209
Figura 115. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de hierro.....	209
Figura 116. Prueba de normalidad del desgaste de hierro .....	210
Figura 117. Capacidad sixpack del proceso de desgaste de hierro.....	211
Figura 118. Prueba de normalidad del desgaste de hierro .....	212
Figura 119. Capacidad sixpack de proceso de desgaste de hierro .....	212
Figura 120. Prueba de normalidad del desgaste de hierro .....	213
Figura 121. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de hierro.....	214
Figura 122. Intervalos de tolerancia para desgaste de hierro.....	215
Figura 123. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de hierro.....	215
Figura 124. Análisis de capacidad en el desgaste de hierro.....	216
Figura 125. Prueba de normalidad del desgaste de cobre.....	217
Figura 126. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cobre.....	217
Figura 127. Prueba de normalidad del desgaste de cobre.....	218
Figura 128. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cobre.....	219
Figura 129. Intervalos de tolerancia para desgaste de cobre .....	220
Figura 130. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cobre.....	220
Figura 131. Análisis de capacidad en el desgaste de cobre .....	221
Figura 132. Prueba de normalidad del desgaste de aluminio .....	222
Figura 133. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de aluminio .....	222



Figura 134. Prueba de normalidad del desgaste de aluminio .....	223
Figura 135. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de aluminio .....	224
Figura 136. Prueba de normalidad del desgaste de aluminio .....	225
Figura 137. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de aluminio .....	225
Figura 138. Intervalos de tolerancia para desgaste de aluminio .....	226
Figura 139. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de aluminio .....	227
Figura 140. Análisis de capacidad en el desgaste de aluminio .....	227
Figura 141. Prueba de normalidad del desgaste de cromo .....	228
Figura 142. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cromo .....	229
Figura 143. Prueba de normalidad del desgaste de cromo .....	230
Figura 144. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cromo .....	230
Figura 145. Prueba de normalidad del desgaste de cromo .....	231
Figura 146. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cromo .....	232
Figura 147. Intervalos de tolerancia para desgaste de cromo .....	232
Figura 148. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cromo .....	233
Figura 149. Análisis de capacidad en el desgaste de cromo .....	233
Figura 150. Prueba de normalidad del desgaste de plomo .....	234
Figura 151. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de plomo .....	235
Figura 152. Intervalos de tolerancia para desgaste de plomo .....	236
Figura 153. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de plomo .....	236
Figura 154. Análisis de capacidad en el desgaste de plomo .....	237
Figura 155. Prueba de normalidad de contaminación con silicio .....	238
Figura 156. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con silicio .....	238



Figura 157. Prueba de normalidad de contaminación con silicio .....	239
Figura 158. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con silicio.....	240
Figura 159. Intervalos de tolerancia para contaminación con silicio.....	241
Figura 160. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con silicio.....	241
Figura 161. Análisis de capacidad en contaminación con silicio .....	242
Figura 162. Prueba de normalidad de contaminación con sodio .....	243
Figura 163. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con sodio.....	243
Figura 164. Prueba de normalidad de contaminación con sodio .....	244
Figura 165. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con sodio.....	245
Figura 166. Intervalos de tolerancia para contaminación con sodio.....	246
Figura 167. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con sodio.....	246
Figura 168. Análisis de capacidad de contaminación con sodio .....	247



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de la degradación de aceites lubricantes.....	27
Tabla 2. Unidades de la viscosidad cinemática .....	40
Tabla 3. Gráfico de índices de viscosidades comunes.....	42
Tabla 4. Lista de aditivos comunes usados en aceites lubricantes.....	56
Tabla 5. Aditivos en aceites lubricantes. ....	57
Tabla 6. Análisis FT-IR .....	79
Tabla 7. Longitudes de onda de metales de la base de datos del Spectroil Q100.....	83
Tabla 8. Frecuencia de muestreo de aceites lubricantes .....	84
Tabla 9. Causas Asignables .....	121
Tabla 10. Resultados de análisis de capacidad del motor.....	139
Tabla 11. Límites condenatorios.....	140
Tabla 12. Tabla comparativa de resultados obtenidos en diferentes investigaciones de acuerdo al Six Sigma .....	141



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

<b>ASTM</b>	Sociedad americana para pruebas y materiales
<b>ATF</b>	Aceite de transmisión de fluido
<b>Cpk</b>	Capacidad de proceso a corto plazo
<b>Ppk</b>	Capacidad de proceso a largo plazo
<b>EEA</b>	Espectrometría de emisión atómica
<b>FT-IR</b>	Infrarrojo por transformada de Fourier
<b>KPI</b>	Indicador clave de rendimiento
<b>LCS</b>	Límite de control superior
<b>LCI</b>	Límite de control inferior
<b>LES</b>	Límite de especificación superior
<b>LEI</b>	límite de especificación inferior
<b>PPM</b>	Partes por millón
<b>S</b>	Desviación estándar
<b>TBN</b>	Número total de bases
<b>Z.Bench</b>	Nivel Z para describir la capacidad sigma del proceso



## RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal aumentar la capacidad de proceso en los análisis de viscosidad cinemática espectrometrías infrarrojas por la transformada de Fourier y de emisión atómica en el aceite lubricante del motor de un tractor D8T para mantenimiento preventivo. Se aplicó el método de investigación longitudinal de tendencia donde se analiza el desarrollo en conjunto de las propiedades fisicoquímicas, metales de desgaste y contaminantes en función del tiempo donde se utilizan equipos para medir la viscosidad, espectrometrías de emisión atómica e infrarroja por la transformada de Fourier, posteriormente se realiza el tratamiento estadístico utilizando el software Minitab. Para la obtención y evaluación de los límites de control y los análisis de capacidad se emplearon los datos de las características fisicoquímicas metales de desgaste y contaminantes del aceite lubricante, cuya evaluación y compilación de datos fuera de los parámetros de límites de control se realizaron para crear un historial de confiabilidad para el mantenimiento preventivo y se analizaron los límites condenatorios para la implementación de un plan de mantenimiento preventivo óptimo del motor, los resultados obtenidos muestran el incremento de la capacidad de proceso y el valor sigma de: 23.85%-3.18 $\sigma$  en viscosidad; 23.08%-3.09 $\sigma$  en nitración, 55.32%-3.81 $\sigma$  en oxidación, 22.36%-3.12 $\sigma$  en hollín, 54.01%-3.84 $\sigma$  en sulfatación, 28.51%-3.21 $\sigma$  en TBN en las propiedades fisicoquímicas de aceite; 58.20%-4.02 $\sigma$  en hierro, 46.41%-3.66 $\sigma$  en cobre, 17.72%-3.00 $\sigma$  en aluminio, 11.98%-2.94 $\sigma$  en cromo, 33.19%-3.27 $\sigma$  en plomo en los metales de desgaste; 26.38%-3.18 $\sigma$  en silicio y 30.08%-3.27 $\sigma$  en los metales contaminantes. Se concluye de esta manera que se alarga la vida del motor de un tractor D8T controlando las propiedades del aceite lubricante y las capacidades de proceso y se optimiza el rendimiento de trabajo del aceite lubricante hasta el control límite de 250 horas.

**Palabras clave:** Aceite lubricante, viscosidad cinemática, FT-IR, emisión atómica, análisis de capacidad.



## ABSTRACT

This work of research has as main objective to increase the process capacity in the analysis of kinematic viscosity infrared spectrometry by the fourier transform and atomic emission in the lubricating oil of the engine of a D8T tractor for preventive maintenance. A longitudinal research method was applied, the development as a whole, for the physicochemical properties, wear metals and pollutants were analyzed based on the time when proper equipment is used to measure viscosity, fourier transform and atomic emission spectrometryies, and eventually, a statistic treatment is performed using Minitab software. To obtain and evaluate the control limits and the analysis of capacity, data on the physicochemical features of wear metals and pollutants of lubricating oil was used, whose, evaluation and compilation of data outside the parameters of control limits were also performed to create a history of reliability for preventive maintenance and condemnatory limits and to implement an optimal preventive maintenance plan for the engine, the results obtained show the increase in process capacity and the sigma value of: 23.85% -  $3.18\sigma$  in viscosity; 23.08% - $3.09\sigma$  in nitration, 55.32% - $3.81\sigma$  in oxidation, 22.36% - $3.12\sigma$  in soot, 54.01% - $3.84\sigma$  in sulfating, 28.51% - $3.21\sigma$  in TBN, in the physicochemical properties of oil; 58.20% - $4.02\sigma$  in iron, 46.41% - $3.66\sigma$  in copper, 17.72% - $3.00\sigma$  in aluminum, 11.98% - $2.94\sigma$  in chrome, 33.19% - $3.27\sigma$  in lead in wear metals; 26.38% - $3.18\sigma$  in silicon and 30.08% - $3.27\sigma$  in polluting metals. It is concluded that the engine life of a D8T tractor is lengthened by controlling the properties of lubricating oil and the process capacities; whereas the working performance of lubricating oil until limit control of 250 hours.

**Keywords:** Lubricating oil, kinematic viscosity, FT-IR, atomic emission, capacity analysis.



## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

Actualmente la demanda de petróleo es alta debido a la creciente industrialización, modernización y desarrollo, parte de este petróleo es usado en bases de aceites minerales para aplicaciones de trabajo de metales donde se puede incrementar la productividad actuando como lubricante para procesos de corte y conformado de metales. (Syahrullail, Kamitani, & Shakirin, 2013)

La lubricación del motor es el proceso para reducir el desgaste. La resistencia viscosa por fricción de movimiento es la carga aplicada entre superficies en el aceite lubricante. La lubricación desempeña la función de reducir el desgaste entre superficies y provee un funcionamiento continuo y suave. Cuando la condición de lubricación es alterada los componentes metálicos empiezan a rozarse destructivamente simultáneamente causando daños destructivos, sobrecalentamiento y fallas (Abdullah, Saleman, Tamaldin, & Suhaimi, 2013).

La concentración de metales de desgaste obtenido del aceite lubricante usado provee información vital considerando la causa y nivel del deterioro que existió y progresó en componentes mecánicos operativos, se afirma que la existencia de la severidad de metales de desgaste que aparecen actúan como catalizador que podría incrementar la velocidad de degradación de un aceite lubricante particular usado durante operación (Latip et al., 2013).



La implementación del análisis de aceite lubricante se utiliza para mejorar el monitoreo de condición y también se le da el uso como herramienta de mejora en el equipo, al elaborar un mapa de proceso actual del monitoreo de condición del aceite lubricante se obtiene realizando una herramienta técnica para mejorar la toma de decisiones del personal de mantenimiento en acciones preventivas utilizando conjuntamente el análisis de aceite lubricante y equipo (Mendoza Quispe, 2017).

Al aplicar el Six Sigma a la Gestión del Mantenimiento que se lleva a cabo en el área de mantenimiento se proponen las mejoras de los controles que deben llevarse, por lo que se busca que el control siga la ruta por el cual podemos llegar a la optimización de la productividad de las maquinarias y equipos diversos (Aguirre Parra, 2015).

El uso del Six Sigma por intermedio de sus herramientas, permite reducir la variabilidad en los procesos que se ven afectados por causas asignables por consiguiente reducir defectos en los procesos y con la finalidad de continuar mejorando a medida que se tiene mayor tiempo de desarrollo (Matzunaga Zamudio, 2017).

Es por ello plantearnos el objetivo de realizar la capacidad de proceso y establecer en base al historial de análisis del aceite lubricante Mobil Delvac MX 15w40 del motor mediante viscosidad cinemática espectrometría de emisión atómica e Infrarroja por la transformada de Fourier los límites de control superior y límites de control inferior para el mantenimiento preventivo de un tractor D8T.



## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1.1 Formulación del problema

La revolución en la industrialización en todo el mundo ha impulsado la utilización de maquinaria y ha desplazado la potencia muscular a máquinas. La actividad minera está relacionada con la explotación de minerales, metales, arenas bituminosas y demás material propio de la actividad minera (Imran et al. 2013). Para tal proceso se necesita que los equipos (maquinaria pesada) se desempeñen de forma confiable y eficaz para maximizar la producción y garantizar una operación segura evitando problemas mecánicos, el uso de máquinas en varios sectores, incluido también la actividad minera incrementó la demanda de lubricante por razones de funcionalidad y porque se emplean y utilizan sus resultados como herramienta para el mantenimiento preventivo (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Exxon Mobil Team, 2017). Los lubricantes actúan como un medio de anti-fricción, facilitando un trabajo fino, y se busca reducir los riesgos indeseables de fallas frecuentes y tener un mantenimiento confiable en las diferentes partes rotantes de la maquinaria, especialmente el motor. (Imran et al. 2013).

Los métodos de análisis aplicados para estos lubricantes son específicos, además que los fabricantes de estos aceites y las maquinarias brindan valores referenciales que se obtienen del aceite lubricante bajo operación, sin embargo, a falta de una compilación y posterior evaluación y sin un respectivo tratamiento estadístico de capacidad de proceso de los resultados de análisis del aceite lubricante que el motor brinda, no se podrá conocer ni mejorar el rendimiento de trabajo. Por consiguiente, en el presente proyecto de investigación, en busca de mejorar el problema rendimiento de operación ¿Será posible



elevar la capacidad de proceso empleando los resultados de análisis de viscosidad cinemática por la espectrometría de emisión atómica e Infrarroja FT-IR del aceite lubricante Mobil Delvac MX 15W40 para el mantenimiento preventivo del motor de un tractor D8T?

### **1.1.2 Problemas específicos**

- ¿Se obtendrán y evaluarán los límites de control y los análisis de capacidad empleando los datos de las características fisicoquímicas los metales producto de desgaste y contaminantes del aceite lubricante?
- ¿Se evaluarán los datos fuera de los parámetros en los límites de control para crear un historial de confiabilidad para el mantenimiento preventivo?
- ¿Se optimizará el análisis de los límites condenatorios para la implementación de un plan de mantenimiento preventivo en el motor de un tractor D8T?

## **1.2 ANTECEDENTES**

### **1.2.1 Antecedentes internacionales**

Elaborar un instrumento para el apoyo a la gestión de mantenimiento, en el cual relacionar principios teóricos y ensayos, permitir la selección y aplicación de los lubricantes para los equipos, recopilando información desde una óptica teórica práctica, para presentarla en forma ordenada de manera que sirve como una guía referente para el área de mantenimiento, que aborda la problemática de la lubricación en la industria con respecto a los metales de desgaste según la ASTM D-6595, las viscosidades respectivas según a ASTM D-445, métodos que fueron acogidos y aceptados en la gestión de



mantenimiento, obteniendo límites como 15ppm de hierro, 500 ppm de cobre, 15 ppm de aluminio, viscosidad +20% a -10 del grado ISO nominal, agua 500 ppm máximo, TAN (número ácido total) 1.0 mg KOH/g máximo en el compresor y turbinas, en los engranajes: viscosidad +20% a -10 del grado ISO nominal, oxidación: 0.2 Abs/0.1 mm y agua:0.25% máximo (Diaz Sepulveda, 2006).

Proporcionar el análisis del estado del lubricante para dar una mayor vida útil a los componentes que se analizan, concluyendo que el análisis de los lubricantes acarrea a un monitoreo de unidades, previniendo futuros mantenimientos correctivos a los equipos, anticipando las fallas y desgastes, evitando costosas reparaciones ahorrando un aproximado USD 10000.00 en costos financieros (Guillén Fernández, 2007).

Elaborar un plan de mantenimiento para maquinaria pesada, utilizada en movimiento de tierra y anticiparse a las fallas y modificar los periodos de cambio de lubricantes, logrando determinar que utilizando el monitoreo de aceite lubricante en equipos en estado crítico, se logró un ahorro considerable en el valor de los costos de servicios de mantenimiento con un valor de 16.54% en el valor de costos de servicios de mantenimiento, se pueden alcanzar frecuencias de más de 500 horas cuando la frecuencia regular es de 250 horas en motores (Ramirez Hernández, 2007).

Se demostró que es justificable la implantación de un mantenimiento predictivo, para establecer el desempeño del motor y del aceite lubricante durante el tiempo de monitoreo de los metales de desgaste indicados en la ASTM D-6595 obteniendo como



resultados los parámetros de desgaste como: Fe 42 ppm, Cu 21 ppm, Al 39 ppm, hollín 0.08%, oxidación 0.09%, sulfatación 0.93%, agua 0.23 %, nitración 0.21%, TBN (número básico total) 44 mgKOH/g viscosidad a 100°C <11.04 y >17.25 cSt (Arellano Ortiz, 2009).

Determinar el contenido de metales de desgaste obtenidos después de un registro de 250hrs por el tiempo de uso del lubricante respectivo obteniendo: Cr (Cromo) 0.13 ppm, Fe (Hierro) 100 ppm, Cu (Cobre) 45 ppm, en aceites lubricantes de motores a Diésel de la marca Caterpillar. Al mencionar las partes más afectadas, se llega a la conclusión de que una buena lubricación en el motor evita el desgaste de las piezas móviles, a su vez el análisis del aceite lubricante permitió la detección temprana de niveles de contaminación, se identificó y se pudo predecir con precisión las fallas en los componentes, basándose en la composición de los metales y la velocidad a la que se acumulan a lo largo de un tiempo. Recomendando que se debe realizar un seguimiento de las reparaciones que se realicen en los motores con el fin de mantener un historial completo, a raíz de que un diagnóstico efectivo en base al análisis de aceite se basa fundamentalmente en el historial de reparaciones y de las condiciones de operación del motor, permitirá un descenso en los costos de mantenimiento (Jiménez Macías, 2011).

Se describió los efectos del combustible en las propiedades físicas de los lubricantes, según la ASTM D-445 a través de análisis de laboratorio, concluyendo que la viscosidad del lubricante es disminuida por efectos de dilución del biodiesel en el aceite lubricante (Moreno, 2011).

Analizando la degradación del aceite lubricante e implementando un plan de mejora de mantenimiento con la finalidad de la reducción de costos para la conservación de maquinaria pesada verificando el estado inicial del sistema de lubricación de un parque automotor con una tabla de límites permisibles. Los análisis de viscosidades fueron realizados según la ASTM D-445, los metales de desgaste según la ASTM D-6595, fueron con la finalidad de mejora y control de los niveles de desgaste de los diferentes componentes de maquinaria pesada los cuales fueron los que se muestran en Tabla 1.

Tabla 1. Análisis de la degradación de aceites lubricantes

<i>Unidad 02</i>	<i>Fe</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Cr</i>	<i>Sn</i>	<i>Pb</i>	<i>Horómetro</i>	<i>Viscosidad</i>	
Metales	32	3	6	1	0	3	10000 Km	Viscosidad	13.63
de	16	3	4	1	0	2	15000 Km	Cinemática	13.87
desgaste (ppm)	18	2	4	1	0	2	20000 Km	(cSt)	18

Fuente: Viteri, 2011.

\* cSt: Unidad de viscosidad centistokes.

\*\* ppm: Partes por millón.

Del análisis echo en la muestra de ATF (fluido de transmisión automática), se encontró que los valores examinados para un total de 10 elementos de desgaste están con menos que 1.0 ppm. Seguidamente mostraron el desgaste en concentraciones en (ppm) a una distancia de 800 km fue encontrado que los elementos de desgaste Hierro (Fe), Cobre (Cu), Aluminio (Al), adquirieron una alta concentración en (ppm) con un valor promedio de: 22.161 ppm, 16.048 ppm, 11.577 pm respectivamente. Los demás elementos de desgaste ATF evaluados adquirieron un valor de concentración promedio menor que 1.0 ppm. Mientras que en la distancia de 20.000 km los elementos Fe, Cu y Al, se muestran como los valores de desgaste más significativos con los valores promedio de: 45.875 ppm,



28.29 ppm y 33.595 ppm respectivamente, aun así, las muestras en la categoría de 60.000 km se muestran los resultados típicos de elementos de desgaste, se dieron a conocer que los elementos Fe, Cu y Al adquieren los valores con más desgaste 65.891 ppm, 27.8 ppm y 7.83 ppm respectivamente (Latip et al., 2013).

Los aceites lubricantes acumulan en sí mismos una valiosa información sobre el estado de los componentes mecánicos y los equipos en los cuales trabajan (parámetros físicos y químicos que los describen y diferencian, así como la manera en que se modifican y deterioran sus características durante su vida útil), la interpretación adecuada de la información que suministran los aceites permite diagnosticar el estado de los equipos y sus componentes, con el fin de programar acciones de mantenimiento oportuno para salvaguardarlo, incrementando el valor agregado de producción (Mideros Romero, 2013).

La influencia del medio de lubricación para reducir la velocidad de desgaste en rodamientos, se definió los parámetros más relevantes que incidían con el desgaste en los rodamientos como la temperatura y el área de contacto, las propiedades de los medios de lubricación que contribuyen en la reducción de desgaste de estos rodamiento indicando que la viscosidad es un parámetro fundamental para el análisis de desgaste, determinó también que parámetros se pueden controlar para reducir la velocidad de desgaste en los rodamientos y finalmente obtuvo la información necesaria para dar uso a un lubricante específico que ocasione menor daño en los rodamientos. Demostrando mediante resultados que los aceites lubricantes 85w-140, 25w-50 y 15w-40 alcanzan temperaturas similares en un mismo periodo de tiempo, considerando que el ambiente en donde se



realice el ensayo puede alterar en un mínimo porcentaje la temperatura, a la vez demostrando que un aceite 15w-40 genera mayor longitud de desgaste que un aceite 85w-140 y 25w-50 y finalmente demostrando mediante ensayos la presión extrema que soporta cada lubricante es la siguiente: 85w-140 > 25w-50 > 15w-40 (Montalvo Lima, 2013).

Se plantearon fundamentos teóricos para el uso de análisis de aceite para la detección temprana de fallas en motores Caterpillar, a su vez da a conocer la composición, funciones, clasificación de aceites lubricantes además se presentó una manera de identificar la contaminación y degradación de estos aceites, también se presentó una forma de medir los metales de desgaste en los aceites lubricantes y las consecuencias que estos conllevan a conocer averías o fallas en motores relacionadas con el aceite lubricante encontrando la presencia de metales en el aceite lubricante, junto con sus límites como: cobre (Cu), hierro (Fe), cromo (Cr), aluminio (Al) y plomo (Pb), estos medidos en partes por millón (Padilla, 2013).

Indicar los beneficios de utilizar el análisis del aceite empezando por llevar una estrategia proactiva que será fundamental para establecer 2 tipos de alarmas como las alarmas absolutas; donde están los límites condenatorios que se aplican al estado de contaminación del lubricante y se pueden tomar las recomendaciones del laboratorio de análisis de lubricantes y las alarmas Estadísticas: Están basadas en los propios valores registrados en el equipo, el análisis de la tendencia estadística permite identificar fallas incipientes. Además, dar a conocer la filosofía del mantenimiento proactivo que conduce



a detectar y eliminar las causas que originan fallas en la maquinaria, a la vez argumentar que el análisis permite conocer tanto la salud del aceite lubricante, como el estado de contaminación y desgaste del sistema, para poder eliminarlas (Altman, 2016).

La realización de la capacidad del proceso es una técnica fundamental que determina la aptitud de un proceso, además indica si el valor obtenido del índice de capacidad es menor a 1 entonces el proceso no es capaz, si este índice de capacidad es igual a 1 entonces nuestro proceso es justamente capaz y si el valor de nuestro índice de capacidad es mayor a 1 nuestro proceso es capaz, además indica que el nivel sigma es el valor Z de la distribución normal estándar, concluye con realizar aproximaciones a la distribución normal para encontrar respuestas significativas de capacidad (Pérez Urrego, Pelaez Zuñiga, & Carrión García, 2014).

### **1.2.2 Antecedentes nacionales**

El monitoreo del rendimiento del aceite lubricante tiene como fin mantener el servicio constante de la maquinaria que brinda los recursos, obteniendo resultados que indican que hay presencia de metales de desgaste, contaminantes en menos de 4000 horas de trabajo, la maquinaria trabaja a una temperatura adecuada y también señala que si se observa un aumento abrupto es indicativo de alguna anomalía como el alto consumo de aceite 4.5 L/h y la aparición de azufre y carbón a los 19°C (Llacta Moscoso, 2004).

Implementar el análisis de aceite lubricante como una herramienta de mejora, en el cual se reemplaza la termografía, a la vez señalar como el análisis de lubricante brinda



información técnica en relación a las propiedades físicas y químicas, mejorando de esa manera las inspecciones y toma de decisiones sobre el aceite también indica que el análisis de aceite lubricante es factible en lo económico, pues tras la implementación proyecto un ahorro aproximado de USD 33000.00 para el año 2017 por consumo de aceite, cuyo valor representa una disminución de costo anual de mantenimiento de un 3.3% (Mendoza Quispe, 2017).

Definió que la importancia del análisis de aceites lubricantes y es una herramienta muy importante de monitoreo de condiciones tanto desde un punto de vista predictivo y proactivo en la toma de decisiones de mantenimiento, indica además que el propósito principal de las alarmas o límites es filtrar la información para que se pueda administrar y corregir situaciones, para así evitar estar implicado en grandes pérdidas económicas valoradas aproximadamente en USD 1563.193 (Jara Trujillo, 2015).

Parte del control estadístico de procesos, el cual se encarga medir los procesos para poder determinar las causas de las variaciones y emprender acciones correctivas, las gráficas o cartas de control son muy utilizadas y son básicas para mejora de calidad, para la optimización del proceso se realiza las pruebas de normalidad mediante la prueba de normalidad Kolmogorov – Smirnov en el software MINITAB obteniendo valores “p” mayores a 0.05 repitiendo el análisis del proceso las veces necesarias encontrando defectos en su proceso y en cada medición, finalmente utilizando el análisis de capacidad potencial con respecto a la métrica Z realizó comparaciones obteniendo un valor de Cpk de 0.65 valor Z de 1.66, Ppk de 0.65 valor Z de 1.68 (Matzunaga Zamudio, 2017).



## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo general

Elevar la capacidad de proceso en análisis de viscosidad cinemática espectrometría de emisión atómica e Infrarroja por la transformada de Fourier de aceite lubricante Mobil Delvac MX 15W40 para el mantenimiento preventivo del motor de un tractor D8T.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Obtener y evaluar los límites de control y los análisis de capacidad empleando los datos de las características fisicoquímicas metales de desgaste y contaminantes del aceite lubricante.
- Evaluar los datos fuera de los parámetros en los límites de control para crear un historial de confiabilidad para el mantenimiento preventivo.
- Optimizar el análisis de los límites condensorios para la implementación de un plan de mantenimiento preventivo en el motor de un tractor D8T

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

A diferencia de la espectrometría de absorción atómica, la espectrometría de emisión atómica (EEA) arco chispa tiene varias ventajas si se le compara con los métodos de absorción de llama y electrotérmicos, ventajas tanto como, baja susceptibilidad a las interferencias químicas, obtención de buenos espectros de la mayoría de elementos que resultan de unas condiciones de excitación (Skoog, Holler, & Crouch, 2008), se afirman que las ventajas, de la espectrometría de emisión atómica, es la baja susceptibilidad a las interferencias espectrales dadas a las temperaturas de vaporización de las muestras que



oscilan de 5000 °C a 6000 °C donde se vaporiza una parte de la muestra que forma plasma que emite luz intensa cuyas emisiones se separan en longitudes de onda individuales y se miden usando un sistema óptico bien diseñado (Latip et al., 2013). Los espectros de emisión a partir de arco o chispa son complejos, casi siempre está formado por cientos y hasta miles de líneas espectrales, por lo que se requiere mayor resolución de estos equipos, comparados con los equipos de absorción, esta técnica es ampliamente utilizada en los análisis cuantitativos de distintos elementos presentes en una muestra de aceite lubricante usado (Skoog et al., 2008)

La viscosidad es una de las propiedades más importantes de un fluido lubricante, esta nos ayuda a revisar el desempeño en: la fricción, capacidades de carga, resistencia al movimiento de componentes, capacidad de sellado y las propiedades de transferencia de calor (Stachowiak & Batchelor, 2004). La viscosidad cinemática es una propiedad física importante que debe ser monitoreada y controlada cuidadosamente debido a su impacto en el aceite y el impacto del aceite en la vida del equipo (Noria Corporation., 2002)

La importancia de evaluar el estado de funcionamiento del equipo, controlando la calidad de su correspondiente aceite lubricante en sus componentes. Así las características de degradación de un aceite lubricante se determinan principalmente mediante pruebas físicas y químicas de rutina como la Espectrometría Infrarroja por la Transformada de Fourier, este es uno de los principales métodos para el monitoreo de aceites lubricantes, tanto como la Espectrometría de Emisión Atómica (EEA) y la determinación de la viscosidad (Yingzhong, Liang, Liguang, & Liye, 2016).



El empleo de la Espectroscopía Infrarroja por la Transformada de Fourier de manera similar como una técnica de reemplazo para los métodos tradicionales de análisis químicos en aceites lubricantes (Adams, Romeo, & Rawson, 2007).

#### **1.4.1 Justificación del proyecto**

Esta investigación centra su justificación en el uso del análisis de aceites lubricantes, viscosidad cinemática y espectrometría infrarroja por la transformada de Fourier y los metales de desgaste como herramientas fundamentales del mantenimiento preventivo en maquinaria pesada, estableciendo nuevos límites de control obtenidos mediante el uso del software Minitab 16 dichos análisis deben ser realizados de acuerdo a la cantidad limitada de horas de trabajo que se le da a la maquinaria en uso, utilizando los resultados obtenidos de los 03 equipos para verificar y hacer el seguimiento mediante tendencias seguidamente para crear mediante pruebas estadísticas los límites de control

#### **1.4.2 Justificación ambiental**

En el presente estudio, el término "aceite usado" se refiere a aceites lubricantes que se recogen después del uso en automóviles ligeros y pesados, motores de vehículos, máquinas industriales y agrícolas, etc. El aceite usado no está clasificado como un residuo peligroso bajo la USEPA a menos que exceda los límites en compuestos tóxicos y peligrosos (Jafari & Hassanpour, 2014).

Después del análisis de muestras de aceites lubricantes, se verifican las cantidades de aceite lubricante agregado, las capacidades de llenado revelarán si hay pérdida de aceite lubricante en los próximos análisis, de tal manera que se estaría evitando una contaminación al medio ambiente por derrame de aceite lubricante a la vez en cada orden



de cambio de aceite, este es almacenado en tanques de residuo para su póstumo tratamiento o almacenamiento.

### **1.4.3 Justificación social**

El uso de los aceites lubricantes tiene un amplio uso en tipos de maquinaria que trabaja en diferentes áreas ya sea, en el área marítima, aviación, transporte terrestre y la industria, donde interviene la mano del hombre. Las pérdidas de horas con relación al trabajo-máquina-hombre significa pérdidas cuantiosas de dinero, el análisis para mantenimiento preventivo es una herramienta de gran apoyo, en gran medida se antepone a una falla inminente de una máquina, la contribución generada por el uso de aceites lubricantes aumenta de la eficacia de trabajo de una máquina usada por una persona.

### **1.4.4 Justificación tecnológica**

La sociedad del conocimiento exige nuevas competencias en el desarrollo profesional y en la práctica la difusión de nuevas tecnologías para favorecer la adquisición de conocimientos, habilidades y valores en el proceso de manejo de mencionada tecnología. La presente investigación presentará la información de una manera muy distinta con respecto a la dinámica del uso de la EEA, FT-IR y la Viscosidad Cinemática como parte importante del mantenimiento preventivo. Se presenta un nuevo escenario y se fortalece el proceso de construcción de un nuevo conocimiento en el área de la ingeniería química y la gran importancia del análisis de los aceites lubricantes en maquinaria pesada.



## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

Sección del trabajo de tesis donde se citan las referencias teóricas y antecedentes que sustentan el trabajo de investigación para cada uno de los objetivos propuestos de una forma crítica, explicando su importancia y relevancia con el trabajo realizado. Evitar la información irrelevante que no contribuya al logro de los objetivos planteados.

#### 2.1 MARCO TEÓRICO

##### 2.1.1 Lubricante

Cuando dos cuerpos sólidos se frotan entre sí, hay una considerable resistencia al movimiento independientemente de lo pulidas que estén las superficies. La resistencia se debe a la acción abrasiva de las aristas y salientes microscópicas. La energía suficiente para superar esta fricción se disipa en forma de calor y como desgaste de las partes móviles. La fricción se puede reducir por el uso de materiales con energía de fricción baja que se deslizan con facilidad una sobre otra. Cuando se utilizan piezas metálicas es necesario el uso de sustancias adicionales para disminuir la fricción entre las dos superficies en contacto. Estas sustancias reciben el nombre de lubricantes (Sanz Tejedor, 2017).

##### 2.1.2 Tipos de sustancias lubricantes.

Existen diferentes tipos de sustancias lubricantes: productos líquidos como aceites minerales y aceites sintéticos, productos semisólidos como las grasas, lubricantes sólidos como el grafito, y finalmente, el aire es un ejemplo de lubricante natural gaseoso (Sanz Tejedor, 2017).



### 2.1.3 Función del aceite lubricante

Un lubricante, es, por tanto, una sustancia capaz de disminuir la fricción entre dos superficies que están en contacto. La palabra lubricante proviene del latín “lubricum” que significa resbaladizo y veloz. Se trata de una delgada capa de fluido, de espesor a veces inferior a una micra, que se interpone entre dos superficies sólidas para evitar su contacto directo y permitir que resbalen sin deteriorarse. Como consecuencia de ello las ventajas que se derivan del uso de lubricantes son:

- Reducir el rozamiento mejorando el rendimiento de partes móviles del motor.
- Proteger los órganos mecánicos contra el desgaste y la corrosión para garantizar la duración y la eficiencia del motor.
- El aceite permite evacuar las impurezas gracias al filtro de aceite y al drenaje para mantener la limpieza de las partes motor.
- Reforzar la impermeabilidad (estanqueidad), indispensable para asegurar el buen funcionamiento del motor.
- Evacuar de manera eficaz el calor, enfriando las piezas móviles para evitar la deformación de las piezas.

### 2.1.4 Composición de un aceite lubricante

Un lubricante está formado por la base y los aditivos. La base confiere las propiedades de fondo y los aditivos adecuan las propiedades a los requerimientos específicos de la aplicación. Dos lubricantes con aplicaciones diferentes pueden tener la misma base y diferir en los aditivos. Cuando se diseña un lubricante no se hace al azar sino con el objetivo de superar determinadas especificaciones, que habitualmente



comprenden ensayos en laboratorio y ensayos en partes de maquinaria. (Sanz Tejedor, 2017).

### **2.1.5 Bases lubricantes**

Las bases lubricantes constituyen una porción significativa de los lubricantes terminados, yendo desde el 70% de un lubricante automotriz terminado de última generación hasta el 99% en algunos aceites industriales.

Las bases lubricantes contribuyen con características significativas de desempeño a los lubricantes terminados, tales como:

- Estabilidad térmica
- Viscosidad
- Volatilidad
- La habilidad para disolver aditivos y contaminantes
- Propiedades a baja temperatura
- Demulsibilidad
- Resistencia a la formación de espuma
- Estabilidad a la oxidación.

ExxonMobil (2017).

### **2.1.6 Propiedades de los aceites lubricantes**

#### **i. La viscosidad**

Es la fuerza por unidad de área, es proporcional a la disminución de la velocidad con la distancia (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2008). De todas las propiedades del fluido es ésta, la que requiere mayor atención (Streeter, 2008).



## ii. Viscosidad cinemática

Muchos cálculos de la dinámica de fluidos involucran la razón de la viscosidad dinámica en la densidad del fluido. Por conveniencia, la  $\nu$  (viscosidad cinemática) se define en la ecuación (1) como se indica (Mott, 2006):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1)$$

Debido a que  $\eta$  y  $\rho$  son propiedades del fluido,  $\nu$  también es una propiedad. Las unidades para la viscosidad cinemática en el SI se obtienen con la sustitución de las unidades antes desarrolladas ecuación (2) para  $\eta$  (Viscosidad dinámica) y  $\rho$  (densidad):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \eta \left( \frac{1}{\rho} \right) \quad (2)$$

$$\nu = \frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}} * \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (4)$$

En la Tabla 2 lista las unidades de la viscosidad cinemática en los tres sistemas más empleados. En cada uno de ellos se aprecia las dimensiones fundamentales de

longitud al cuadrado dividida entre el tiempo. Las unidades de stoke y centistoke son obsoletas, pero aparecen aquí porque es frecuente que ciertas publicaciones las empleen (Mott, 2006).

Tabla 2. Unidades de la viscosidad cinemática (Mott, 2006).

<i>Sistema de unidades</i>	<i>Unidades de la viscosidad cinemática</i>
Sistema Internacional (SI)	$m^2/s$
Sistema Tradicional de Estados Unidos	$Pie^2/s$
Sistema cgs (obsoleto)	Stoke = $cm^2/s = 1 \times 10^{-4} m^2/s$ Centistoke = $stoke / 100 = 1 \times 10^{-6} m^2/s = 1 mm^2/s$

Fuente: Mott, 2006.

### iii. Índice de viscosidad

El índice de viscosidad de un lubricante (en ocasiones conocido como VI o IV) nos indica cuánta es su capacidad de un lubricante de mantener su viscosidad en un amplio rango de temperaturas. Es especialmente útil cuando se trabaja con aceites lubricantes y fluidos hidráulicos utilizados en equipos que deben operar a extremos amplios de temperatura. Se determina a partir de los valores de viscosidad a 40°C y 100°C. Un IV alto indica que el cambio de viscosidad con la temperatura es pequeño, mientras que un IV bajo indica que la viscosidad del aceite cambia mucho con la variación de temperatura. Normalmente se desea que el IV sea lo más alto posible, ya que eso significa que la lubricación de las superficies es relativamente similar a todas las temperaturas. Los valores de esta propiedad suelen ser mayores de 90, estando su valor habitual entre 95 y 105 para las bases convencionales.



Un fluido con índice de viscosidad alto muestra un cambio pequeño en su viscosidad con la temperatura. Un fluido con índice de viscosidad bajo muestra un cambio grande en su viscosidad con la temperatura.

La fórmula general de la ecuación para calcular el índice de viscosidad ecuación (5) de un aceite con valor VI menor o igual a 100 es la siguiente (todos los valores de viscosidad cinemática tienen la unidad de mm<sup>2</sup>/s) esta fórmula dada por (Mott, 2006):

$$VI = \frac{L - U}{L - H} * 100 \quad (5)$$

U = Viscosidad cinemática del aceite de prueba a 40°C.

L = Viscosidad cinemática de un aceite estándar a 40°C con VI de cero, y que a 100°C tienen la misma viscosidad que el aceite de prueba.

H = Viscosidad cinemática de un aceite estándar a 40°C con VI de 100, y que a 100°C tiene la misma viscosidad que el aceite de prueba.

Tabla 3. Gráfico de índices de viscosidades comunes

<i>Índice de Viscosidad (VI)</i>	<i>Viscosidad cinemática, <math>\nu</math> (mm<sup>2</sup>/s)</i>		
	<i>A -20°C</i>	<i>A 20°C</i>	<i>A 100°C</i>
50	479000	400	9.11
100	21572	400	12.6
150	9985	400	18.5
200	5514	400	26.4
250	3378	400	37.1
300	2256	400	51.3

Fuente: Mott, 2006.

Observe el rango enorme de valores. El aceite con VI de 50 tiene una viscosidad muy alta a temperatura fría, y puede ser difícil hacerlo fluir en superficies críticas para lubricarlas. Por el contrario, a temperatura elevada la viscosidad disminuye a un valor tan bajo que tal vez no tenga una capacidad adecuada para lubricar. Deben usarse lubricantes y fluidos hidráulicos con VI alto en motores, maquinaria y equipo para minería utilizados, en la remoción de mineral, donde las temperaturas varían en rangos amplios. En un día cualquiera, el aceite podría pasar por el rango mencionado, de -20 °C a 100 °C.

Los valores altos de VI se obtienen con la mezcla de aceites seleccionados que tienen contenido elevado de parafina, o al agregar polímeros especiales que incrementan el VI, y mantienen buenas propiedades de lubricación, así como un rendimiento adecuado en motores, transmisión, sistema hidráulico y mandos finales. Mott (2006)

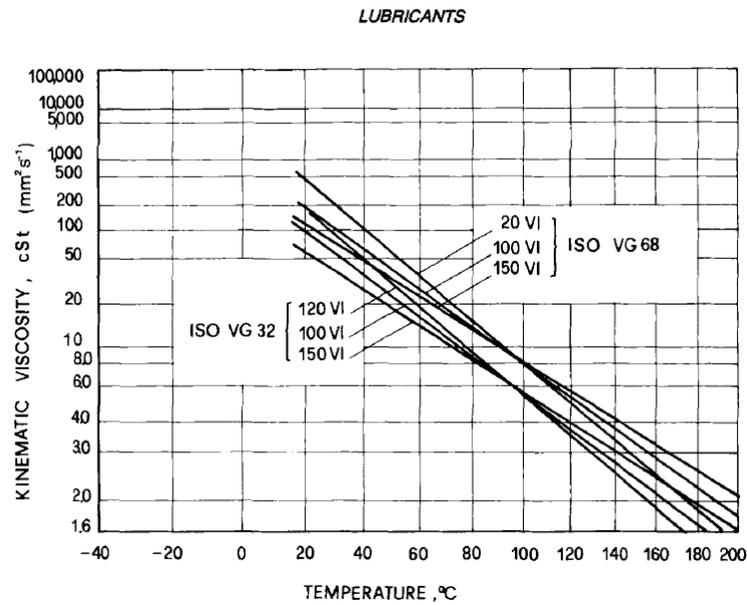


Figura 1. Gráfico de comportamiento viscosidad-temperatura para aceites con diferente índice de viscosidad (Stachowiak & Batchelor, 2004).

Es probable familiarizarse con algunos ejemplos de la variación de la viscosidad de un fluido con la temperatura. Por lo general, es muy difícil hacer que el aceite para motores escurra si está frío, lo que indica que tiene viscosidad elevada. Conforme aumenta la temperatura del aceite, su viscosidad disminuye en forma notable. Todos los fluidos muestran este comportamiento en cierto grado (Mott, 2006; Sanz Tejedor, 2017).

## vi. Oleaginosidad

La oleaginosidad puede ser definida como la capacidad de un fluido para adherirse a la superficie de otros materiales. En condiciones comunes, especialmente si la presión no es muy alta, las fuerzas de adhesión molecular son suficientes. La adsorción ocurre especialmente si las moléculas polares están presentes en el fluido, por ejemplo,



moléculas en que un permanente existe entre cargas eléctricas positivas y negativas. Los aceites lubricantes minerales no son muy grasos, lo que es una particularidad desfavorable en límites de lubricación (Stachowiak & Batchelor, 2004).

### **vii. Otras propiedades**

a) Punto de congelación: es la temperatura donde el aceite deja de fluir libremente. Esto es causado por la formación de cristales, principalmente de los tipos parafínicos. El punto de congelamiento del aceite parafínicos es cercano a los  $-10^{\circ}\text{C}$ , que para los aceites nafténicos que es cercano a los  $-40^{\circ}\text{C}$ .

b) Punto de inflamabilidad: es la temperatura más baja a la que los vapores emitidos por un aceite se encienden momentáneamente con la aplicación de una llama pequeña. El punto de inflamabilidad de aceites nafténicos es cercana a los  $170^{\circ}\text{C}$ , que para los aceites parafínicos que es cerca de  $190^{\circ}\text{C}$ .

c) Acidez: La baja acidez es ventajosa para reducir la corrosión.

d) Oxidación: alta estabilidad a la oxidación es una ventaja, porque una de las causas de deterioro en aceites lubricantes es la formación de productos de oxidación. Esto también conduce a la reducción de la vida del lubricante y a sus efectos corrosivos.

e) Descomposición térmica: La presencia del oxígeno, las altas temperaturas podrían producir una descomposición térmica de lubricantes minerales, que acortan su vida.

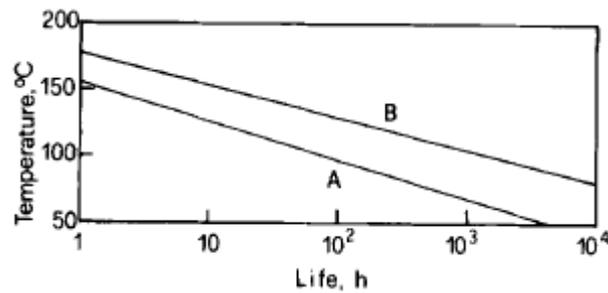


Figura 2. Características aproximadas de vida-temperatura de un aceite mineral: aceite A sin antioxidante, aceite B con antioxidante (Stachowiak & Batchelor, 2004).

## 2.1.7 Espectrometría infrarroja con transformada de fourier en aceites lubricantes

### i. La transformada de Fourier

La transformación de Fourier se usa ampliamente en muchas ramas de la ciencia y la ingeniería. Es particularmente importante en el procesamiento de señales y forma el 'caballo de trabajo' de muchos métodos y algoritmos. (Blackledget, 2006)

La absorbancia infrarroja de una vibración molecular que obedece la ley de Beer-Lambert (6). Esto significa que la espectroscopía FTIR, es una técnica cuantitativa si es adecuadamente calibrado. La relación es la siguiente:

$$A = \varepsilon bC$$

(6)

Donde:

A: Absorbancia

$\varepsilon$  : Coeficiente de absorción molar

b: El grosor de la muestra (longitud del trayecto)

C: La concentración de la molécula en la muestra.

\*Nota: El coeficiente de absorción molar es a una vibración específica y la absorbancia es normalmente en términos del pico más alto o pico más alto de una absorbancia integrada (Peak, 2013).

Se ha demostrado que la espectrometría IR de transmisión es efectiva para análisis y monitoreo de aceites de motor y muestra que proporciona información rápida y precisa en comparación con los tradicionales técnicas y métodos analíticos (Adams et al., 2007).

## ii. Notación

La transformada de Fourier de una función  $f$  generalmente se denota por la letra  $F$ , pero muchos autores prefieren usa una tilde encima de esta función para denotar la transformada de Fourier de  $f$  por  $\hat{f}$ . la transformada de Fourier puede ser escrita de la siguiente manera como se muestra en la ecuación 7:

$$F(\omega) \equiv \hat{F}_1 f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (7)$$

Donde  $\hat{F}_1$  denota el operador de transformación de Fourier unidimensional. Aquí  $F(\omega)$  está referido a la transformada de Fourier de  $f(t)$  donde  $f(t)$  no es una función no periódica. La condición suficiente para la existencia de la transformada de Fourier es como en la ecuación 8:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (8)$$

(Blackledget, 2006)



### iii. Interpretación física

Físicamente, la transformada de Fourier proporciona una imagen cuantitativa del contenido de frecuencia de la función que es importante en una amplia gama de problemas físicos y es fundamental para el procesamiento y análisis de señales e imágenes.

La variable  $w$  tiene dimensiones que son recíprocas a todas las variables  $t$ . Hay dos importantes casos que surgen

**i.1.**  $t$  es el tiempo en segundos y  $w$  es la frecuencia temporal en ciclos por segundo (Hertz). Aquí,  $w$  es referido como una frecuencia angular que está dada por:  $2\pi \times v$ , donde  $v$  es la frecuencia.

**i.2.**  $t$  es la distancia en metros (usualmente denotado por  $x$ ) y  $w$  la frecuencia espacial en ciclos por metro (usualmente denotado por  $k$ ). Aquí,  $k$  en la ecuación 9 es conocido como un número de onda y está dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{9}$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda y se nota que:

$$c = \frac{w}{k} = v\lambda \tag{10}$$

Donde  $c$  es la velocidad de la onda en la ecuación 10. La transformada de Fourier solo es una de las variedades de integrales, se transforma, pero tiene ciertas propiedades



que lo hacen particularmente versátil y fácil trabajar. Esto fue expresado elocuentemente por Lord Kelvin, quien declaró que:

*“El teorema de Fourier no es solo uno de los resultados más bellos del análisis moderno, sino se puede decir que proporciona un instrumento indispensable en el tratamiento de casi toda pregunta recóndita en la física moderna”*

(Blackledget, 2006).

#### **iv. Instrumentación**

FTIR en realidad se refiere a una clase de espectrómetros que se distinguen de las unidades infrarrojas de doble haz más antiguas por el uso de un solo haz y un interferómetro y detector para recoger un espectro sobre toda la longitud de onda de interés simultáneamente. Esta información en bruto, llamado interferograma, es una oscilación en el tiempo seguidamente este interferograma luego se convierte en una función de frecuencia, como en un espectro infrarrojo tradicional, mediante el uso de un procedimiento matemático llamado transformación de Fourier (Vo-Dinh & Gauglitz, 2003)

Las unidades FTIR han reemplazado en gran medida las unidades de doble haz más antiguas porque tienen una mejor resolución espectral, permiten una recolección de datos mucho más rápida y tienen una relación señal / ruido, mejorada (Vo-Dinh & Gauglitz, 2003).

#### **v. Técnicas experimentales comunes**

Los investigadores ambientales suelen emplear varias técnicas experimentales de FTIR diferentes. Estas son transmisiones experimentales en modo con discos prensados,



experimentos de reflectancia difusa con muestras de polvo y estudios de reflectancia total atenuada con soluciones acuosas y suspensiones hidratadas. Las principales diferencias en las técnicas comúnmente utilizadas son: (1) la cantidad de preparación de la muestra que se requiere, (2) el rango espectral que es accesible para la técnica, y (3) los límites de detección. Cada técnica puede ser particularmente adecuada para ciertas preguntas de investigación, y a veces se requiere más de una técnica (Peak, 2013).

#### **vi. Detección FTIR**

La detección de FTIR puede ser una herramienta muy útil tanto en la observación de un conjunto específico de compuestos objetivo como en la aclaración de los desconocidos. La luz infrarroja hace que las moléculas compuestas de varios átomos exhiban espectros vibratorios. Algunos de los movimientos moleculares se deben a contorsiones muy complejas de la estructura molecular, pero muchos pueden atribuirse al estiramiento de tipos de enlace específicos o a ciertos movimientos dentro de un grupo funcional (Vo-Dinh & Gauglitz, 2003). La radiación infrarroja distorsiona el marco de enlace molecular normal al estirar enlaces individuales o hacer que combinaciones de enlaces experimenten movimientos más complicados. Se ha demostrado que la espectrometría IR de transmisión es efectiva para análisis y monitoreo de aceites de motor y muestra que proporciona información rápida y precisa en comparación con los tradicionales técnicas y métodos analíticos (Adams et al., 2007).

En la práctica común, las unidades utilizadas son de frecuencia, en  $\text{cm}^{-1}$ , o de longitud de onda, en  $\mu\text{m}$ , y la primera se utiliza con más frecuencia. Cuando se muestra un espectro con frecuencia como el eje x, los movimientos moleculares de baja energía

están en  $\text{cm}^{-1}$  alto y se muestran a la izquierda. Los movimientos de átomos más grandes o grupos de átomos que requieren más energía están en valores inferiores de  $\text{cm}^{-1}$ . Esta región de frecuencia más baja no se usa normalmente para la interpretación espectral de funcionalidades, pero es útil para fines de huellas dactilares cuando se hacen coincidir los espectros de muestra con los de los estándares (Vo-Dinh & Gauglitz, 2003).

FTIR se basa en el hecho de que la absorción de las moléculas individuales dentro del lubricante varía dependiendo de sus enlaces típicos. El dispositivo FTIR compara el espectro de la muestra actual con los datos respectivos del aceite nuevo. El espectro de una muestra de aceite usado contaminado difiere de la muestra de aceite nuevo con respecto a sus oscilaciones en un número de onda (Noria Corporation., 2013b).

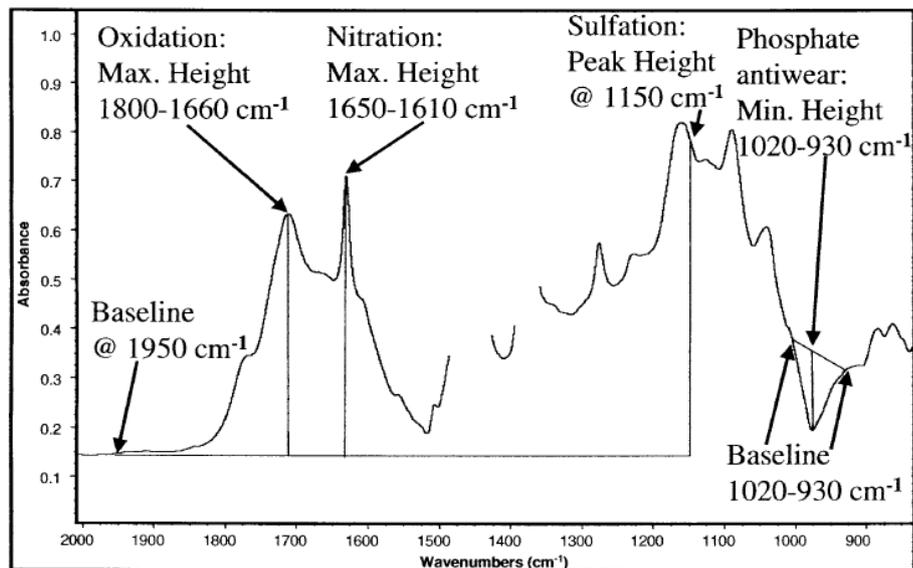


Figura 3. Sustracción espectral de oxidación, nitración sulfatación y fosfatos antidesgaste sustracción espectral de oxidación, nitración sulfatación y fosfatos antidesgaste (ASTM E2412-10, 2010).



### 2.1.8 Espectrometría de emisión atómica

Las ventajas de la espectrometría de emisión atómica es la baja susceptibilidad a las interferencias químicas, la cual es un resultado directo de sus temperaturas superiores también están los buenos espectros que resultan para la mayoría de los elementos con un solo grupo de condiciones de excitación. Por consiguiente, se pueden registrar en forma simultánea los espectros de docenas de elementos. Esta propiedad es de particular importancia en el caso del análisis de varios elementos en muestras muy pequeñas.

Estas técnicas, que empezaron a reemplazar en los años veinte los métodos gravimétricos y volumétricos para el análisis elemental, se basaron en la obtención de espectros de emisión de los elementos por medio de su excitación con arcos eléctricos o chispas de alta tensión. Estos espectros permiten la determinación cualitativa y cuantitativa de elementos metálicos en varios tipos de muestras, como metales y aleaciones. Las fuentes de arco y chispa todavía se usan en análisis cuantitativo y semi cuantitativo, sobre todo en las industrias de los metales. En las fuentes de arco y chispa la excitación de la muestra se produce en el pequeño espacio existente entre un par de electrodos a través de este pequeño espacio proporciona la energía necesaria para atomizar la muestra y producir átomos o iones en estado electrónico excitado (Skoog et al., 2008).

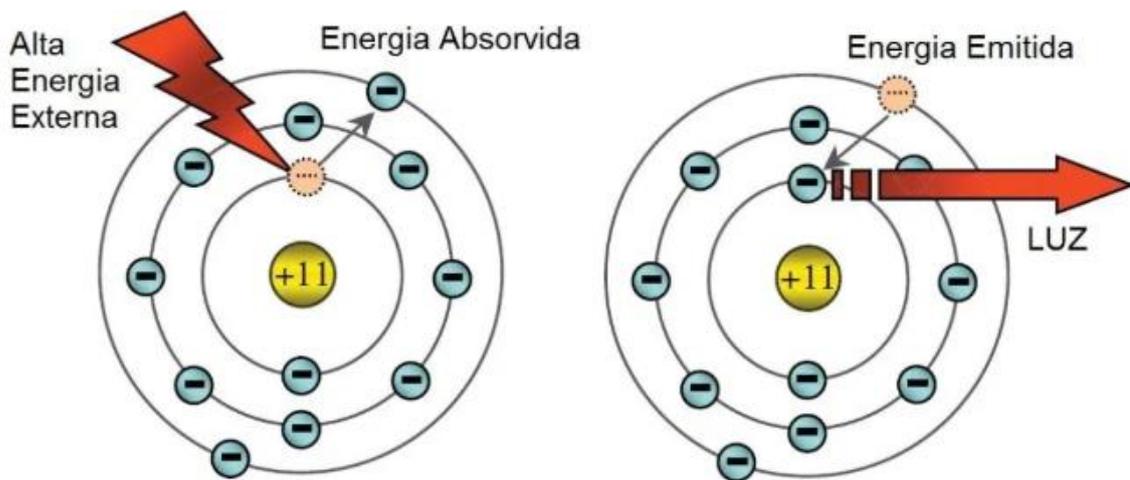


Figura 4. Movimiento de electrón en átomo excitado por energía externa alta (SpectroScientific, 2020).

Las líneas espectrales son únicas en la estructura atómica solo de un elemento, para el átomo de hidrógeno con número atómico número 1, el espectro es muy simple como se muestra en la figura 00, por otro lado, el espectro del hierro con número atómico 26 figura 00 es más complicado con muchas líneas de emisión en el espectro visible correspondiente a muchas transiciones electrónicas que pueden ocurrir.



Figura 5. Espectro de emisión del hidrógeno (SpectroScientific, 2020).



Figura 6. Espectro de emisión del hierro (SpectroScientific, 2020).



Si más de un elemento está presente en la muestra, líneas espectrales de distintas y diferentes longitudes de ondas que aparecerán para cada elemento. Estas líneas podrían ser separadas en orden para identificar y cuantificar los elementos presentes en la muestra. Usualmente una de las líneas espectrales entre muchas posibles opciones se elige para determinar la concentración de un determinado elemento.

El diseño del espectrómetro está diseñado para impartir la energía generada en un arco o chispa a la muestra. Para el análisis de aceite el espectrómetro, establece un gran potencial eléctrico entre un electrodo de disco y varilla con la muestra de aceite en el espacio entre ellos como se muestra en la Figura 7, una carga eléctrica almacenada por un condensador se descarga a través de esta brecha crea un arco eléctrico de alta temperatura que se vaporiza una porción de la muestra que forma plasma. El plasma es un calor, altamente de gas ionizado que emite luz intensa, la luz emitida como resultado de este proceso contiene emisiones de todos los elementos presentes en la muestra. Estas emisiones ahora se pueden separar en tipos de longitudes de onda y medidas utilizando un sistema óptico diseñado adecuadamente que alcanzan temperaturas en el rango de 5000 a 6000 °C y los elementos difíciles de excitar emiten suficiente luz para ser detectados fácilmente.

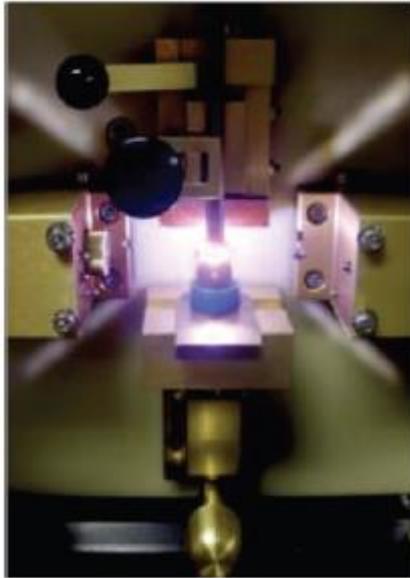


Figura 7. Muestra del espectrómetro con la muestra de aceite siendo quemada  
(SpectroScientific, 2020).

El método es llamado electrodo de disco giratorio con las siglas del inglés rotating disc electrode (RDE) óptico de espectroscopía de emisión con las siglas optical emission spectroscopy (OES), o de la combinación de los dos, RDE-OES. Alternativamente, a menudo se lo conoce como RDE-AES, para disco giratorio electrodo de espectroscopía de emisión atómica del inglés rotating disc electrode atomic emission spectroscopy (SpectroScientific, 2020).

#### **i. Metales de desgaste**

Los metales de desgaste es el resultado del daño progresivo y pérdida material debido al contacto relativo entre partes adyacentes, las causas de este desgaste son las cargas de impacto, flujo de líquido con o sin partículas sólidas. En la industria moderna, las partes mecánicas están sujetas a fricción y desgaste, dando como resultado la generación de calor, afectando la fiabilidad, vida y consumo de la fuerza de una



maquinaria. La efectiva zona de lubricación en la maquinaria es esencial para mejorar la fricción y temperaturas por la eficiente disipación de calor que incrementa la vida útil y calidad (Gunda & Narala, 2017). A la vez afirman que la ocurrencia severa de metales de desgaste aparece como un acto de catálisis que puede acelerar la degradación de un aceite lubricante particular usado durante la operación (Latip et al., 2013).

## **ii. Fuentes de oligoelementos**

El aceite de base se puede obtener de varias fuentes, siendo el petróleo crudo la fuente comercial inicial, para mejorar y promover el rendimiento del aceite lubricante, los aditivos se combinan con un aceite base. La mayor diferencia entre aceites lubricantes y aceites usados son la cantidad de aditivos usados (Jafari & Hassanpour, 2014).

## **iii. Aditivos**

Durante el último siglo, una gama creciente de aditivos se ha incorporado en los aceites lubricantes para lograr la estabilidad química mejorar el rendimiento y fortalecer las propiedades fisicoquímicas. Los aditivos mejoran la ignición y la eficiencia de combustión, estabilizan el combustible, el contenido, protegen el motor contra la oxidación de la corrosión, la fricción, la abrasión y la deposición y la diseminación de contaminantes de reducción (Jafari & Hassanpour, 2014).

La adición de aditivos da una buena reducción de fricción; así como otras ventajas. Recientemente los nano-materiales están en discusión por el orden que deben ser agregados en el aceite y los lubricantes para conferir la reducción de la fricción y para aumentar su longevidad (Zulkifli, Kalam, Masjuki, & Yunus, 2013).

Tabla 4. Lista de aditivos comunes usados en aceites lubricantes

<i>Aditivos Comunes</i>	<i>Ejemplo (s)</i>
Modificadores de fricción	Nitruro de boro, grafito
antidesgaste	Ésteres, parafinas cloradas
Inhibidores de oxidación y corrosión	Ácidos orgánicos, compuestos alcalinos
antioxidantes	Sulfuros de alquilo, fenoles
Detergentes	Fenolatos, sulfonatos
Dispersantes	Succinimidias de hidrocarburos
Dispersantes de punto de vertido	Copolímeros de metacrilatos de polialquilo
Mejoradores del índice de viscosidad	Polímeros de acrilato
Anti espumantes	Dimetil siliconas
Nano partículas y materiales compuestos	Diamantes, etc.

Fuente: Jafari & Hassanpour, 2014.

#### iv. Componentes organometálicos

Los compuestos organometálicos contienen: Ag(plata), B (boro), Ba (bario), Bi (bismuto), Ca (Calcio), Cd (cadmio), Co (cobalto), Cr(cromo), Fe (hierro), Mg (magnesio), Mo (molibdeno), Ni (níquel), P (fosforo), Sb (antimonio), y Zn (cinc), son deliberadamente añadidos a los aceites lubricantes para incrementar su performance. Al menos todo los aceites lubricantes están mezclados con aditivos en cantidades controladas (Araya Tekie, 2013).

Tabla 5. Aditivos en aceites lubricantes.

<i>Elementos Aditivos</i>	<i>Funciones</i>
Ag	Antifricción y revestimiento
B	Corrosión, oxidación, inhibidor de agua y desgaste
Ba	Detergente, inhibidor de corrosión y herrumbre
Ca	Detergente, dispersante y elevador de alcalinidad
Fe	Antifricción en elementos rodantes o cojinetes
K	Inhibidor de corrosión
Mg	Detergente, dispersante y elevador de alcalinidad
Mn	Mejorador de combustión y supresor de humo en aceite residual
Mo	Anti-desgaste
Na	Inhibidor de corrosión
Ni	Anti-fricción en aleaciones y revestimiento
P	Anti-desgaste, anti-oxidante, inhibidor de corrosión
Sb	Anti-desgaste y aditivo anti-oxidante
Zn	Anti-desgaste, anti-oxidante y aditivo inhibidor de corrosión

Fuente: Araya Tekie, 2013

### 2.1.9 Z. Bench

La palabra Bench. “Marca” o “señal”, es una herramienta lineada a un objetivo sobre el cual luego se apoya un instrumento en medición, en consecuencia, todas las mediciones posteriores estarán hechas con base en la posición y de dicha marca. El nivel Z se usa para describir la capacidad sigma del proceso. Puesto que se basa en una distribución normal estándar, los estadísticos de nivel Z son valores de referencia que le permiten comparar fácilmente la capacidad del proceso. Para entender el nivel Z, se debe considerar todos los defectos de un proceso, los cuales usualmente se ubican en alguno



de los lados de los límites de especificación así  $Z$  es el valor que corresponde a la probabilidad total de un defecto y en resumen  $Z$ . Bench describe la capacidad sigma de un proceso.

### **2.1.10 La capacidad de proceso**

El análisis de capacidad mide la capacidad de un proceso para cumplir con las especificaciones cuando el proceso está en control estadístico. Un proceso debe tener el control antes de intentar evaluar la capacidad. Un proceso fuera de control es impredecible y no puede caracterizarse por una distribución de probabilidad. La media del proceso y el valor sigma del proceso definen la distribución normal. Los índices de capacidad son "a largo plazo" o "a corto plazo".

Los índices a largo plazo miden el rendimiento del proceso y representan la calidad que experimenta el usuario final. Se calculan utilizando el proceso sigma que incluye tanto la variación dentro del subgrupo como la variación entre subgrupos (la desviación estándar de las mediciones individuales).

Los índices a corto plazo miden el rendimiento potencial del proceso ignorando las diferencias entre subgrupos. Se calculan utilizando el proceso sigma que incluye solo la variación dentro del subgrupo (el proceso sigma del gráfico de control o MR-). Si el proceso es estable en el tiempo, las estimaciones de sigma a corto plazo y sigma a largo plazo son muy similares. Ambas son estimaciones del mismo parámetro, aunque



estadísticamente hablando, el valor sigma a largo plazo es un estimador un poco más eficiente.

Sin embargo, si hay algún cambio en la media del proceso con el tiempo, la estimación de sigma a largo plazo es mayor que la de sigma a corto plazo. Cuanto mayor sea la diferencia entre los valores de los índices a largo y corto plazo, más oportunidades hay de mejorar el proceso al eliminar la deriva, los cambios y otras fuentes de variación. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2009).

**i. Las relaciones de capacidad ( $C_p$  /  $P_p$ ) descripción de la variabilidad de un proceso en relación con los límites de especificación**

Una relación de capacidad es un valor sin unidad que describe la relación entre la distribución de distribución del proceso y la distribución de límites de especificación. Un valor de menos de 1 es inaceptable, con valores mayores que 1.33 (1.25 para límites de especificación unilaterales) ampliamente aceptados como el valor mínimo aceptable.

Cuanto mayor sea el valor, más capaz será el proceso de cumplir con las especificaciones. Se requiere un valor de 2 o superior para lograr la capacidad Six Sigma, que se define como el proceso significa no menos de seis desviaciones estándar del límite de especificación más cercano. Todos los índices asumen una característica de calidad de proceso normalmente distribuida con los parámetros especificados por la media del proceso y sigma. El proceso sigma es la estimación sigma a corto o largo plazo.

Los índices calculados utilizando la estimación sigma a corto plazo se denominan índices  $C_{pk}$ . Mientras que aquellos que usan la estimación sigma a largo plazo se

denominan Ppk. Si los índices de Cp son mucho más pequeños que los índices de Pp, indica que hay mejoras que podría hacer al eliminar los cambios y las desviaciones en la media del proceso, así varios índices miden el rendimiento del proceso en relación con los límites de especificación:

## ii. Índices Cp y Cpk

El índice de capacidad potencial del proceso denominado Cp se define de la siguiente manera en la ecuación 11:

$$Cp = \frac{LES - LEI}{6\sigma} \quad (11)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar del proceso, mientras que ES y EI son las especificaciones superior e inferior para la característica de calidad, este valor Cp compara el ancho de las especificaciones o la variación tolerada para el proceso con la amplitud de la variación real de éste como se muestra en la ecuación 12:

$$Cp = \frac{\text{Variación Tolerada}}{\text{Variación real}} \quad (12)$$

El indicador de la capacidad potencial del proceso que resulta de dividir el ancho de las especificaciones (variación tolerada) entre amplitud de la variación natural del proceso.

## iii. Cpk

Es el indicador de la capacidad real de un proceso que se puede ver como un ajuste del índice Cp para tomar en cuenta el centrado del proceso.

#### iv. Índices Pp y Ppk

Los enfoques de estos índices están enfocados al desempeño a largo plazo y no sólo a su capacidad. Por ellos, el índice de desempeño potencial del proceso (process performance) Pp se calcula de la siguiente manera como se muestra en la ecuación 13:

$$Pp = \frac{LES - LEI}{6\sigma L} \quad (13)$$

Donde  $\sigma L$  es la desviación estándar de largo plazo, nótese que este valor se calcula de forma similar al Cp con la diferencia de que el Pp utiliza  $\sigma L$ . El problema del índice Pp es que no se utiliza el centrado del proceso, por lo cual suele complementarse con el índice de desempeño real del proceso Ppk, ecuación 14:

$$Ppk = \text{mínimo} \left[ \frac{\mu - EI}{3\sigma L}, \frac{ES - \mu}{3\sigma L} \right] \quad (14)$$

Donde se advierte que éste índice se calcula de la misma manera que el índice Cpk. La única diferencia es que Ppk utiliza  $\sigma L$  (la desviación estándar de largo plazo).

#### v. Ppk

Es el indicador del desempeño real del proceso, que se calcula en forma similar al índice Cpk pero usando la desviación estándar de largo plazo.

#### vi. Índices Cpk/Ppk

Estima la capacidad de un proceso, considerando que la media del proceso puede no estar centrada entre los límites de especificación.



\*Nota: Si  $C_{pk}$  es igual a  $C_p$ , entonces el proceso se centra en el punto medio de los límites de especificación. La magnitud de  $C_{pk}$  en relación con  $C_p$  es una medida de cuán descentrado está el proceso y la posible mejora posible al centrar el proceso (Analyse-it®, 2020a; Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2009).

### 2.1.11 Límites de control y límites condenatorios

#### i. Límites de control

Los límites de control de la gráfica de control representan la variación de un proceso y que ayudan a indicar cuando un proceso está fuera de control. Los límites de control superior e inferior se basan en la variación aleatoria esperada en el proceso, se muestran 3 desviaciones estándar arriba y abajo de la media de la muestra.

\*Nota: Los límites de control (LCS & LCI) se basan en la variación del proceso. Los límites de especificación (LES & LEI) están basados en los requisitos del cliente. Un proceso puede estar en control y aun así no es capaz de cumplir con las especificaciones (Minitab Inc., 2016).

#### ii. Límites condenatorios

Son los límites publicados por los fabricantes que indican una situación crítica que requiere un cambio de aceite con las revisiones recomendadas en sus catálogos, esto se puede observar en el **Anexo 11** de Caterpillar, sin embargo, es necesario comparar los resultados con el promedio de las muestras ya analizadas, llegando así a unos límites puestos por “Benchmarking” o comparaciones con los mejores resultados buscando la mejora continua (Widman International SRL, 2019).



## **2.2 MARCO CONCEPTUAL**

### **2.2.1 Definición de términos**

#### **i. Definición específica de términos del estándar ASTM D 6595-00**

##### **i.1 Espectrometría, espectroscopia y espectrofotometría**

Etimológicamente el significado de las palabras espectrometría, espectroscopia y espectrofotometría tienen su significado basado en palabras griegas como: “metros” que es medida, “skopeo” que es observar, “fos” que significa luz de la luz. Así espectrometría nos permite medir un espectro luminoso, espectroscopia nos permite observar un espectro luminoso y espectrofotometría, nos permite medir la luz que nos da un espectro (ASTM D6595, 2014).

##### **i.2 Espectrometría de emisión atómica (EEA) y espectrometría de absorción atómica (EAA)**

La espectrometría de absorción atómica y la espectrometría de emisión atómica fueron las primeras técnicas instrumentales que se establecieron para el análisis elemental. Se basan en el trabajo pionero de Bunsen y Kirchhoff a mediados del siglo XIX, quienes descubrieron que los elementos que son llevados a una llama caliente emiten luz de una longitud de onda característica. Por otro lado, esta emisión característica puede ser absorbida nuevamente por el vapor del mismo elemento. Estos dos descubrimientos formaron la base para la espectrometría de absorción y emisión atómica y demuestran la estrecha interrelación y naturaleza complementaria de estas dos técnicas. La absorción atómica y la espectrometría de emisión atómica tienen en común muchas consideraciones teóricas y prácticas, y pueden describirse por el mismo formalismo (Vo-Dinh & Gauglitz, 2003).



### **i.3 Espectroscopía de emisión con fuentes de arco y chispa**

Es un método de prueba, que reporta acerca de la determinación de metales de desgaste y contaminantes en aceites lubricantes usados y fluidos usados mediante espectroscopia de emisión atómica con electrodos de disco giratorio.

Método por el cual nos indica una constitución anormal de los aceites lubricantes debido a la presencia metales de desgaste y contaminantes. También, este método de prueba es capaz de detectar y cuantificar elementos resultantes del desgaste y contaminación de partículas de un aproximado de 10  $\mu\text{m}$  de tamaño.

### **i.4 Quemado en espectroscopia de emisión**

Es vaporizar y excitar un espécimen con suficiente energía para generar una radiación espectral.

### **i.5 Calibración**

Es la determinación de valores de parámetros significativos en comparación con los valores indicados por un conjunto de estándares de referencia.

### **i.6 Curva de calibración**

Grafica matemática o representación de una relación entre el aceite asignado (conocido) y los valores de las respuestas medias de un sistema de medidas

### **i.7 Estándar de calibración**

Un estándar que tiene un valor aceptado (valor de referencia) para ser usado en la calibración de un instrumento o sistema.

### **i.8 Espectroscopía de emisión**

Medida de la energía del espectro emitido por o desde un objeto bajo alguna forma de estimulación energética; por ejemplo, luz, descarga eléctrica.



### **i.9 Descarga de arco**

Alta intensidad de corriente, descarga a alta temperatura, caracterizada únicamente por el cátodo cae casi igual al potencial de ionización del gas o vapor.

### **i.10 Contaminante**

Material en una muestra de aceite que puede ser a consecuencia de un desgaste anormal o degradación de un lubricante.

### **i.11 Contra electrodo**

Cualquier de los dos electrodos de grafito en un espectrómetro de emisión atómica a través del cual se genera un arco o chispa.

### **i.12 Electrodo de disco de grafito**

Una forma suave del elemento carbono fabricado en forma de un disco para ser usado como contra electrodo en espectros de arco/chispa para el análisis de aceite.

### **i.13 Electrodo de barra de grafito**

Una forma suave del elemento carbono fabricado en forma de varilla para usar como contra electrodo en espectros de arco/chispa para el análisis de aceite.

### **i.14 Perfilado**

Establecer una posición real de entrada para producir una intensidad de medición óptima.

### **i.15 Estandarización**

Proceso de restablecimiento y corrección de una curva de calibración a través del análisis de al menos dos estándares de aceite conocidos.



### **i.16 Desgaste de metal**

Resultante de daño a una superficie sólida debido al movimiento relativo entre esa superficie y una sustancia o sustancias en contacto

## **ii. Definición específica de términos del estándar ASTM D 445-06**

### **ii.1 Densidad**

La masa por unidad de volumen de una sustancia a una temperatura dada.

### **ii.2 Viscosidad dinámica**

La relación entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de corte de un líquido.

### **ii.3 Fluidos newtonianos**

Se dice que un fluido newtoniano si su viscosidad varía solamente en respuesta a los cambios de temperatura o presión. Un fluido newtoniano adopta la forma de su contenedor (ASTM D445, 2010; Schlumberger, 2017).

### **ii.4 Viscosidad cinemática**

La resistencia de un fluido a fluir bajo gravedad (Mott, 2006).

### **ii.5 Índice de viscosidad**

Valor empírico sin unidades, es la medida del cambio en la viscosidad de un aceite con relación a la temperatura (Widman, 2017).

## **iii. Definición específicas del término del estándar ASTM E 2412**

Análisis molecular de lubricantes y fluidos hidráulicos por espectrometría FT-IR produce información directa sobre especies moleculares de interés, incluidos aditivos,



productos de descomposición de fluidos y contaminantes externos, y complementa así el desgaste del metal y otros análisis utilizados.

### **iii.1 Espectrometría infrarroja por la transformada de Fourier**

Una forma de espectrometría de infrarrojos en la que se obtiene una curva (interferograma); este interferograma luego se somete a una transformada de Fourier para obtener un espectro amplitud-número de onda (o longitud de onda).

### **iii.2 Condición de monitoreo**

Un campo de actividad técnica en el que los parámetros físicos seleccionados asociados con una máquina de operación son detectados periódicamente o continuamente, medidos y registrados con el propósito provisional de reducir, analizar, comparar y visualizar los datos y la información para respaldar las decisiones relacionadas con la operación y el mantenimiento de la máquina.

### **iii.3 Salud de la maquinaria**

Expresión cualitativa del estado operacional de un subcomponente de la máquina, componente o máquina completa, utilizada para comunicar recomendaciones o requisitos de mantenimiento y operativos para continuar la operación, programar el mantenimiento o tomar medidas de mantenimiento inmediato.

### **iii.4 Productos de oxidación y combustión**

En todos los sistemas de lubricación, los compuestos orgánicos expuestos a altas temperaturas y presiones en presencia de oxígeno tienen a oxidarse parcialmente (reacciona químicamente con el oxígeno). Hay una variedad de subproductos generados durante el proceso de combustión, como por ejemplo cetonas, ésteres, aldehídos, carbonatos y ácidos carboxílicos, y la exacta distribución y composición de estos



productos es muy compleja. El efecto neto de una prolongada oxidación es que químicamente el aceite se torna ácido causado corrosión y físicamente se incrementa su viscosidad (Noria Corporation., 2014a).

### **iii.5 Número de ácido total (TAN)**

El TAN es la medida de los componentes orgánicos ácidos presentes en los lubricantes. En el caso de aceite usado, el TAN puede aumentar como resultado de los procesos de oxidación que ocurren durante el servicio del aceite lubricante. Sin embargo, el TAN se emplea para predecir la tendencia corrosiva de los aceites hacia el metal (ExxonMobil, 2017).

### **iii.6 Productos de nitración**

Los productos de nitración se forman cuando los compuestos orgánicos son expuestos a altas temperaturas y presiones en presencia de nitrógeno y oxígeno. Generalmente se presentan en forma de óxidos de nitrógeno como por ejemplo NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Además de incrementar la viscosidad del aceite y tener características ácidas, los productos de nitración son los principales causantes de los depósitos de barniz o lacas (Noria Corporation., 2014a).

### **iii.7 Productos de sulfatación**

Los compuestos de azufre se encuentran típicamente en el petróleo y en aditivos usados en combustibles y lubricantes para su mejor desempeño. Los productos sulfatados como el SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> se forman por la oxidación de esos compuestos que contienen azufre. Compuestos que generalmente degradan el aceite. Igualmente, reaccionan con el agua formada durante el proceso de combustión para generar ácidos fuertes como en



sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Estos ácidos son neutralizados por la reserva alcalina del paquete de aditivos del aceite, de ahí su agotamiento en el tiempo de uso (Noria Corporation., 2014a).

### **iii.8 Hollín**

El hollín se genera por una combustión incompleta del combustible diésel. Una mezcla rica aire/combustible forma partículas de hollín cuando se quema. Un incremento en el contenido de hollín en un aceite indica problemas de combustión, o un intervalo de cambio de aceite excedido. La acumulación del hollín crea problemas de lubricación porque incrementa la viscosidad del aceite y causa un prematuro taponamiento de los filtros y galerías de aceite (Noria Corporation., 2014a).

### **iii.9 Agua**

A pesar de que el agua es un subproducto de la combustión, tiende a ser un contaminante poco frecuente debido a las condiciones de operación. Cuando está presente, el agua rápidamente se disuelve o dispersa en el aceite. El agua es una fuente absorbente de IR y es fácil de detectar. También aparece en una región del espectro IR donde muy pocos compuestos del aceite tienen absorbancias significativas (Noria Corporation., 2014a).

### **iii.10 Número básico (BN)**

El BN del aceite debe irse reduciendo en la medida en que va neutralizando los ácidos. Entonces, cuando se interpreta el análisis de aceite, se debe comparar el resultado del aceite usado con el del aceite nuevo y estimar en función de la diferencia y de los límites establecidos, si el aceite puede continuar en uso o no. El TBN (Número Básico Total), actualmente llamado BN (Número Básico)), representa la reserva alcalina en miligramos de Hidróxido de Potasio que contiene un gramo de aceite (mgKOH/g). En



otras palabras, es la capacidad que tiene el aceite para neutralizar los ácidos que se forman durante las condiciones de operación (Noria Corporation., 2013a)

### **iii.11 Definición de metodología six sigma**

Es un método encaminado a reducir la cantidad de errores, busca defectos identificando y eliminando valores que no contribuyen en un proceso, busca que los procesos se optimicen. (Matzunaga Zamudio, 2017).

## **2.3 HIPOTESIS**

### **2.3.1 Hipótesis general**

Se eleva la capacidad de proceso en análisis de viscosidad cinemática espectrometría de emisión atómica e Infrarroja por la transformada de Fourier de aceite lubricante Mobil Delvac MX 15W40 para el mantenimiento preventivo de un tractor D8T.

### **2.3.2 Hipótesis específica**

- Se obtienen y evalúan los límites de control y los análisis de capacidad empleando los datos de las características fisicoquímicas metales de desgaste y contaminantes del aceite lubricante.
- Se evalúan los datos fuera de los parámetros en los límites de control y se crea un historial de confiabilidad para el mantenimiento preventivo.
- Se optimizará el análisis de los límites condenatorios para la implementación de un plan de mantenimiento preventivo en el motor de un tractor D8T



## CAPITULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 GENERALIDADES

El objetivo es elevar la capacidad de trabajo de un aceite lubricante mediante el análisis de capacidad evaluar el efecto que dan las condiciones de trabajo en la desnaturalización del aceite lubricante en uso, para la prevención de fallas, deterioro imprevisto e incremento de capacidad de uso en un tractor D8T, estableciendo los límites condenatorios de análisis.

#### 3.2 MATERIALES Y EQUIPO

El análisis de los aceites lubricantes por emisión atómica, espectrometría infrarroja por la transformada de Fourier y viscosidad pueden ser utilizados como herramienta para ser usada en el mantenimiento preventivo, los resultados, facilitan la detección de algún desgaste anormal de los componentes que están en contacto con los aceites lubricantes, a la vez los gráficos estadísticos muestran cómo el aceite lubricante actúa contra el desgaste, además revela la interacción de las propiedades de los aceites lubricantes en los compartimientos del tractor D8T.

##### 3.2.1 Equipos

- ✓ Viscosímetro de capilar de vidrio (Spectro Visc). Marca SPECTRO INC.
- ✓ Espectrómetro FT-IR (FluidScan Q1000). Marca SPECTRO INC.
- ✓ Espectrómetro de emisión óptica de electrodo de disco giratorio (SPECTROIL Q100). Marca SPECTRO INC.



- ✓ Sacapuntas de electrodos de barra.

### 3.2.2 Materiales

#### *Muestreo:*

- ✓ Succionador (vampiro)
- ✓ Manguera
- ✓ Frascos
- ✓ Rótulos

#### *Viscosímetro:*

- ✓ Puntales de Pipetas
- ✓ Pipetas graduadas de 1000  $\mu$ L Brand®
- ✓ n-Heptano 99% Tedia® High Purity Solvents
- ✓ Varsol Tedia® High Purity Solvents

#### *FT-IR:*

- ✓ Pipetas graduadas de 1000  $\mu$ L Brand®
- ✓ Puntales de Pipetas
- ✓ Vaso precipitado 100 mL
- ✓ n-Heptano 99% Tedia® High Purity Solvents

#### *Equipo de Emisión Atómica:*

- ✓ Electrodo de disco de grafito de alta pureza (grado espectroscópico) Spectro Scientific®
- ✓ Electrodo barra de grafito de alta pureza (Grado Espectroscópico) Spectro Scientific®
- ✓ Black cups

- ✓ Pipetas descartables de 3 mL
- ✓ Puntales
- ✓ Papel Tisú
- ✓ n-Heptano 99% Tedia® High Purity Solvents
- ✓ Matrix Oil CS-75 (0 ppm) Spectro Scientific®
- ✓ Calibration Standard CS-24 @ 100 Spectro Scientific®
- ✓ Metallo-Organic Standard SMA-900 Spectro Scientific®

**i. Recolección de muestras**

El punto de recolección de aceite lubricante se realizará del motor del tractor D8T cuyo aceite lubricante haya cumplido las 250 horas de trabajo indicado en el horómetro.

**ii. Procedimiento de muestreo del aceite**

- Hacer un pre calentamiento de los componentes del tractor, dejar que el aceite lubricante fluya por un breve periodo de tiempo. Extraiga una muestra de aceite representativa en el punto de toma de muestras.



Figura 8. Extracción de muestra de aceite lubricante (ExxonMobil, 2017).

- Cierre bien el tapón del frasco de muestras. Inspeccione a simple vista el frasco de la muestra para comprobar si contiene partículas, agua u otros productos contaminantes. Si se observa contaminación, tome medidas de corrección.



Figura 9. Cerrado de frasco de muestra de aceite lubricante (ExxonMobil, 2017).

- Si es preciso, añada datos de tendencias adicionales (fecha, Horas/millas/km, etc.) con bolígrafo.



Figura 10. Rotulado de muestra (ExxonMobil, 2017).

- Fije la etiqueta de la muestra pre-impresa completada al frasco de muestras.



Figura 11. Etiquetado de muestra (ExxonMobil, 2017).

- Coloque el frasco de muestras en el recipiente de transporte negro y cierre bien el tapón.



Figura 12. Recipiente de transporte de muestra (ExxonMobil, 2017).

- Envíe la muestra o varias muestras en la caja de envío que serán suministradas para este fin.



Figura 13. Envío de muestra para análisis (ExxonMobil, 2017).

- Al terminar las actividades, las mangueras y herramientas deben ser recogidas. Se dejará limpia y ordenada la zona de trabajo verificando que no queden residuos. Cambio de aceite y filtro dejar re-circular el nuevo aceite lubricante, para luego completar el llenado con el aceite lubricante. Almacenar adecuadamente los residuos El objetivo de la frecuencia de toma de muestras es conseguir un modelo regular de toma de muestras, para el rendimiento de la máquina.
- Recordar lo siguiente cuando se toman las muestras:



Actualizar o añadir los datos de registro de puntos de toma de muestras.

Imprimir las etiquetas de las muestras, añadiendo los detalles de la toma de muestras, para disminuir el tiempo de administración, aumentar la precisión de los datos y acelerar el procesamiento de la muestra en el laboratorio.

- Asegurarse de que la zona donde se tomen las muestras esté limpia.

Tomar las muestras a la temperatura más próxima posible a la temperatura de trabajo, y con la mayor seguridad posible. Tomar las precauciones apropiadas cuando tome una muestra de aceite transmisor de calor. Lea detenidamente las instrucciones de la toma de muestras de aceite transmisor de calor.

- Para obtener resultados precisos del análisis, en primer lugar, debe tomar una muestra representativa (blanco)
- Implantar un calendario de toma de muestras
- Configurar un calendario de toma de muestras. Tomar las muestras a la temperatura más próxima posible a la temperatura de trabajo, y con la mayor seguridad posible. Tomar las muestras en un lugar e intervalo constantes.
- Trabajar con un orden y limpieza.
- Comprobar que las condiciones de trabajo del entorno sean seguras.
- Limpiar la zona del punto de toma de muestras.
- Anotar los detalles de la muestra y anotar los detalles del equipo y las muestras. Incluir la fecha de la muestra, horas/millas/km del aceite y el equipo, etc.
- NO SE DEBE realizar el muestreo sólo "cuando el tiempo lo permita".
- SE DEBEN tomar las muestras con la frecuencia correcta". Uno de los aspectos más valiosos del análisis de aceite es identificar un cambio en las propiedades con

respecto a la línea de base y comprender la tasa a la que ocurrió ese cambio. Esto le permitirá hacer una mejor interpretación de los resultados y tomar buenas decisiones de mantenimiento.

- SE DEBEN enviar las muestras al Laboratorio de Aceites Usados inmediatamente después del muestreo.
- NO SE DEBE esperar más de 24 horas para enviarla a analizar. Como se mencionó antes, el muestreo de aceite es muy parecido a tomar una fotografía instantánea de su sistema en un momento en el tiempo. La salud de un sistema lubricado puede cambiar dramáticamente en un muy corto plazo.

### iii. Análisis de viscosidad cinemática a 100 °C

Las muestras de aceite lubricante recogidas del motor son sacadas de los frascos de muestreo con la pipeta y el puntal de pipeta, la cantidad de 300  $\mu\text{L}$ , luego son llevados dentro del capilar del viscosímetro, el termostato debe estar a la temperatura de 100°C (ASTM D445, 2010), transcurrido cierto tiempo nos dará su respectiva viscosidad.



Figura 14. Análisis de aceite lubricante en el viscosímetro

Fuente: Elaboración propia

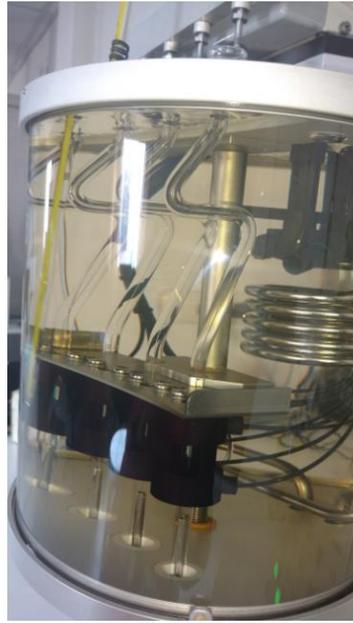


Figura 15. Capilares con muestras de aceite lubricante

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las viscosidades obtenidas resultan de lo siguiente según (ASTM D445, 2010):

Constante de Calibración:  $K$

Tiempo de inicio de lectura:  $T_o$

Tiempo de fin de la lectura:  $T_f$

Viscosidad Cinemática:  $V_c$

Donde:

$$V_c = K * (T_f - T_o)$$

(15)

\*La constante de calibración varía con respecto a la temperatura y de cada capilar de vidrio.

#### iv. Análisis por espectrometría FT-IR

La muestra de aceite lubricante recogida del motor, es sacada con la pipeta graduada con el puntal de pipeta, posteriormente son llevadas al equipo de análisis por espectrometría FT-IR se coloca una gota sobre el lente del equipo y programar para su análisis respectivo del tipo de aceite lubricante, luego de pasado el tiempo de lectura de la muestra de aceite lubricante, posteriormente se limpia el lente del equipo con heptano y papel tisú hasta dejarlo limpio.

Las propiedades fisicoquímicas requeridas tomadas en base a la ASTM E-2412 son:

Tabla 6. Análisis FT-IR (ASTM E2412-10, 2010)

Propiedades	<i>TNA</i>	<i>TNB</i>	<i>Oxidación</i>	<i>Agua</i>	<i>Nitración</i>	<i>Sulfatación</i>	<i>Hollín</i>
Motor		X	X	X	X	X	X

Fuente: Elaboración propia



Figura 16. Equipo FT-IR

Fuente: Elaboración propia

El FT-IR determina el nivel de oxidación por la respuesta general del enlace carbonilo (C=O) en la región comprendida entre  $1800$  a  $1670\text{ cm}^{-1}$ . En esta región, la energía IR es absorbida por el enlace entre el carbón y el oxígeno en el aceite oxidado (Noria Corporation., 2014a).

El TAN se puede usar como indicador de los niveles de oxidación en los lubricantes. Cuanto mayor es el TAN, mayor es la degradación del aceite. (ExxonMobil Corporation, 2016).

Los productos nitrogenados son monitoreados por FT-IR porque tienen características de absorbancia entre los  $1650$  y  $1600\text{ cm}^{-1}$ , la región inmediatamente debajo de los productos de oxidación (Noria Corporation., 2014a).

Los productos de sulfatación son medidos por FT-IR de la misma forma que los de oxidación y nitración, monitoreando el incremento de la absorbancia IR entre  $1180$  y  $1120\text{ cm}^{-1}$  (Noria Corporation., 2014a).



Las partículas de hollín causan una dispersión general de la radiación IR, la cual es más severa en números de onda más altos. Por lo tanto, la cantidad de hollín se mide simplemente tomando la lectura de la intensidad de la absorbancia a  $2000\text{ cm}^{-1}$  (Noria Corporation., 2014a)

La cantidad de agua se mide tomando la intensidad de su absorbancia para aceites minerales  $3400$  y éster orgánicos  $3625\text{ cm}^{-1}$  (Noria Corporation., 2014a)

Debido a los peligros potenciales para la salud y el ambiente, no es posible determinar el BN a todas las muestras de aceites de motor que ingresan en el laboratorio. Por esta razón, IR es utilizado como una prueba de segregación (Noria Corporation., 2013a).

#### v. **Análisis por espectrometría de emisión atómica (EEA)**

Previa calibración con los estándares: Matrix Oil CS-75 (0 ppm), Calibration Standard CS-24 @ 100 y Metallo-Organic Standard SMA-900, los rodamientos y electrodos de varilla de grafito son colocados en sus respectivos soportes del equipo de emisión atómica, luego con una pipeta desechable de 3 mL se saca la muestra de la primera muestra de aceite, posteriormente se vierte el contenido en un black cup hasta llenarlo al ras, la muestra sobrante es desechada, luego se coloca el rodamiento sobre el black cup y la varilla a una distancia del rodamiento, se pasa a lectura por un lapso de 30 segundos, donde el equipo automáticamente da los resultados de los elementos metálicos detectados en ppm.



Figura 17. Varilla de grafito con rodamiento de grafito y black cup con muestra de aceite lubricante.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Longitudes de onda de metales de la base de datos del Spectroil Q100

<i>Metal</i>	<i>Longitud de Onda</i>	<i>Metal</i>	<i>Longitud de Onda</i>	<i>Metal</i>	<i>Longitud de Onda</i>
Ag	328.068	Pb	283.306	Cu2	224.262
Al	308.215	Si	251.611	K2	769.896
B	249.678	Sn	317.505	Mg1	518.362
Ba	455.403	Ti	334.941	Mg2	278.297
Ca	393.366	V	437.924	Mn2	294.920
Cd	226.502	Zn	213.856	Na1	589.592
Cr	425.435	H	486.133	Na2	589.592
Cu	324.754	H2	486.133	P2	255.328
Fe	259.940	C	336.015	Ti2	335.464
K	766.490	C2	336.015	V2	290.882
Mg	280.270	B2	249.678	Zn2	481.053
Mn	403.076	Ba2	230.424	Zn3	481.053
Mo	281.615	Ba3	230.424	Ag2	243.781
Na	588.995	Ca2	445.478	-	-
Ni	341	Ca3	445.478	-	-
P	214.914	Cr2	276.654	-	-

Fuente: Spectro Scientific, 2018



Figura 18. Equipo de análisis por espectrometría de emisión atómica (EEA).

Fuente: Elaboración propia

#### vi. Recopilación de datos

La frecuencia de toma de muestras es conseguir un modelo regular de toma de muestras. De esta forma se determina una tendencia histórica verosímil del rendimiento de la máquina, se tomó la frecuencia de las 250 horas de trabajo del motor.

Tabla 8. Frecuencia de muestreo de aceites lubricantes

<i>Descripción</i>	<i>Tipo de aceite</i>	<i>Frecuencia de muestreo (Hrs)</i>				
		<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>3000</i>
<i>número de parte</i>						
Aceite de motor	SAE 15W40	X				
Filtro de motor	-	X				

Fuente: Elaboración propia



#### **vii.    Ámbito de estudio**

Para el presente trabajo se utilizó el laboratorio de análisis de aceites lubricantes de la Empresa MUR-WY SAC ubicado en la ciudad de Juliaca y Lima. La recepción, codificación y análisis de las muestras se realizaron en el Laboratorio de Lubricantes de la empresa MUR-WY SAC (Juliaca, San Román Puno) – (Lima, San Juan de Lurigancho)

#### **viii.   Condiciones ambientales de trabajo**

Las temperaturas de trabajo del viscosímetro de capilares son de 40°C y 100°C. La temperatura de trabajo del Espectrómetro FT-IR es a temperatura de laboratorio aproximada de 20°C~ 24°C respectivamente. La temperatura de trabajo del espectrómetro de emisión atómica es de 37°C ~ 37.8°C.

### **3.3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.3.1 Obtención y evaluación de los límites de control y los análisis de capacidades empleando los datos de las características fisicoquímicas del aceite los metales producto de desgaste y contaminantes del aceite lubricante.**

A continuación, se detalla la metodología realizada para la obtención de los límites de control en las características fisicoquímicas, metales de desgaste, contaminantes y su evaluación a través del tiempo de trabajo (horómetro) con la ayuda del software MINITAB con su respectivo análisis de capacidad e historial de causas asignables y la comparación de sus valores de optimización actuales de acuerdo a sus valores Z.Bench, índices Cpk y Ppk en el aceite lubricante extraído del motor de un tractor D8T.



### **i. Prueba de normalidad**

Muchos procedimientos estadísticos dependen de la normalidad de la población, de modo que recurrir a una prueba de normalidad para determinar si se rechaza este supuesto pudiera ser un paso importante en su análisis. La hipótesis nula para una prueba de normalidad establece que la población es normal (Minitab Inc., 2016).

- **Técnica gráfica**

Se evaluó la normalidad de una población con una gráfica de probabilidad normal, la cual genera de manera gráfica valores de datos ordenados en comparación con los valores que usted espera sean cercanos a los primeros, si la población de la muestra está normalmente distribuida. Si la población es normal, los puntos de la gráfica conformarán una línea aproximadamente derecha (Minitab Inc., 2016).

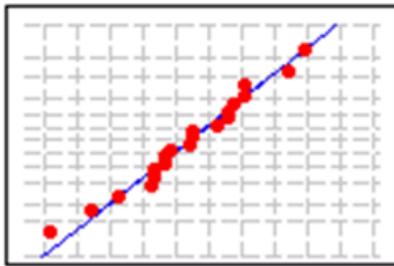
### **ii. Prueba de Anderson-Darling**

Esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos son normales. Si esta diferencia observada es suficientemente grande, la prueba rechazará la hipótesis nula de normalidad en la población. Si el valor  $p$  (cuando está disponible) para la prueba de Anderson-Darling es inferior al nivel de significancia seleccionado (generalmente 0.05 ó 0.10), concluya que los datos no siguen la distribución especificada. Minitab no siempre muestra un valor  $p$  para la prueba de Anderson-Darling, porque ésta no existe matemáticamente para ciertos casos (Minitab Inc., 2016).

**Gráfica de Probabilidad de Datos**

**Gráfica de Probabilidad de Datos No**

**Normales**



**Normales**

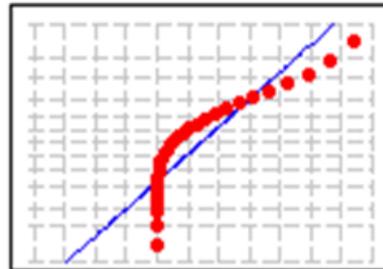


Figura 19. Gráfica de normalidad de variables (Minitab Inc., 2016).

**iii. Capability Sixpack**

Capability Sixpack permite evaluar rápidamente la capacidad de un proceso, al combinar seis herramientas de calidad en una única presentación:

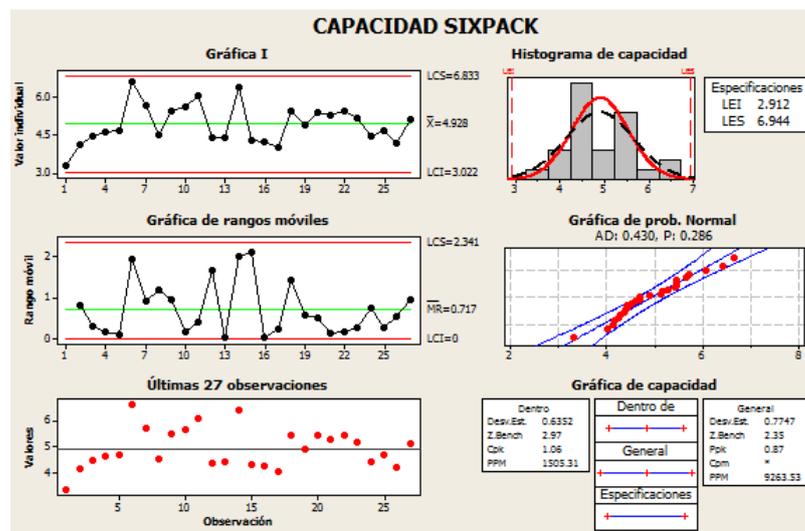


Figura 20. Capability Sixpack (Minitab Inc., 2016).

### iii.1 Gráficas Xbarra

Son observaciones individuales para determinar si el proceso está bajo control. Si el proceso está fuera de control, los índices de capacidad no son válidos.

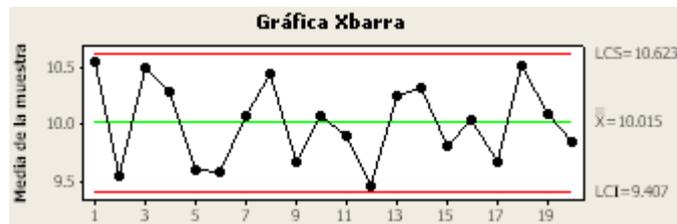


Figura 21. Gráfica Xbarra (Minitab Inc., 2016).

### iii.2 Gráfica R, S o MR

Rastrea la variación en los datos y evaluar si la variación del proceso es aceptable.



Figura 22. Gráfica R (Minitab Inc., 2016).

### iii.3 Gráfica de corrida

Busca la evidencia de patrones en los datos.

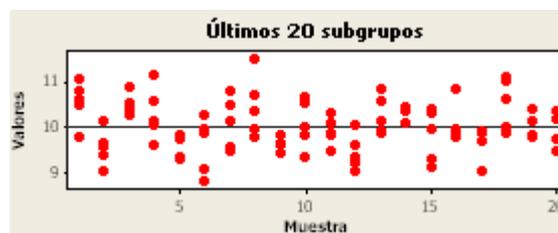


Figura 23. Gráfica de subgrupos (Minitab Inc., 2016).

### iii.4 Gráfica de probabilidad

Verifica si una distribución seleccionada se ajusta a los datos.

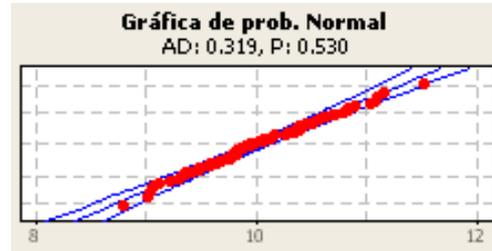


Figura 24. Gráfica de probabilidad normal (Minitab Inc., 2016).

#### iii.4.1 Línea intermedia

Es el percentil esperado de la distribución con base en estimaciones del parámetro de probabilidad máxima.

#### iii.4.2 Líneas de bordes de confianza

La línea izquierda curva indica los bordes inferiores de los intervalos de confianza para los percentiles. La línea derecha curva indica los bordes superiores de los intervalos de confianza para los percentiles.

#### iii.4.3 Estadístico de la prueba de Anderson-Darling y valor P

Los resultados de una prueba para determinar si sus datos siguen la distribución. Histograma de capacidad y gráfica de capacidad para comparar visualmente la distribución de los datos de su proceso con la dispersión de especificación. También incluye estadísticas de capacidad para evaluar cuantitativamente la capacidad de su proceso.

### iv. Histograma de capacidad

El histograma de capacidad muestra el desarrollo de los datos de acuerdo a los límites de especificación consignados dentro de sus especificaciones.

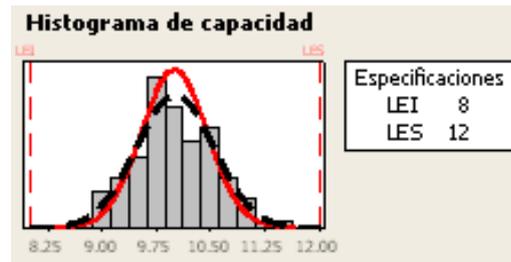


Figura 25. Histograma de capacidad (Minitab Inc., 2016).

#### v. Intervalo de Tolerancia

Se utilizó para detectar una variación excesiva, al comparar los requisitos del cliente con los límites de tolerancia que cubren una proporción aceptable de la población. Si el intervalo de tolerancia es más amplio que los requisitos del cliente, pudiera haber demasiada variación del producto. Derivados de estadísticas de muestra, los intervalos de tolerancia representan un rango de valores para una característica específica de calidad que posiblemente cubra una proporción específica de población. De manera alternativa, se puede construir un límite inferior o superior, de manera que la proporción especificada sea mayor o menor que el límite. El intervalo de tolerancia predeterminado establecido es de un 95% de confianza. Los análisis realizados en el laboratorio se tienen una certeza de un 95% seguro de que 95% de todas las muestras están dentro de sus anteriores Límites de Controles. Si este rango es más amplio que los requisitos, el proceso puede generar una pérdida considerable.

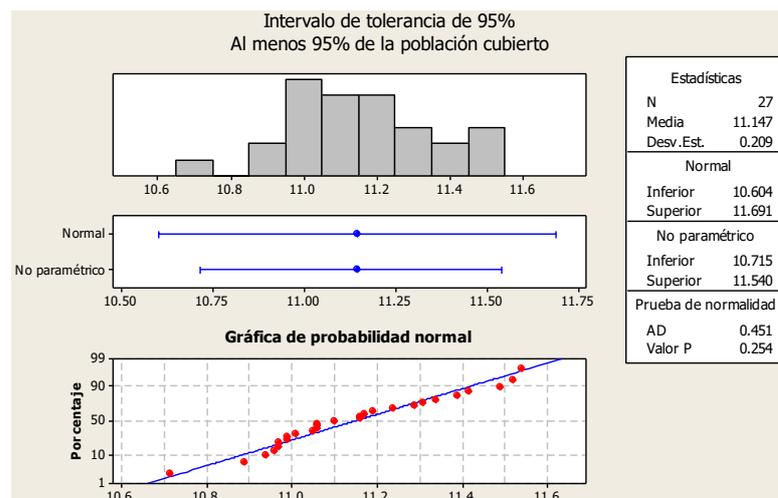


Figura 26. Intervalo de tolerancia (Minitab Inc., 2016).

#### vi. Análisis de capacidad

Es el informe de capacidad del proceso de datos normales donde, con la figura 00 de un histograma de capacidad con dos curvas normales sobrepuestas, adicionalmente con una tabla con las estadísticas de capacidad a corto plazo y largo plazo. Las dos curvas normales se generan utilizando la media del proceso y la desviación estándar “dentro de” y la media del proceso y la desviación estándar general (Minitab Inc., 2016).

Las estadísticas de los datos del proceso, muestran detalles tales como la media del proceso, la desviación estándar (dentro de) y general, las especificaciones del proceso (Z.Bench dentro y general, Cpk, Ppk), el desempeño observado PPM, el rendimiento (dentro de) esperado PPM, el rendimiento general PPM (Minitab Inc., 2016).

Por consiguiente, el informe también se puede utilizar para evaluar visualmente si los datos están distribuidos normalmente, si el proceso está centrado y si es capaz de satisfacer consistentemente las especificaciones del proceso. Los datos que provienen de

una distribución normal son apropiados para la mayoría de los datos del proceso (Minitab Inc., 2016).

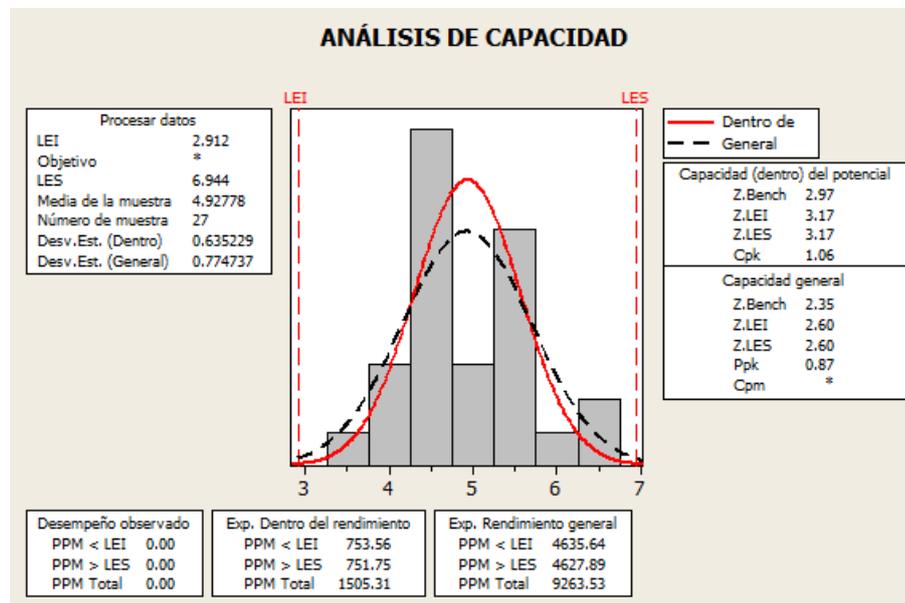


Figura 27. Análisis de capacidad (Minitab Inc., 2016).

\*Nota: Dicho procedimiento se realizó en cada característica (viscosidad, nitración, oxidación, hollín, sulfatación, TBN, Hierro, Cobre, Aluminio, Cromo, Plomo, Silicio y Sodio) para la obtención de los límites de control, adicionalmente con su respectivo análisis de capacidad de las muestras de aceite lubricante extraído del motor de la tractor oruga D8T.

### 3.3.2 Evaluación de datos fuera de los parámetros de los límites de control para crear un historial de confiabilidad para el mantenimiento preventivo.

La compilación los datos que estuvieron fuera de los límites de control en la parte del análisis de capacidad sixpack, tomados como causas asignables, seguidamente se ordenaron de acuerdo a su fecha de muestreo y análisis (intervalos de cambio a las 250

horas de trabajo), obteniendo un panorama general donde se puede evaluar la interacción de las causas asignables por fecha de muestreo, para poder detectar y conocer los problemas en el motor y corregirlos.

### 3.3.3 Optimizar el análisis de los límites condenatorios para la implementación de un plan de mantenimiento preventivo en el motor de un tractor D8T

La fórmula para el cálculo de la capacidad del proceso que más se usa es: capacidad del proceso =  $\pm 3\sigma$  (un total de  $6\sigma$ ) donde “ $\sigma$ ” es la desviación estándar del proceso cuando se encuentra bajo control estadístico. Adicionalmente si el proceso está centrado en la especificación nominal y sigue una distribución de probabilidad 99.73% de la producción estará a menos de  $3\sigma$  de la especificación nominal.

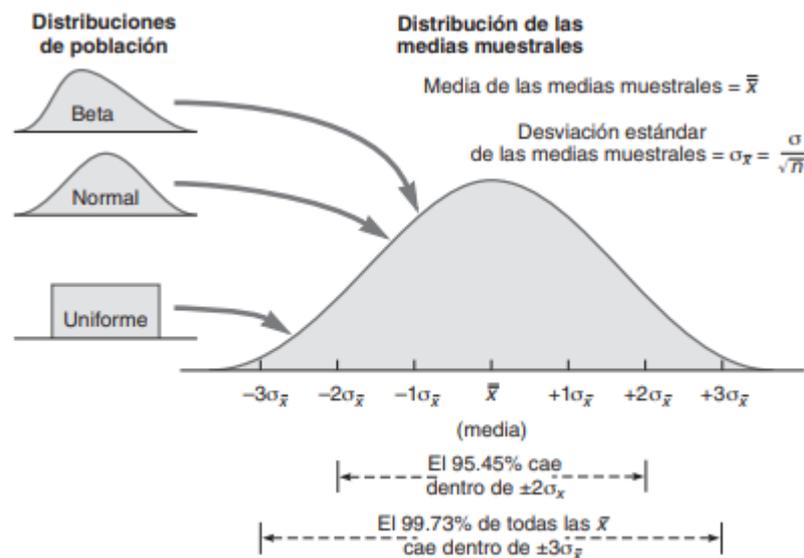


Figura 28. Distribución de las medias muestrales (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2009).



Un proceso que cumple bien con los límites de especificación (rango de especificación =  $\pm 3\sigma$ ) tiene un  $C_p=1$ . Lo crítico de muchas aplicaciones y la realidad de que el promedio del proceso no permanecerá en el punto medio del rango de especificación sugiere que  $C_p$  debe ser al menos 1,33.

En este contexto es útil tener un índice de habilidad que refleje ambas variaciones y la localización del promedio del proceso. El índice es  $C_{pk}$  ecuación (16) o índice de capacidad del proceso, el cual refleja la proximidad de la media actual del proceso al Límite de Especificación Superior (LES) o al Límite de Especificación Inferior (LEI) según indican (Bluehost, 2020; Ruiz-Falco, 2006).

$$C_{pk} = \text{Min} \left[ \frac{\psi - LEI}{3S}; \frac{LES - \psi}{3S} \right] \quad (16)$$

$\Psi$  = promedio doble

$C_{pk}$  es una medida de la capacidad potencial del proceso.  $P_{pk}$  es una medida de la capacidad general del proceso. Tanto  $C_{pk}$  como  $P_{pk}$  son mayores que 1.33, que es un valor mínimo generalmente aceptado.

Se puede aplicar a datos de muestra de prueba de muestras de aceite en servicio recogidas de otros equipos aplicaciones donde se monitorea el desgaste, el estado del aceite o la contaminación del sistema es importante.

i. control de proceso estadístico (SPC)

Conjunto de técnicas para mejorar la calidad del resultado del proceso reduciendo variabilidad mediante el uso de uno o más gráficos de control y una estrategia de acción correctiva utilizada para devolver el proceso a un estado del control estadístico.

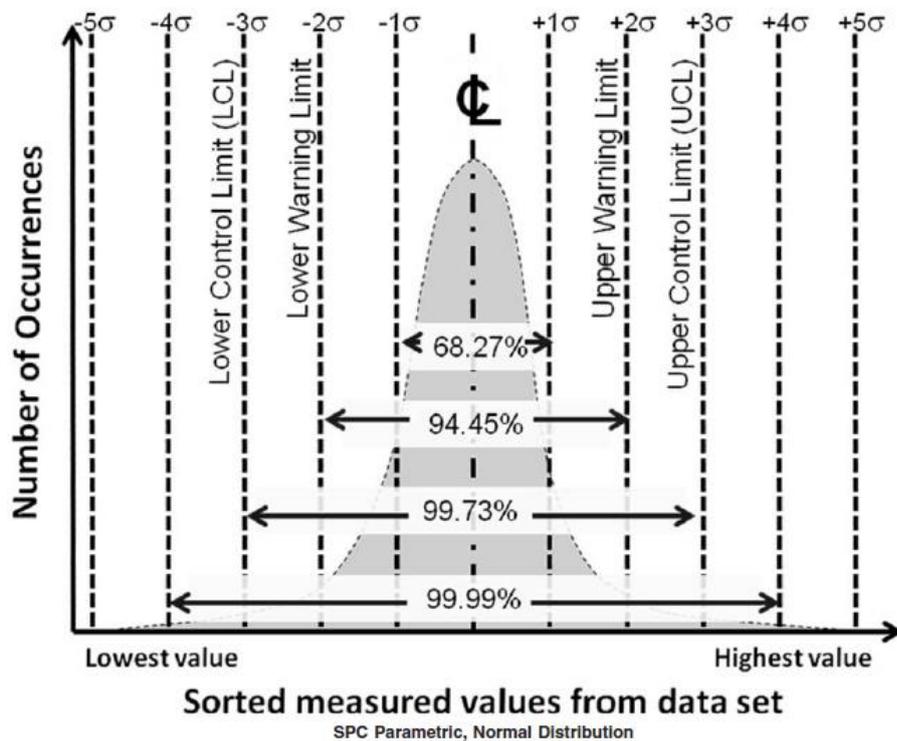


Figura 29. SPC Tres sigma o distribución de Límites de control normal (ASTM D 7720-11, 2017)

### 3.3.4 Diagrama de flujos

A continuación, en la Figura 30 se muestra el diagrama de flujo realizado.

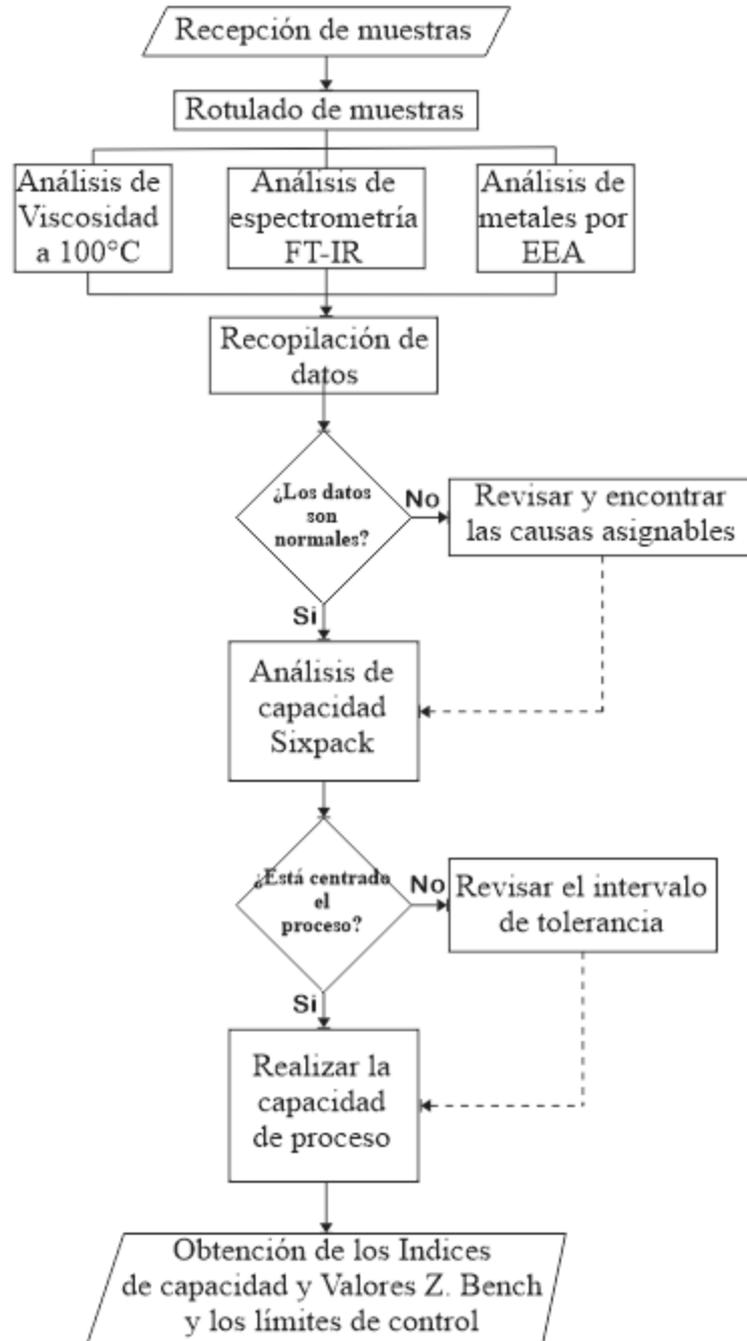


Figura 30. Diagrama de Flujo de Proceso

Fuente: Elaboración propia

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se analizaron e interpretaron los datos obtenidos en la ejecución. La investigación longitudinal de tendencia, donde se analizan los cambios a través del tiempo dentro de un grupo en general, la atención se centró en el grupo y se examinó su evolución a lo largo del periodo de estudio, dicho estudio, y facilita la generalización dando así una mayor validez externa.

Los **Anexos 13, 14 y 15**, presentan un análisis detallado del procedimiento para estimar el análisis de capacidad de proceso.

#### **4.1 OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONTROL Y EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD EN LOS DATOS DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS METALES DE DESGASTE Y CONTAMINANTES.**

En la Figura 31, se describe el desempeño de la tendencia de la viscosidad en función del tiempo donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para la viscosidad a 100°C indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

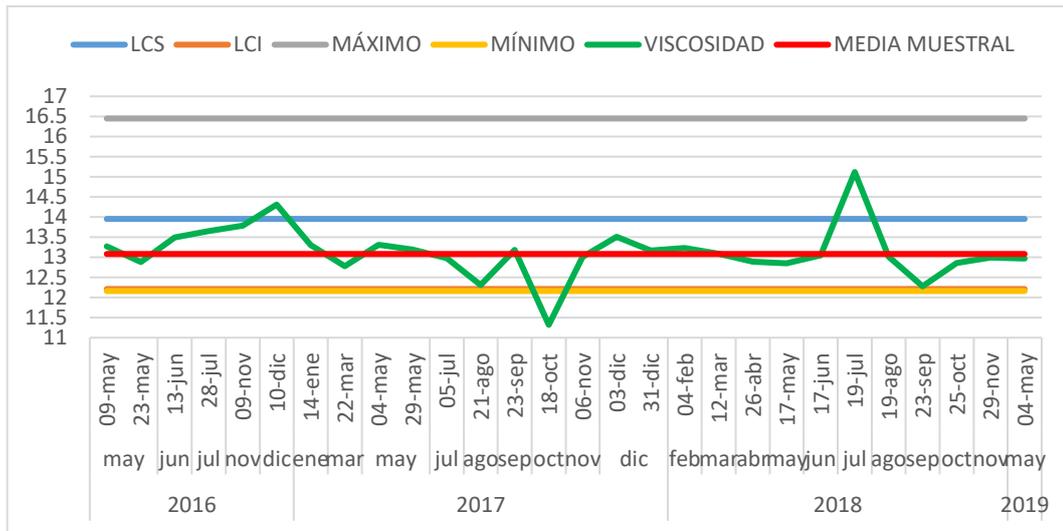


Figura 31. Tendencia viscosidad a 100°C.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 32, el valor de la capacidad general Z “Z. General” es 2.39, la capacidad (dentro) del potencial Z “Z. Dentro” es 2.96, el mayor de estos valores Z indica que el proceso tiene menos defectos y la evaluación comparativa ayuda a medir la calidad del proceso (Pérez Urrego et al., 2014) posteriormente a la comparación se observa un incremento en la capacidad de proceso en 23.85%.

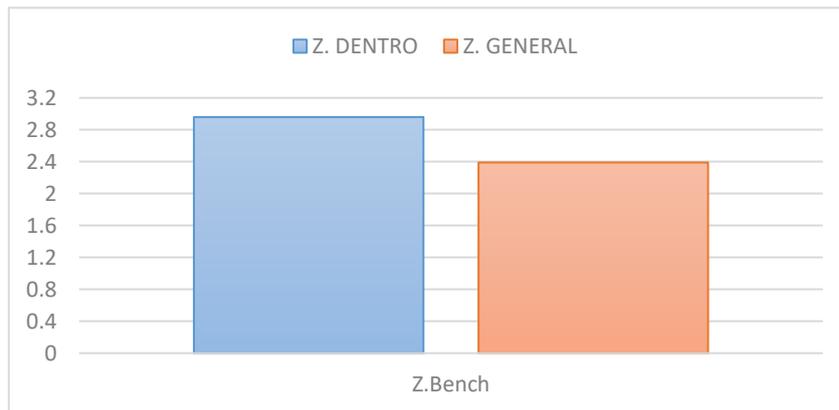


Figura 32. Z. Bench para viscosidad a 100°C

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 33, nuestra capacidad real en corto plazo (Cpk) alcanza un valor de 1.06, sin embargo (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2009) recomiendan que este valor debería ser mayor a 1.25 para que sea un proceso con capacidad satisfactoria, en cambio la capacidad a largo plazo (Ppk) es 0.88, con la reducción de ocurrencia de defectos se elevará el potencial de las capacidades (Cpk) y (Ppk).

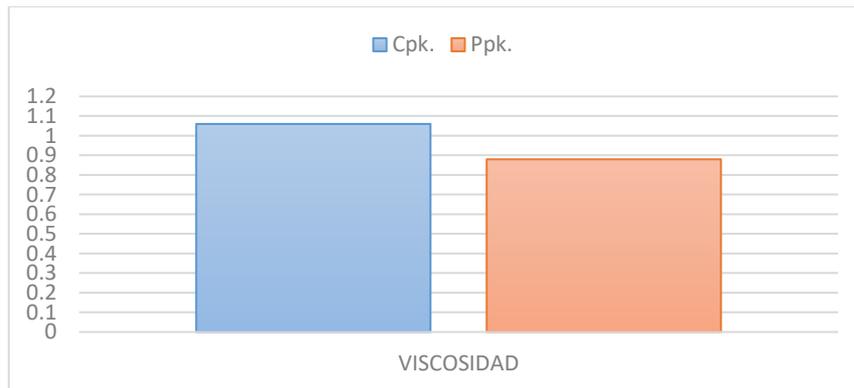


Figura 33. Cpk & Ppk para viscosidad a 100°C

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 34, se describe el desempeño de la tendencia de la nitración en función del tiempo donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para la nitración indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

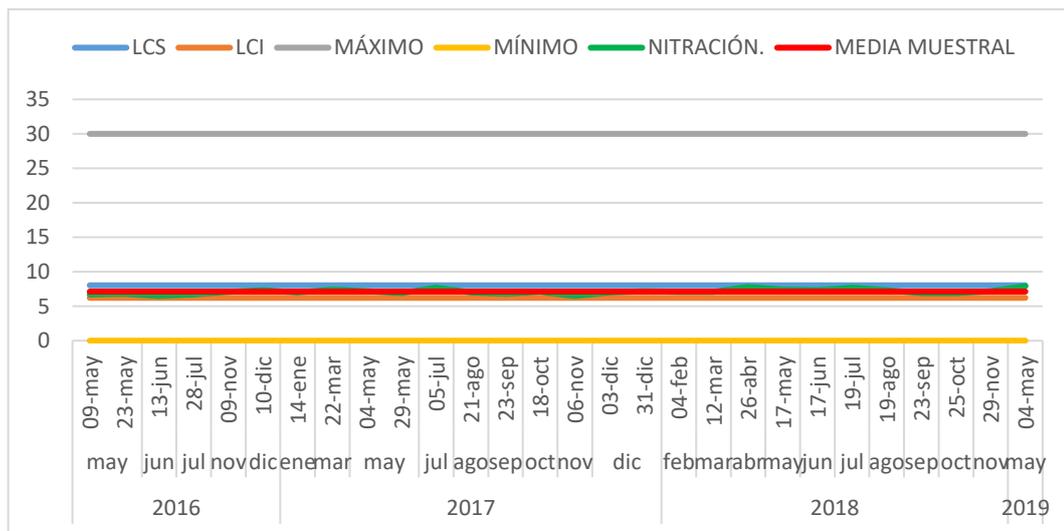


Figura 34. Tendencia de nitración

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 35, se describe el desempeño de la tendencia de la oxidación en función del tiempo donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para la oxidación indicado en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

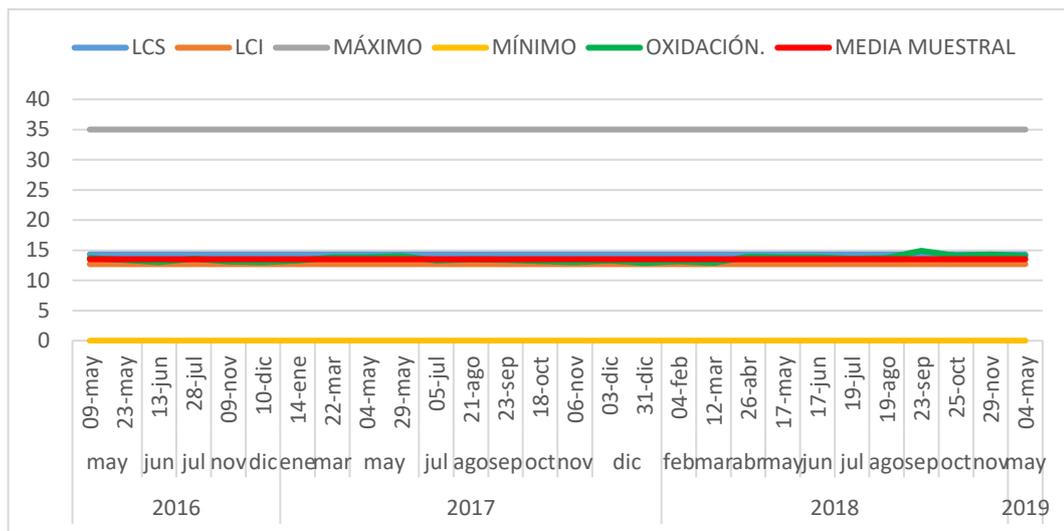


Figura 35. Tendencia de oxidación.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 36, se describe el desempeño de la tendencia del hollín en función del tiempo donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para el hollín indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

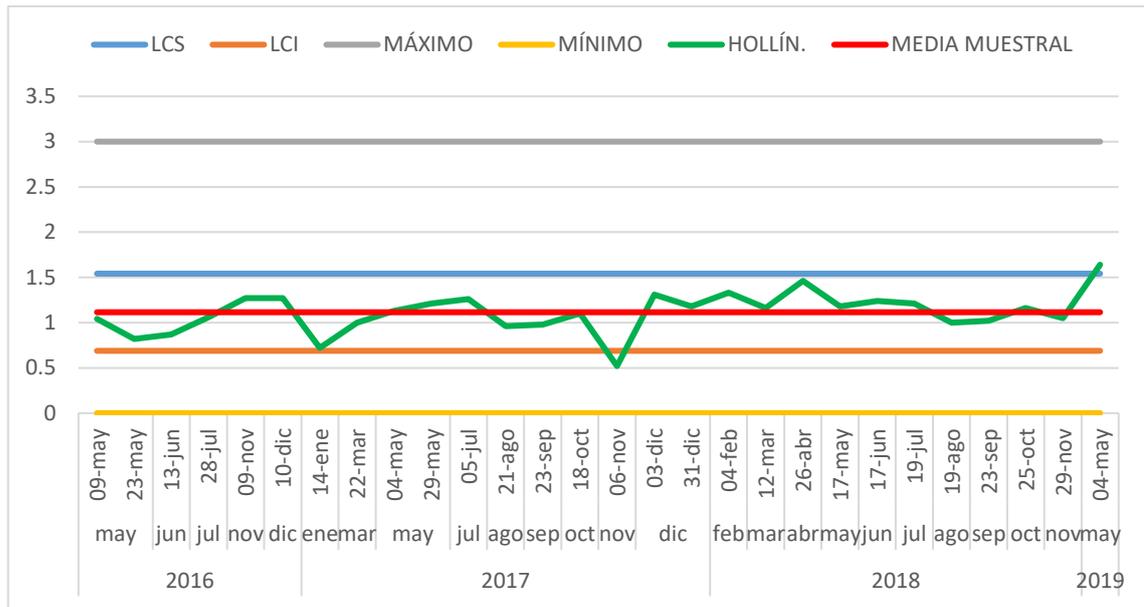


Figura 36. Tendencia de hollín

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 37, se describe el desempeño de la tendencia de la sulfatación en función del tiempo donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para la sulfatación indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

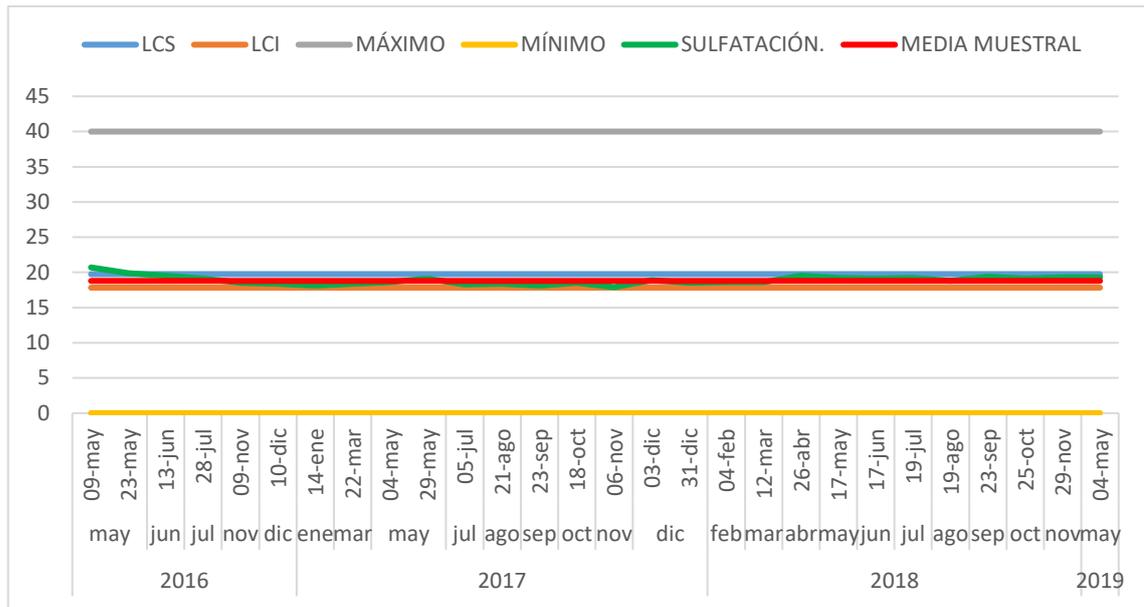


Figura 37. Tendencia de sulfatación

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 38, se describe el desempeño de la tendencia del TBN en función del tiempo donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para el TBN indicados en el **Anexo 9** y **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

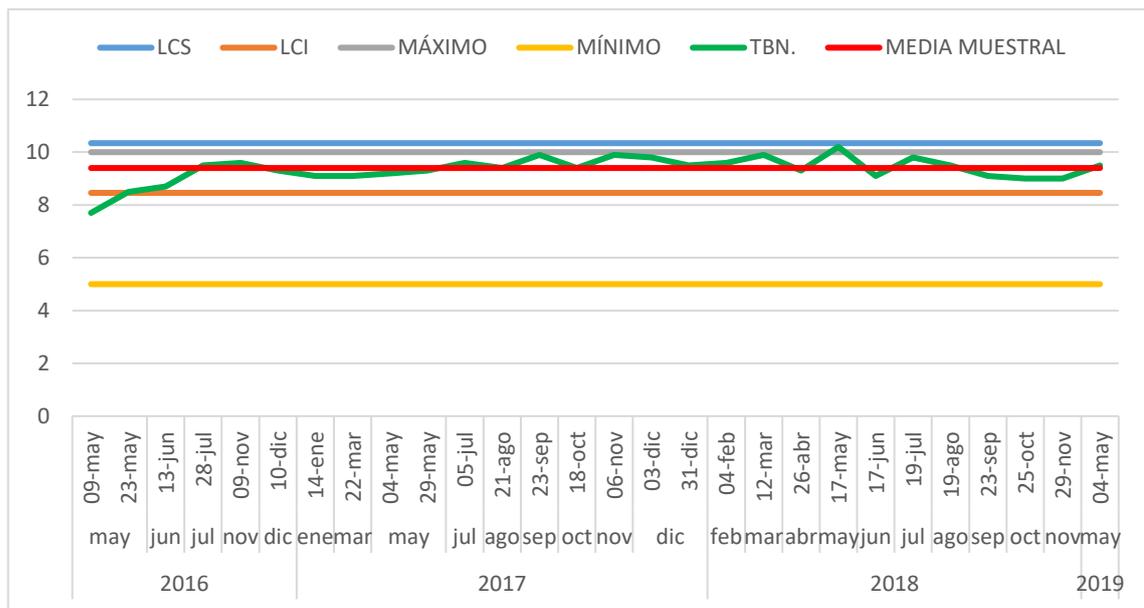


Figura 38. Tendencia de TBN

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 39, los valores para: nitración, oxidación, hollín, sulfatación y TBN tienen la capacidad general Z “Z. General” de: 2.34, 2.35, 2.37, 2.37 y 2.35, la capacidad (dentro) del potencial Z “Z. Dentro” es: 2.88, 3.65, 2.9, 3.65 y 3.02, estos valores mayores Z indican que el proceso tiene menos defectos y la evaluación comparativa ayuda a medir la calidad del proceso (Pérez Urrego et al., 2014) posteriormente a la comparación se observa un incremento en la capacidad de proceso en 23.08%, 55.32%, 22.36%, 54.01% y 28.51% respectivamente .

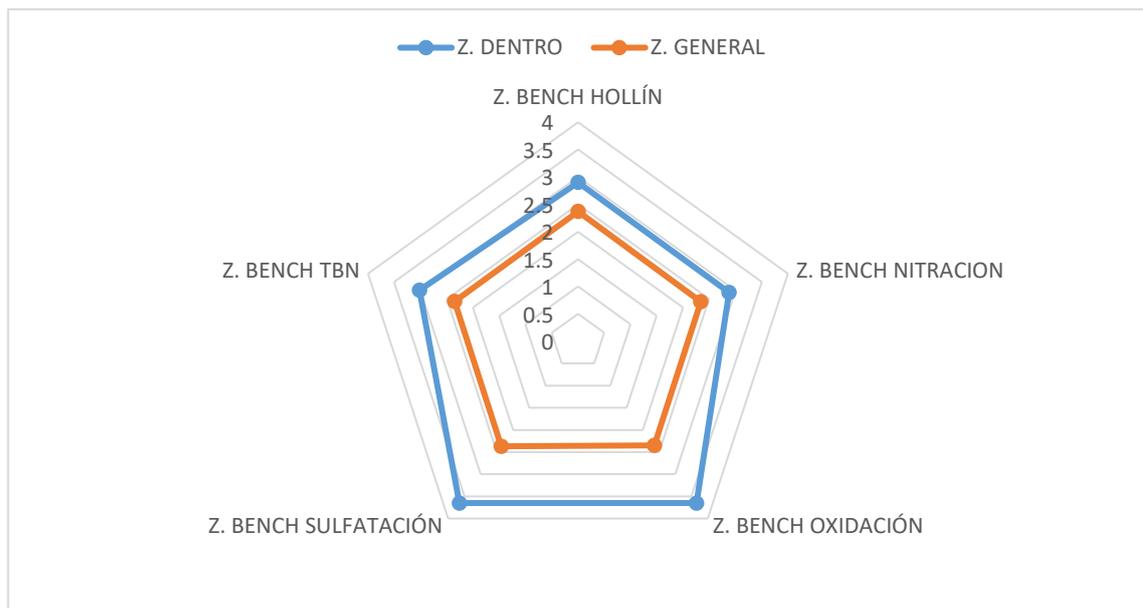


Figura 39. Z. BENCH para FT-IR

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 40, nuestras capacidades reales para: nitración, oxidación, hollín, sulfatación y TBN, en corto plazo (Cpk) alcanza los valores de: 1.03, 1.27, 1.04, 1.28 y 1.07, sin embargo (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2009) recomiendan que este valor debería ser mayor a 1.25 para que sea un proceso con capacidad satisfactoria, en cambio la capacidad a largo plazo (Ppk) es: 0.86, 0.87, 0.87, 0.87 y 0.87 respectivamente; con la reducción de ocurrencia de defectos se elevará el potencial de las capacidades (Cpk) y (Ppk).

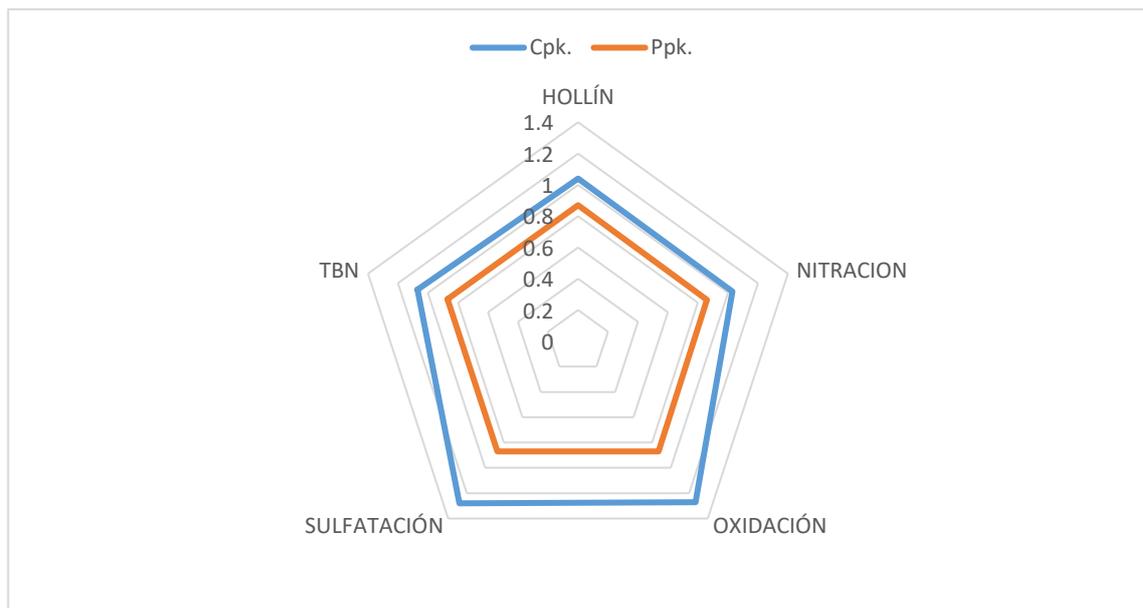


Figura 40. Cpk & Ppk para FT-IR

Fuente: Elaboración propia

El monitoreo infrarrojo por la transformada de Fourier para los parámetros: como oxidación, nitración, sulfatación, hollín pueden ser aplicados en un análisis rápido de laboratorio de análisis de aceite lubricantes (Yingzhong et al., 2016).

En la Figura 41, se describe el desempeño de la tendencia del desgaste de cobre en función del tiempo, donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para el desgaste de cobre indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

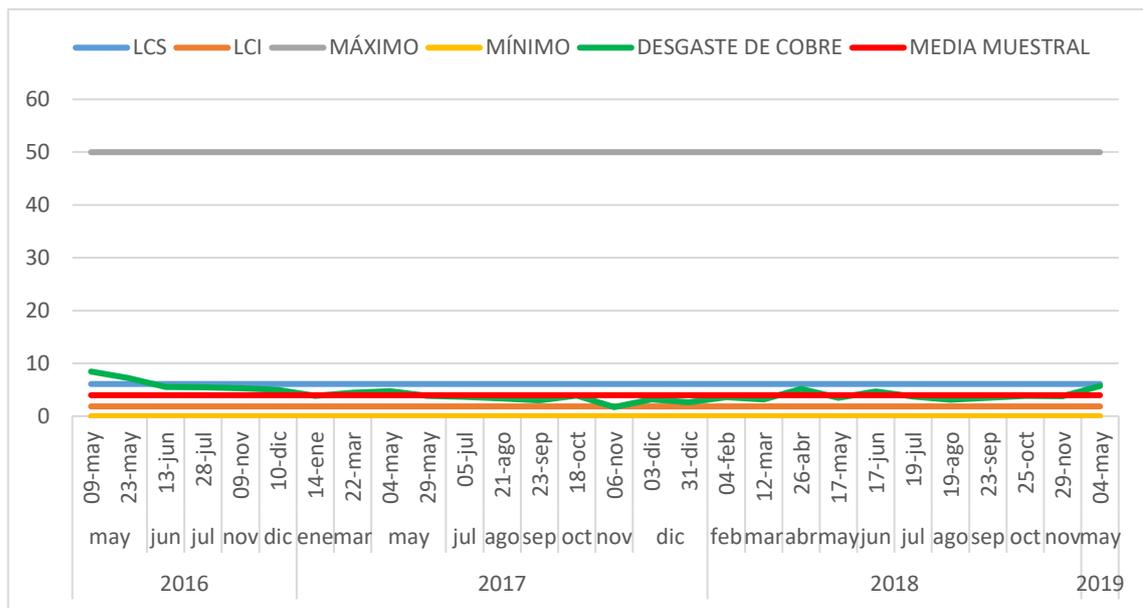


Figura 41. Tendencia de desgaste de cobre

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 42, se describe el desempeño de la tendencia del desgaste de hierro en función del tiempo, donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para el desgaste de hierro indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

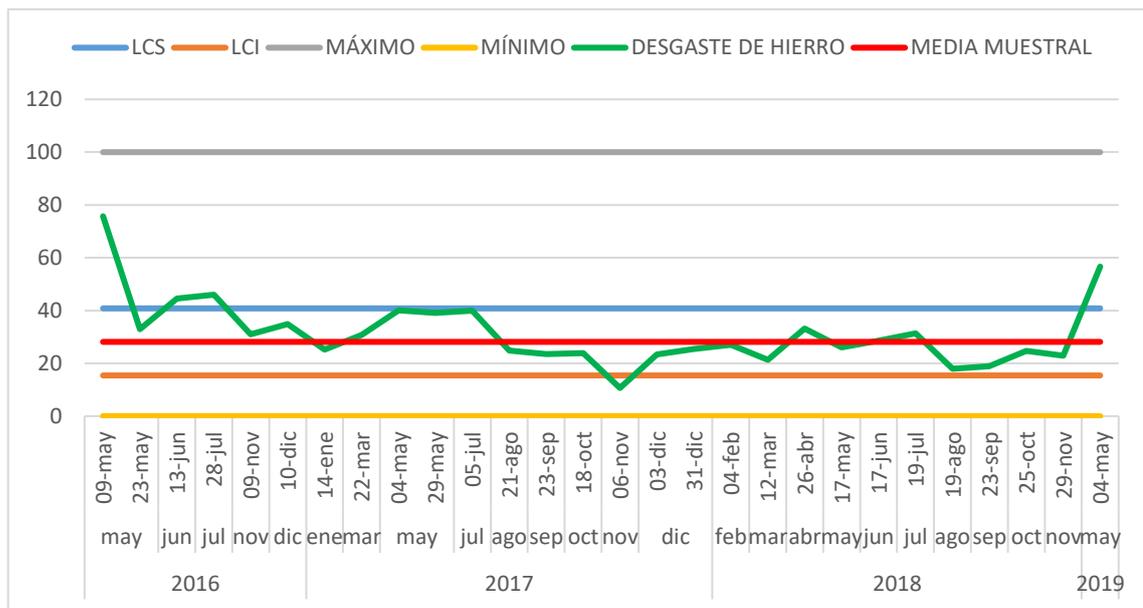


Figura 42. Tendencia de desgaste de hierro

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 42, se describe el desempeño de la tendencia del desgaste de cromo en función del tiempo, donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para el desgaste de cromo indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

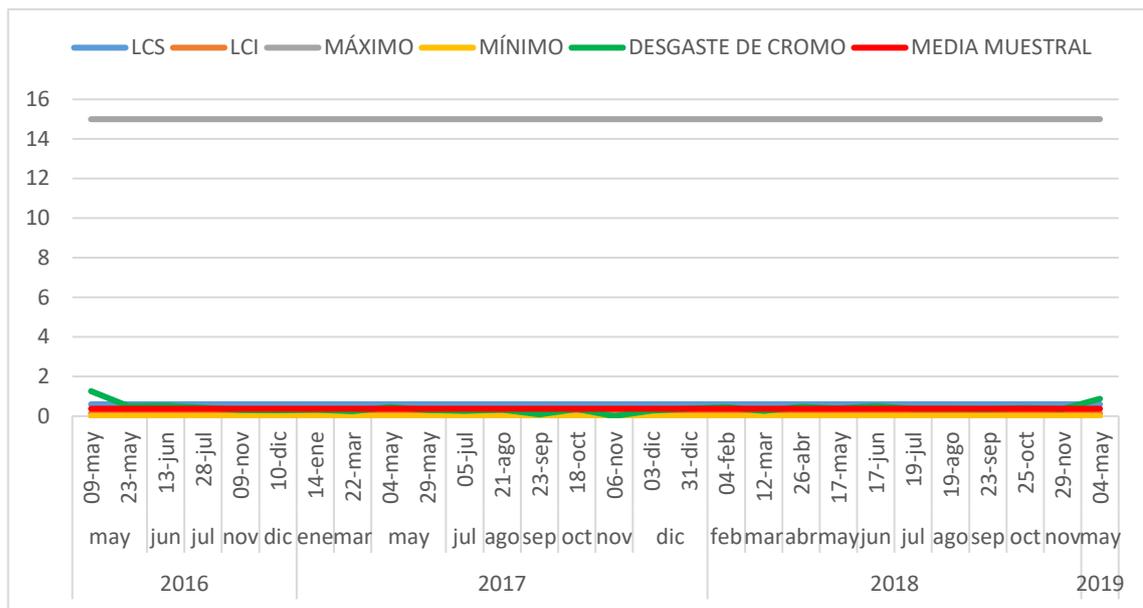


Figura 43. Tendencia de desgaste de cromo

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 44, se describe el desempeño de la tendencia del desgaste de cromo en función del tiempo, donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para el desgaste de cromo indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

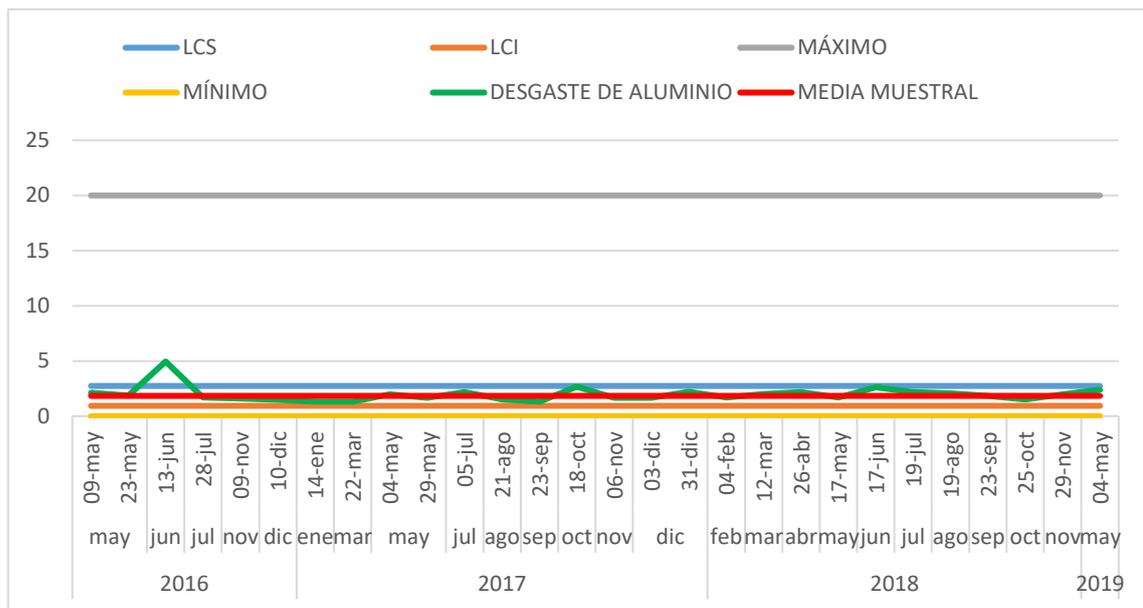


Figura 44. Tendencia de desgaste de aluminio

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 45, se describe el desempeño de la tendencia del desgaste de plomo en función del tiempo, donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para el desgaste de plomo indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

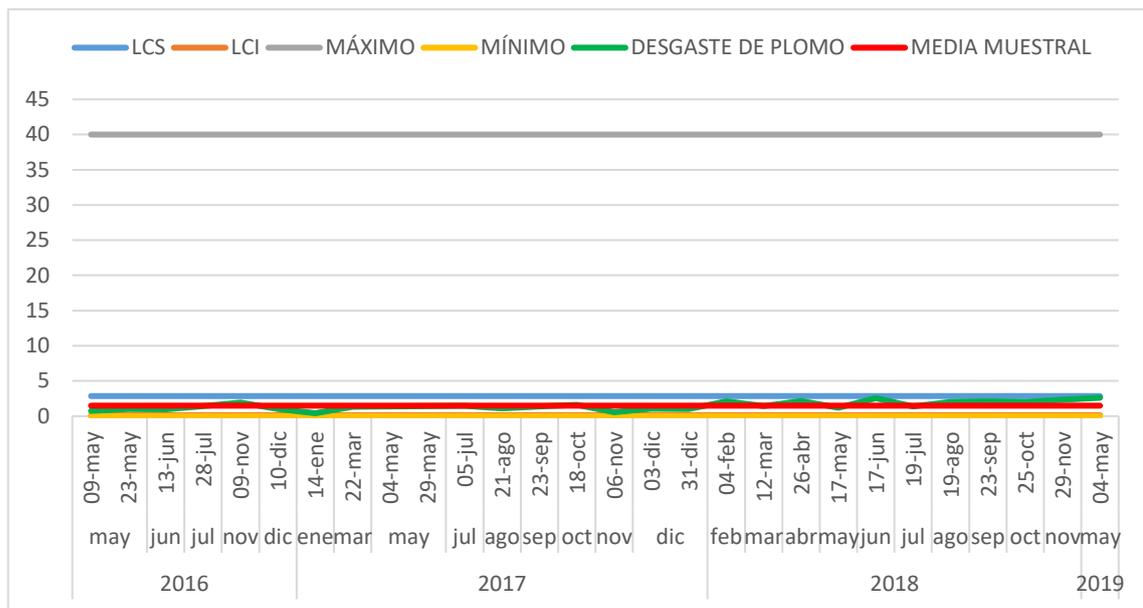


Figura 45. Tendencia de desgaste de plomo

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 46, se describe el desempeño de la tendencia del contaminación con silicio en función del tiempo, donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para la contaminación con silicio indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

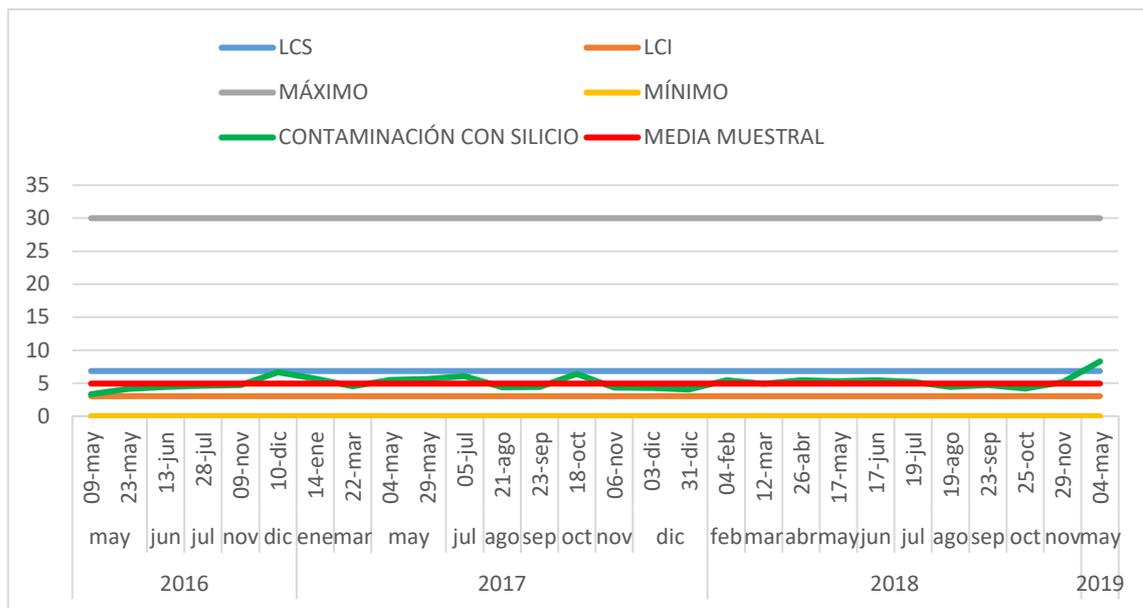


Figura 46. Tendencia de contaminación por silicio.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 47, se describe el desempeño de la tendencia del contaminación con sodio en función del tiempo, donde el “límite máximo y límite mínimo” son los valores para la contaminación con sodio indicados en el **Anexo 13**, seguidamente se puede observar que la “media muestral” no está de acuerdo a los valores de la tendencia, razón por lo cual será necesario contrastar con el “límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI)” obtenidos del análisis de capacidad como lo realizó (Saldivia, 2013).

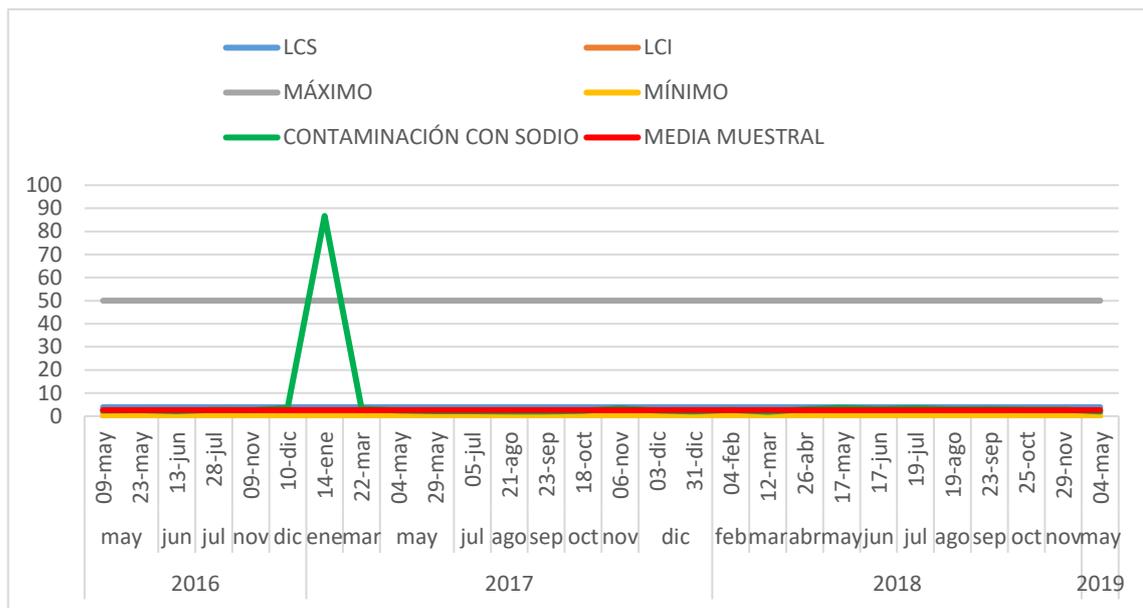


Figura 47. Tendencia de contaminación por sodio

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 48, luego de la realización de pruebas a las 250 horas de trabajo se evidencian cantidades de hierro (Fe), cobre (Cu) y aluminio (Al), de manera que se demuestra que estos son los metales de desgaste que se presentan consistentemente en cantidades relativamente grandes en las muestras de aceite lubricante usado además se indica que aumenta con el tiempo de operación del mecanismo. (Latip et al., 2013).

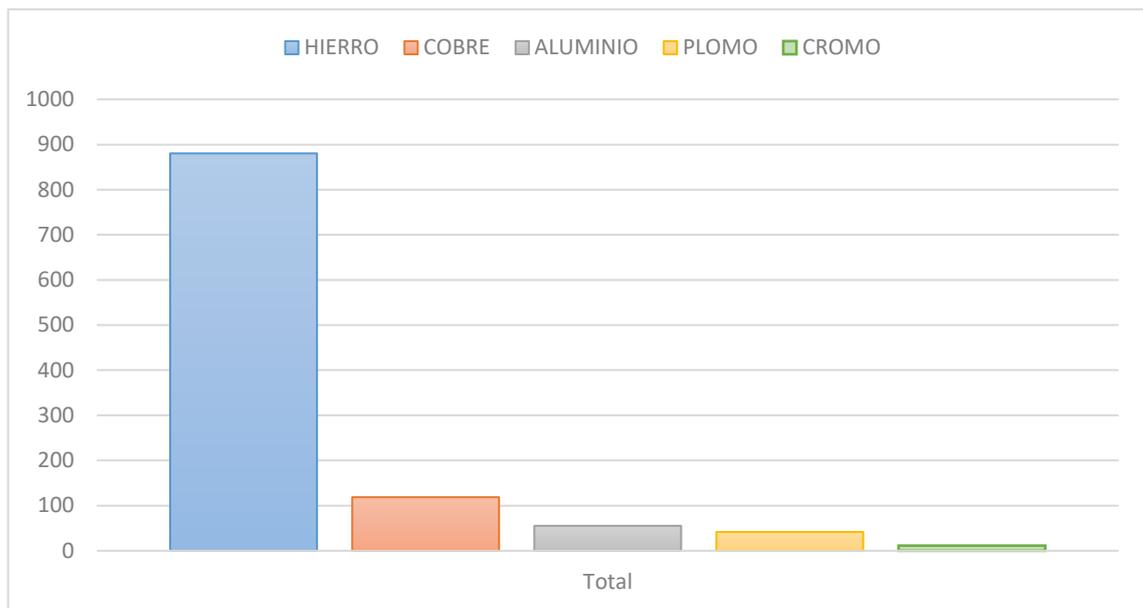


Figura 48. Cantidad de metales de desgaste analizados

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 49, se observa la cantidad de contaminante que se determinó en los resultados de laboratorio siendo el sodio componente del refrigerante, como lo menciona (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015), esto nos indica evidencia de la contaminación del aceite lubricante con el refrigerante y el ingreso de tierra, polvo atmosférico o arena al sistema.

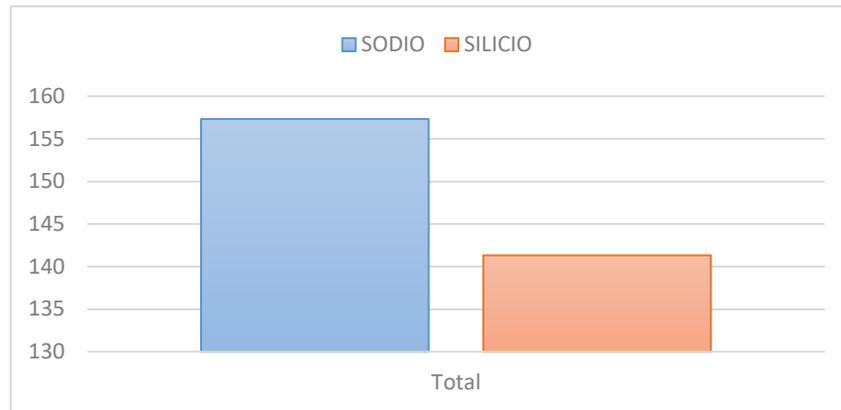


Figura 49. Análisis de metales contaminantes

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 50, los valores para: cobre, hierro, cromo, aluminio, plomo, silicio y sodio, tienen la capacidad general Z “Z. General” de: 2.37, 2.44, 2.42, 2.37, 2.32, 2.35 y 2.36, la capacidad (dentro) del potencial Z “Z. Dentro” es: 3.47, 3.86, 2.71, 2.79, 3.09, 2.97 y 3.07, estos valores mayores Z indican que el proceso tiene menos defectos y la evaluación comparativa ayuda a medir la calidad del proceso (Pérez Urrego et al., 2014) posteriormente a la comparación se observa un incremento en la capacidad de proceso en 46.41%, 58.20%, 11.98%, 17.72%, 33.19%, 26.38% y 30.08% respectivamente.

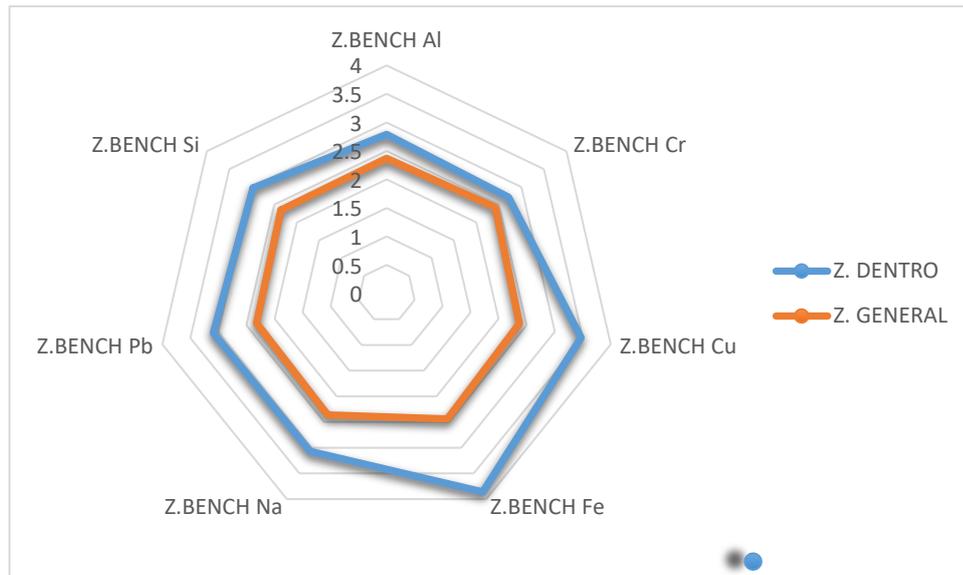


Figura 50. Z. BENCH metales

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 51 nuestras capacidades reales para: cobre, hierro, cromo, aluminio, plomo, silicio y sodio, en corto plazo (Cpk) alcanza los valores de: 1.22, 1.34, 0.98, 1.00, 1.09, 1.06 y 1.09, sin embargo (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2009) recomiendan que este valor debería ser mayor a 1.25 para que sea un proceso con capacidad satisfactoria, en cambio la capacidad a largo plazo (Ppk) es: 0.87, 0.89, 0.89, 0.87, 0.85, 0.87 y 0.87, respectivamente; con la reducción de ocurrencia de defectos se elevará el potencial de las capacidades (Cpk) y (Ppk).

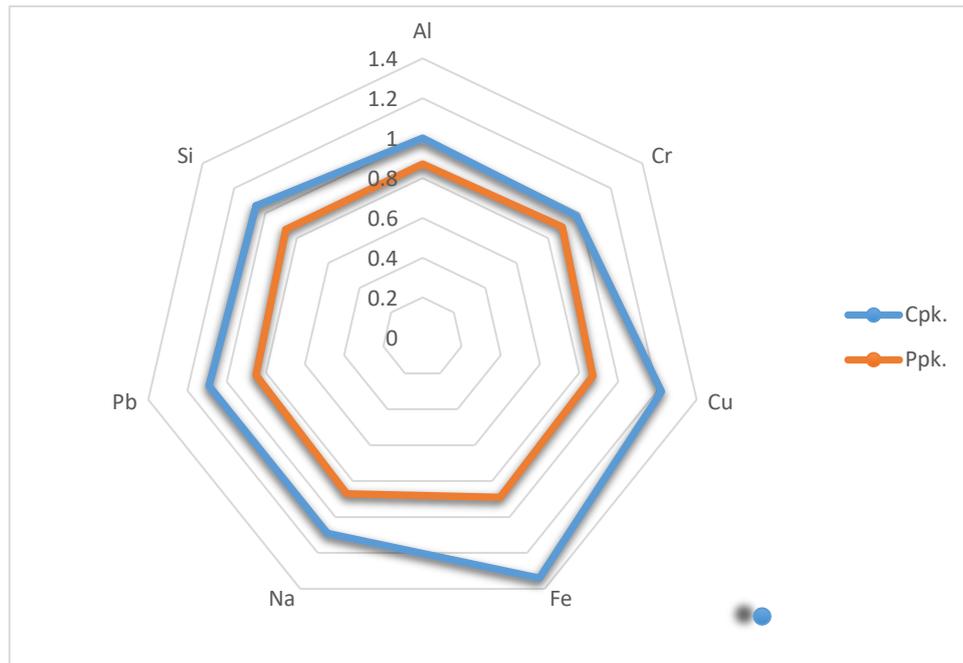


Figura 51. Cpk & Ppk para metales

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 52, los valores para: silicio y sodio tienen la capacidad general Z “Z. General” de: 2.35 y 2.36, la capacidad (dentro) del potencial Z “Z. Dentro” es: 2.97 y 3.07, estos valores mayores Z indican que el proceso tiene menos defectos y la evaluación comparativa ayuda a medir la calidad del proceso (Pérez Urrego et al., 2014) posteriormente a la comparación se observa un incremento en la capacidad de proceso en 26.38% y 30.08% respectivamente.

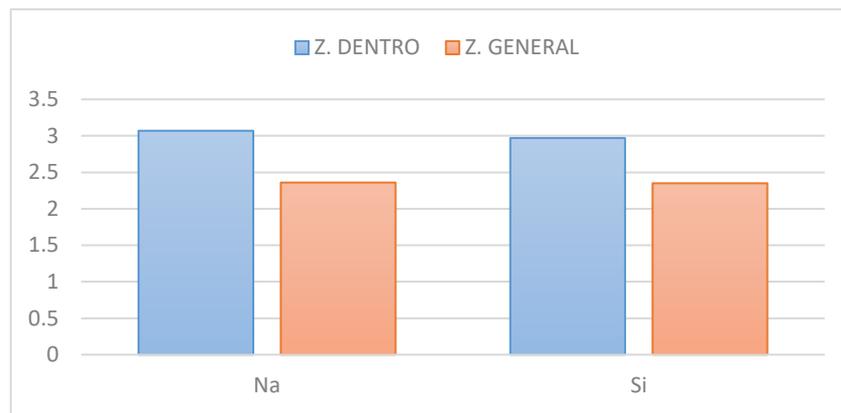


Figura 52. Z. BENCH para metales contaminantes

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 53, nuestras capacidades reales para: silicio y sodio, en corto plazo (Cpk) alcanzan los valores de: 1.06 y 1.09, sin embargo (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2009) recomiendan que este valor debería ser mayor a 1.25 para que sea un proceso con capacidad satisfactoria, en cambio la capacidad a largo plazo (Ppk) es: 0.87 y 0.87 respectivamente; con la reducción de ocurrencia de defectos se elevará el potencial de las capacidades (Cpk) y (Ppk).

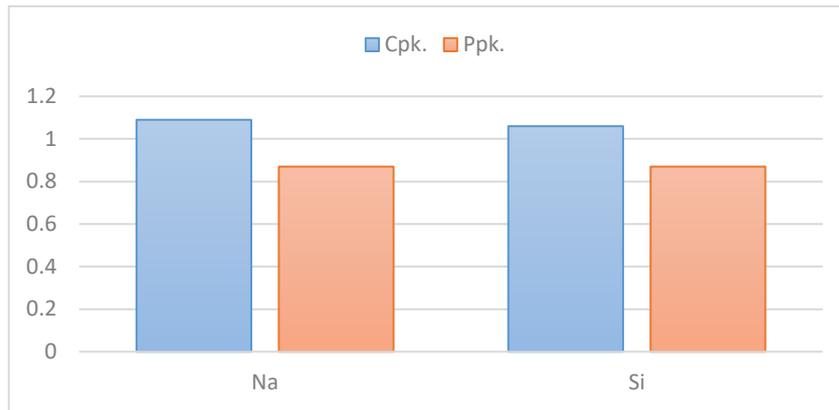


Figura 53. Comparación de mejora Cpk & Ppk para metales contaminantes

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 EVALUACIÓN DE LOS DATOS FUERA DE LOS PARÁMETROS EN LOS LÍMITES DE CONTROL PARA LA CREACIÓN DE UN HISTORIAL DE CONFIABILIDAD PARA EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

En la Figura 54, se describe la recopilación de los parámetros que se encontraban fuera de los parámetros de control en función del muestreo. Seguidamente se identifica según las horas de trabajo del aceite lubricante mostrado en la Tabla 14 de causas asignables, para posteriormente identificar el motivo de su variación.

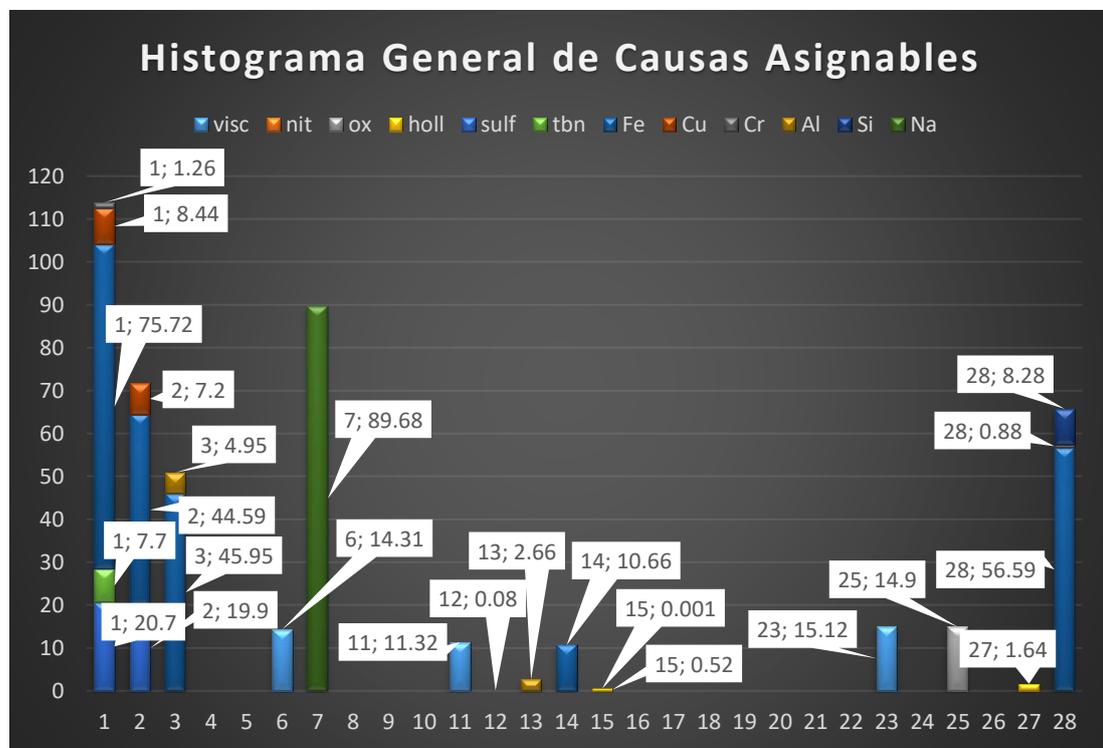


Figura 54. Histograma General de causas asignables

Fuente: Elaboración propia



Tabla 9. Causas Asignables

Eje X	Horas	Puntos del eje Y
Punto 01	265	Sulfatación 20.7, TBN 7.7, Cobre 8.44, Hierro 75.72, Cromo 1.26
Punto 02	235	Sulfatación 19.9, Cobre 7.2, Hierro 44.59
Punto 03	214	Hierro 45.95, Aluminio 4.95
Punto 06	267	Viscosidad 14.31
Punto 07	243	Sodio 89.68
Punto 11	264	Viscosidad 11.32
Punto 12	224	Cromo 0.08
Punto 13	237	Aluminio 2.66
Punto 14	235	Hierro 10.66
Punto 15	113	Hollín 0.52, Cromo 0.001
Punto 23	272	Viscosidad 15.12
Punto 25	270	Oxidación 14.9
Punto 27	260	Hollín 1.64
Punto 28	299	Hierro 56.59, Cromo 0.88, Silicio 8.28

Fuente: Elaboración propia.

El posible motivo de la aparición de estos parámetros fuera de control según bibliografía nos indicaría lo siguiente.

### **Viscosidad del aceite**

Es el principal parámetro que se mide y se considera el principal indicador de desempeño y se realiza la medición a 100°C que es la temperatura más cercana del aceite en el cárter de un motor. El aceite de un motor debe tener condiciones mínimas para seguir operando y debe permanecer entre 12.0 y 18.0 centi-stok a 100°C durante toda su vida útil (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015).

### ***FT-IR:***

- Hollín:

Solo está presente en los aceites de motor y se forma por una combustión incompleta del combustible. Se mantiene en suspensión debido a los Aditivos Dispersantes de aceite, aunque llegar a precipitarse por presencia de excesiva (Lubrisa, 2020).

- Oxidación:

La Oxidación del aceite se origina por el enlace de moléculas de Oxígeno con las de Lubricante. Su reacción se acelera cuando la temperatura es alta o cuando existe un catalizador como el Cobre o Glicol del refrigerante. La oxidación se produce cuando se prolonga los intervalos a cambio del aceite, causando aumento en la viscosidad del aceite y pérdida de sus propiedades, provocando formación de ácidos orgánicos (Lubrisa, 2020). Catalizador Cu/Fe/Agua, La oxidación es un proceso químico que tiene que ver con la presencia de distintos catalizadores y pro-oxidantes, como son el calor, el agua, el oxígeno, los metales, etc. (Noria Corporation., 2014b).

- Nitración:

Es originad en todos los aceites de motor, pero en particular en motores a gas. Causa aumento de la viscosidad y reduce las propiedades lubricantes del aceite (Lubrisa, 2020).

- Sulfatación:

La sulfatación proviene de la combustión. y se lo toma como la medida de degradación del aceite (Lubrisa, 2020).

- Agua:

El agua reduce la capacidad del lubricante del aceite, puede originar pequeñas explosiones de vapor que pueden fracturar el metal (Lubrisa, 2020).



- **Combustible:**

Una pequeña cantidad de combustible en el aceite es normal como resultado del proceso de combustión, pero si el nivel excede ciertos límites, se reduce la viscosidad del aceite y por ende la capacidad de lubricación del aceite (Lubrisa, 2020).

- **TBN**

Es la característica del aceite de neutralizar los productos ácidos de la combustión como el ácido sulfúrico, que se forman por reacción química del azufre contenido en el combustible (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015).

#### **Metales de desgaste y contaminantes:**

- **Sílice - Hierro – Cromo – Aluminio**

Entrada de aire al sistema debido al filtro, contaminante con tierra (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014).

- **Sílice – Plomo – Aluminio**

Contaminación con tierra (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014).

- **Sílice – Hierro – Aluminio**

Contaminación con tierra, arcilla (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014).

- **Hierro – Cromo – Aluminio**

Temperaturas anormales de operación, degradación del aceite por contaminación con refrigerante o combustible (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014).



- Hierro

Temperaturas anormales de operación, lubricación deficiente, depósitos de herrumbre (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014).

- Hierro – Sodio – Cromo

Entrada de Agua, Perdida de precarga (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014)..

- Cromo – Molibdeno – Aluminio

Gases de escape, consumo y degradación de aceite (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014).

- Plomo – Aluminio

Falta de lubricación, contaminación de refrigerante y combustible (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014).

- Cobre – Hierro

Degradación del aceite por contaminación (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014).

- Aluminio – Hierro – Cobre

Desgaste/ daño de cojinetes (Buchelli Carpio & Garcia Granizo, 2015; Lubrisa, 2020; Pozo Morejón et al., 2014).

- Sodio

Contaminante que se encuentra en el refrigerante (Pozo Morejón et al., 2014; Widman International SRL, 2018)



### **4.3 OPTIMIZAR EL ANÁLISIS DE LOS LÍMITES CONDENATORIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN EL MOTOR DE UN TRACTOR D8T.**

Las figuras mostradas a continuación son representaciones de la optimización de los diferentes procesos elevando el valor Z, el mismo que nos da un valor que está aproximándose al nivel  $6\sigma$  (seis sigma) (Minitab Inc., 2019). A la vez se indican como límites estadísticos o condenatorios a las desviaciones estándar de los promedios históricos normalizados de cada proceso. La literatura reporta el empleo de dichos límites como: “Alerta”, “Crítico” y “Normal” (Pozo Morejón et al., 2014).

Se establecieron los límites condenatorios denominados de la siguiente manera: “límite crítico”  $X \pm 3S$  denominando como LCS y LCI, “límite alerta”  $X \pm 2S$  denominando como -2 Sigma y +2 Sigma, “valor normal”  $X \pm S$  denominando como +1 Sigma y -1 Sigma, donde X representa la media muestral estadística de los datos históricos de las variables de interés de un análisis de aceite y “S” la desviación estándar así como lo indican (Arellano Ortiz, 2009; Jara Trujillo, 2015; Mendoza Quispe, 2017; Pozo Morejón et al., 2014). Se decidió efectuar la normalización de datos y como consecuencia las causas que fueron identificadas convenientemente fueron descubiertas y eliminadas, debido a que estas causas provocan que el proceso no funcione como se desea (Arellano Ortiz, 2009; Pozo Morejón et al., 2014; Ruiz-Falco, 2006). Las actualizaciones de estos datos explican y constituyen un aporte. A continuación, se muestran los límites condenatorios que deberán estar en el análisis de tendencia actualizada.

En la Figura 55 se muestran nuestros límites condenatorios superiores e inferiores de la viscosidad en Centistokes (cSt): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 13.4 a 12.8, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 13.7 a 12.5, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 13.9 a 12.2 como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

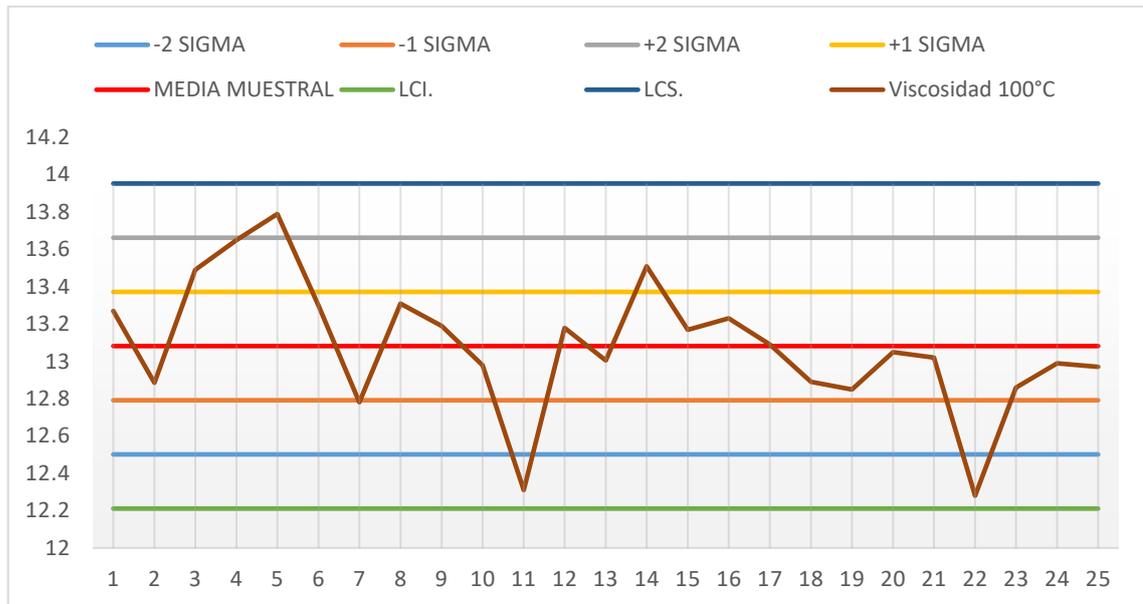


Figura 55. Límites de control superior e inferior en la viscosidad a 100°C

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 56 se muestran nuestros límites condenatorios superiores e inferiores de la nitración en (abs/mm<sup>2</sup>): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 7.4 a 6.8, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 7.7 a 6.5, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 8.0 a 6.2 como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

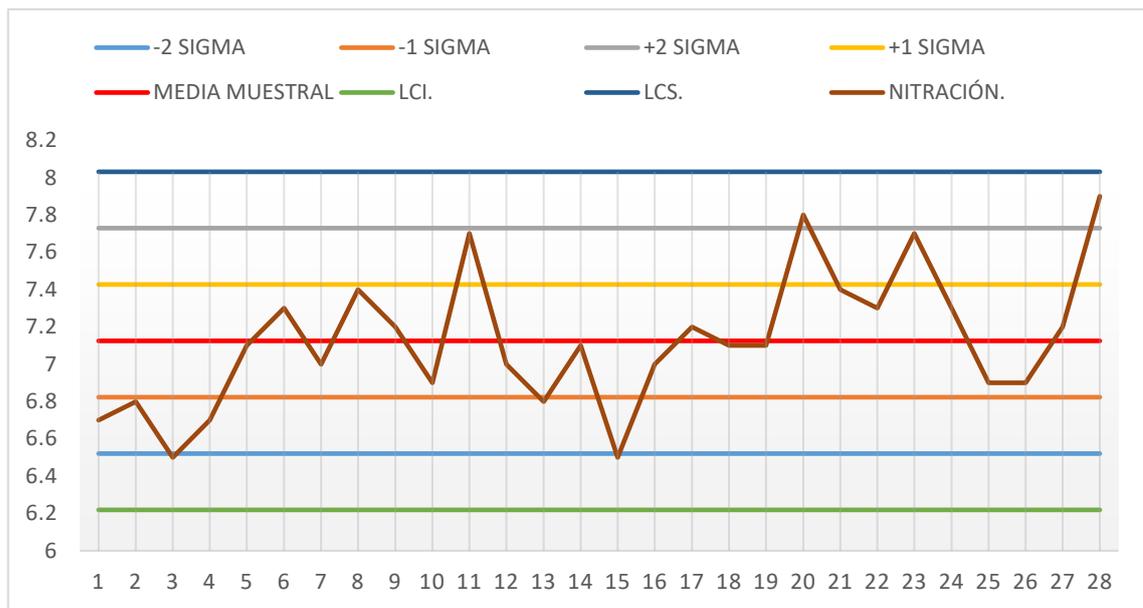


Figura 56. Límites de control superior e inferior en la nitración

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 57 se muestran nuestros límites condenatorios superiores e inferiores de la oxidación en ( $\text{abs}/\text{mm}^2$ ): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 13.8 a 6.8, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 7.7 a 6.5, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 8.0 a 6.2 como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

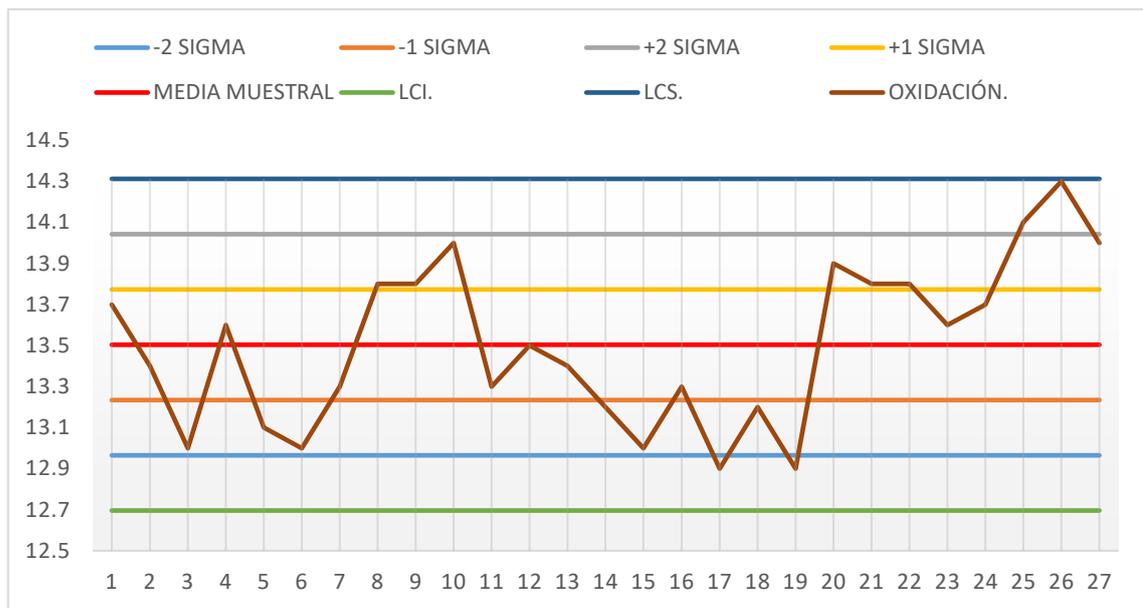


Figura 57. Límites de control superior e inferior en la oxidación

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 58 se muestran nuestros límites condinatorios superiores e inferiores del hollín en (%wt): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 1.3 a 0.9, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 1.4 a 0.8, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 1.5 a 0.7 como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

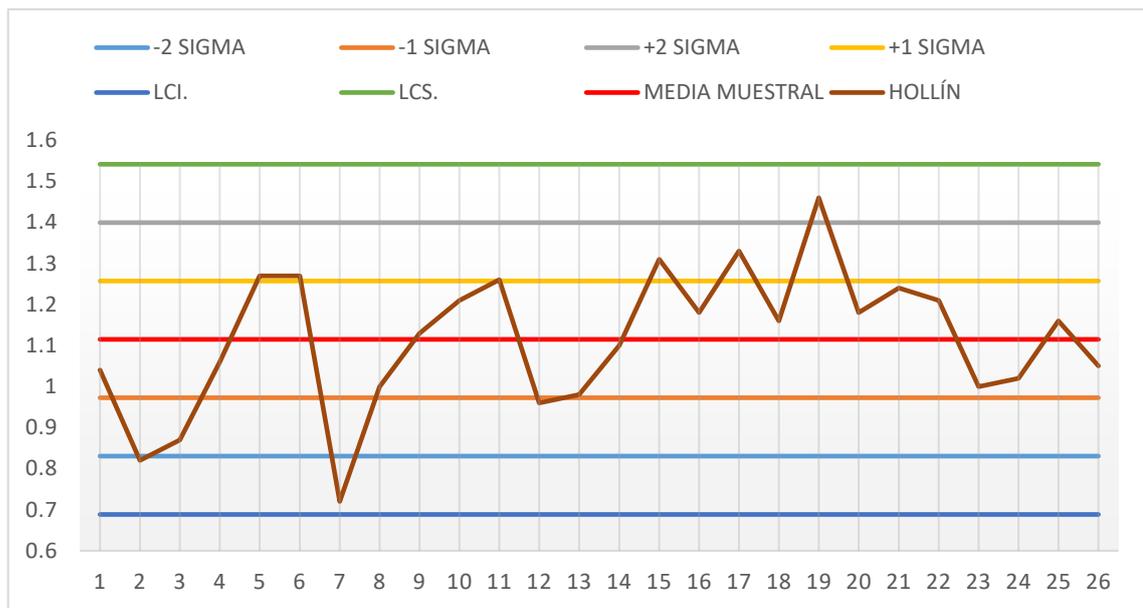


Figura 58. Límites de control superior e inferior en el Hollín

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 59 se muestran nuestros límites condinatorios superiores e inferiores de la sulfatación en ( $\text{abs}/\text{mm}^2$ ): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 19.1 a 18.5, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 19.4 a 18.1, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 19.7 a 17,8 como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

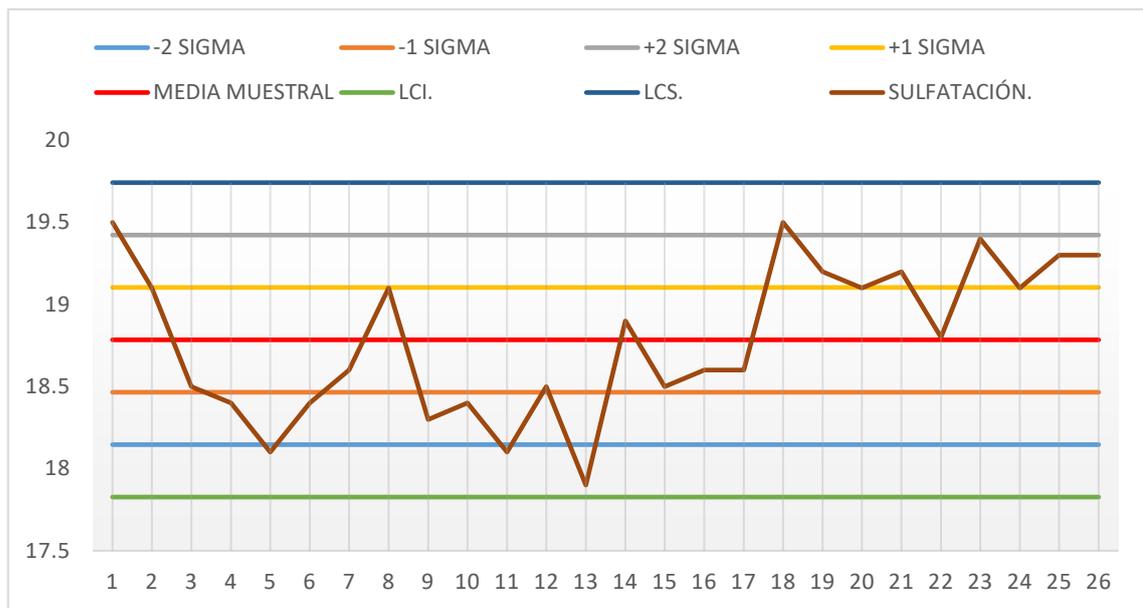


Figura 59. Límites de control superior e inferior en la sulfatación

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 60 se muestran nuestros límites condenatorios superiores e inferiores del TBN en (mgKOH/g): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 9.7 a 9.1, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 10.0 a 8.8, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 10.3 a 8.5, como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

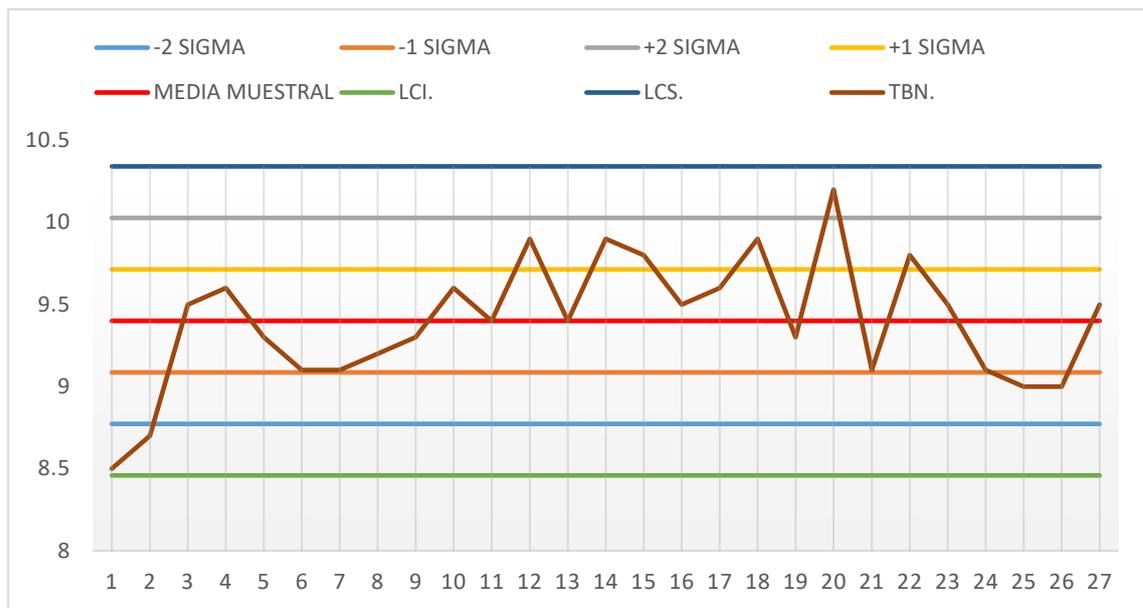


Figura 60. Límites de control superior e inferior en el TBN

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 61 se muestran nuestros límites condenatorios superiores e inferiores del desgaste de cobre en (ppm): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 4.7 a 3.3, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 5.4 a 2.5, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 6.1 a 1.8, como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

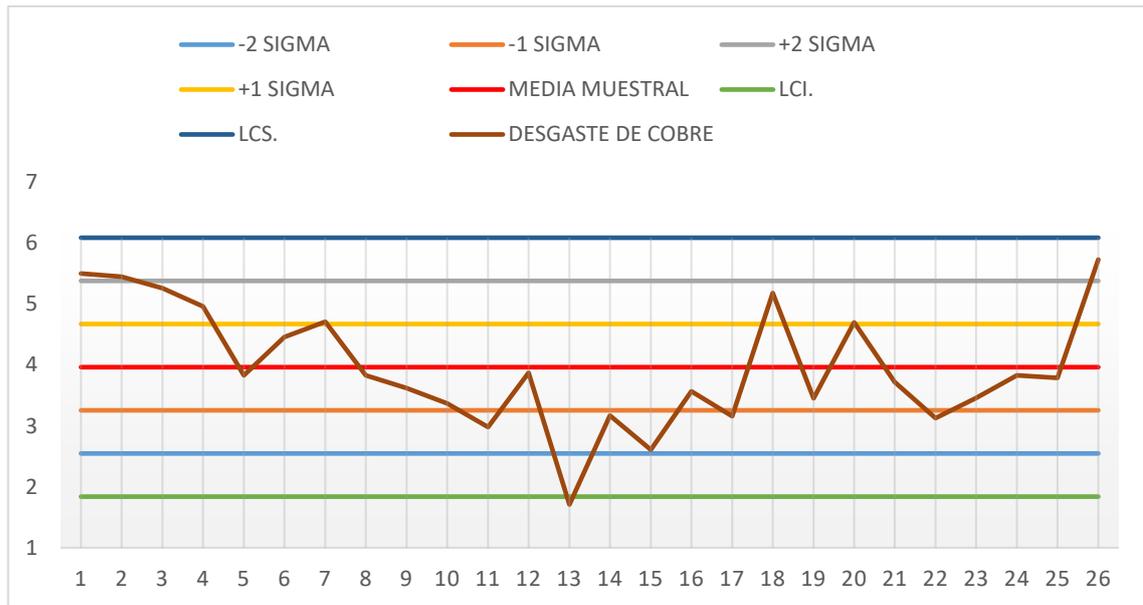


Figura 61. Límites de control superior e inferior en el desgaste de cobre

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 62 se muestran nuestros límites condenatorios superiores e inferiores del desgaste de cobre en (ppm): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 32.4 a 23.9, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 36.6 a 19.7, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 40.8 a 15.4, como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

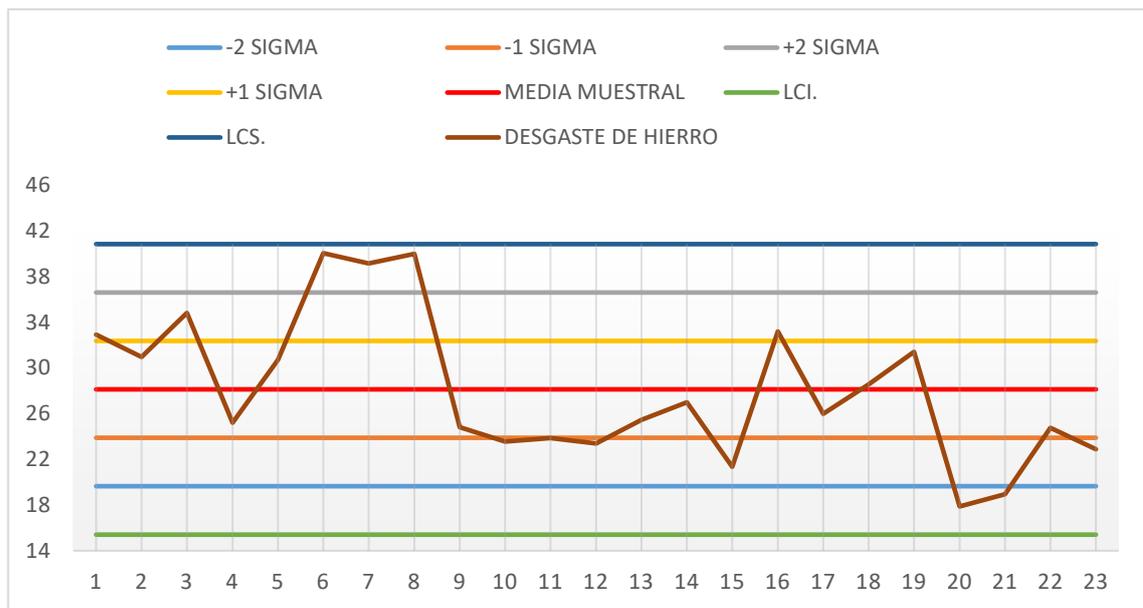


Figura 62. Límites de control superior e inferior en el desgaste de hierro

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 63 se muestran nuestros límites condinatorios superiores e inferiores del desgaste de cromo en (ppm): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 0.5 a 0.3, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 0.5 a 0.2, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 0.6 a 0.2, como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

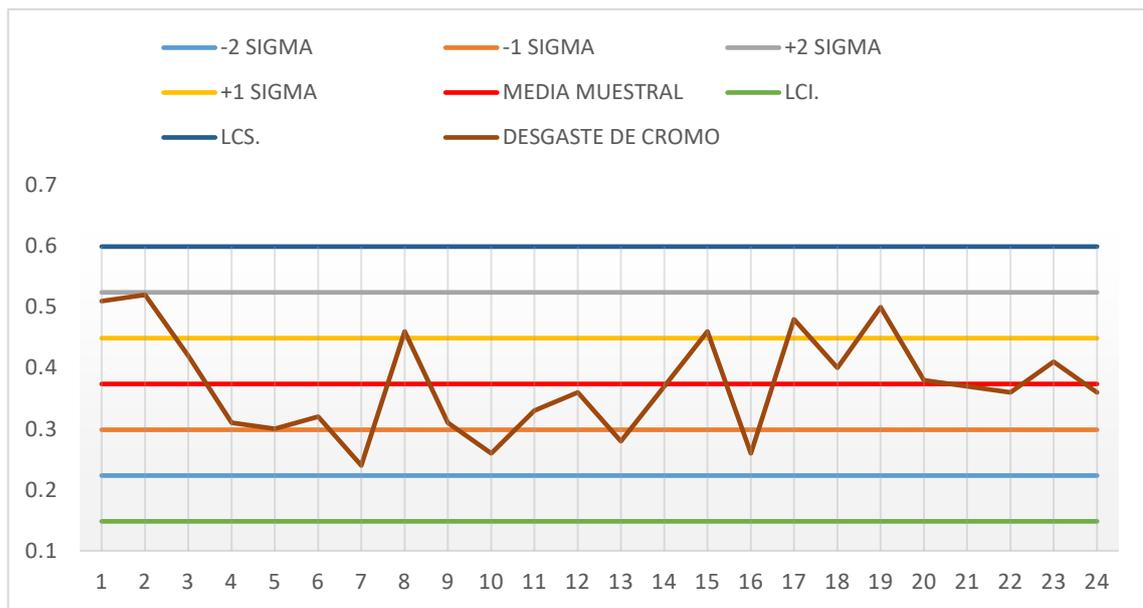


Figura 63. Límites de control superior e inferior en el desgaste de cromo

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 64 se muestran nuestros límites condinatorios superiores e inferiores del desgaste de aluminio en (ppm): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 2.1 a 1.5, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 2.4 a 1.2, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 2.7 a 0.9, como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

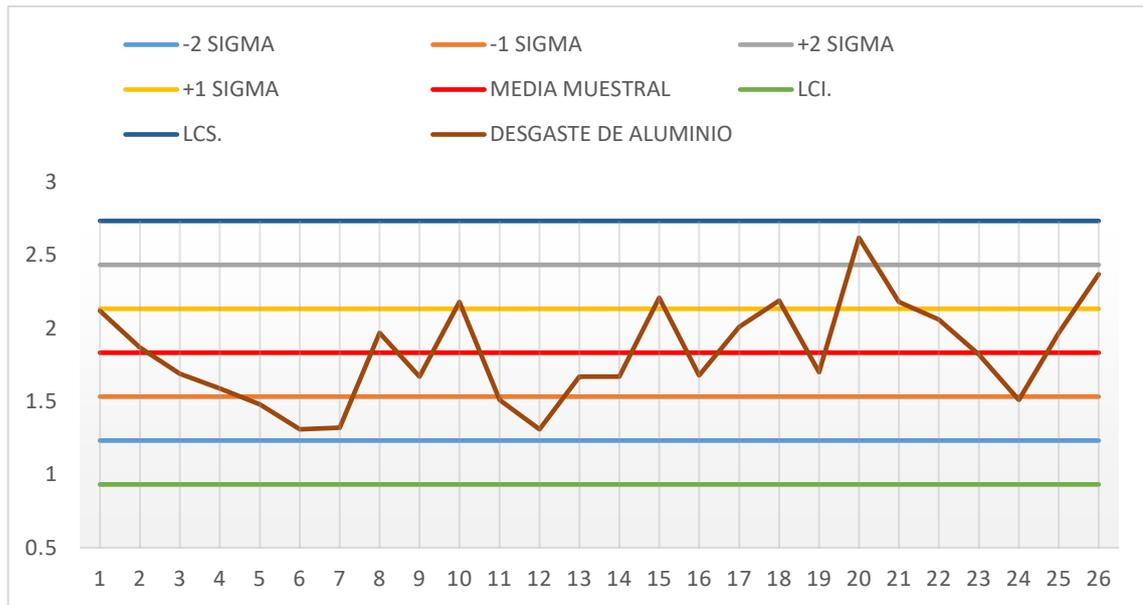


Figura 64. Límites de control superior e inferior en el desgaste de aluminio

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 65 se muestran nuestros límites condinatorios superiores e inferiores del desgaste de plomo en (ppm): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 1.9 a 1.0, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 2.4 a 0.6, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 2.9 a 0.1, como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

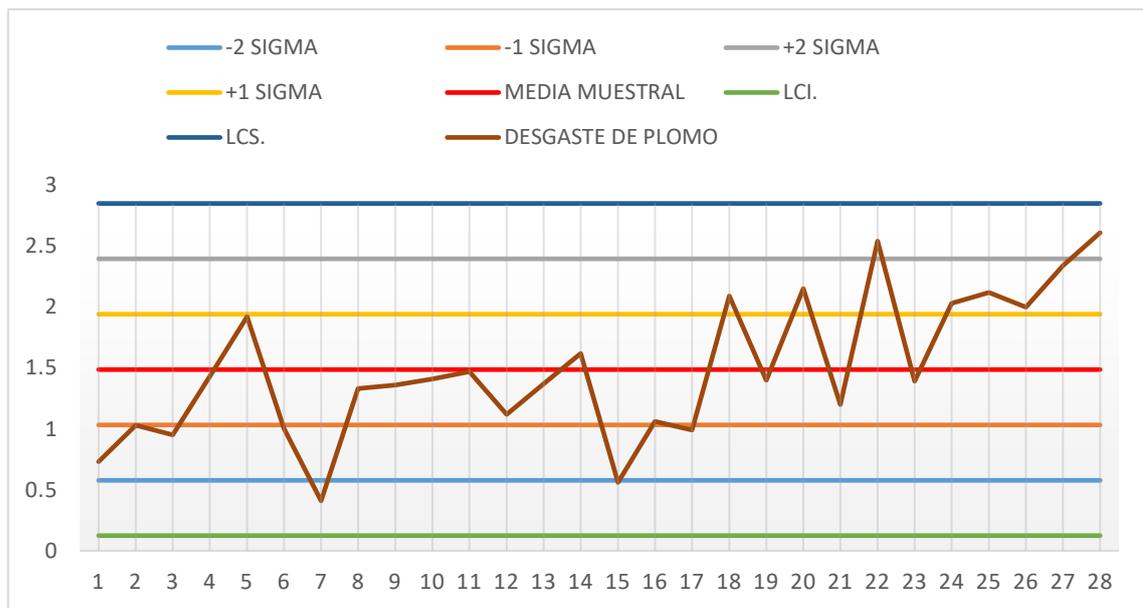


Figura 65. Límites de control superior e inferior en el desgaste de plomo

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 66 se muestran nuestros límites condenatorios superiores e inferiores de la contaminación con silicio en (ppm): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 5.6 a 4.3, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 6.2 a 3.7, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 6.8 a 3.0, como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

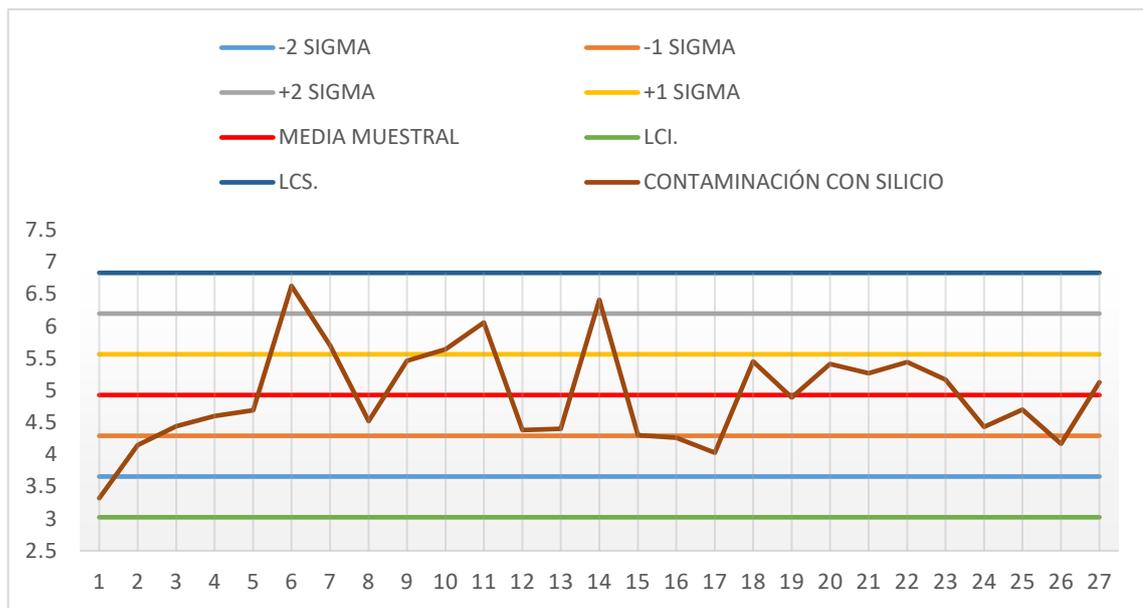


Figura 66. Límites de control superior e inferior en la contaminación con silicio

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 67 se muestran nuestros límites condenatorios superiores e inferiores contaminación con sodio en (ppm): +1 sigma y -1 Sigma (Límite normal) con valores de: 3.0 a 2.2, +2 sigma y -2 Sigma (Límite alerta) con valores de 3.5 a 1.8, LCS y LCI (Límite crítico) con valores de 3.9 a 1.4, como lo recomienda (ASTM D 7720-11, 2017; Pozo Morejón et al., 2014).

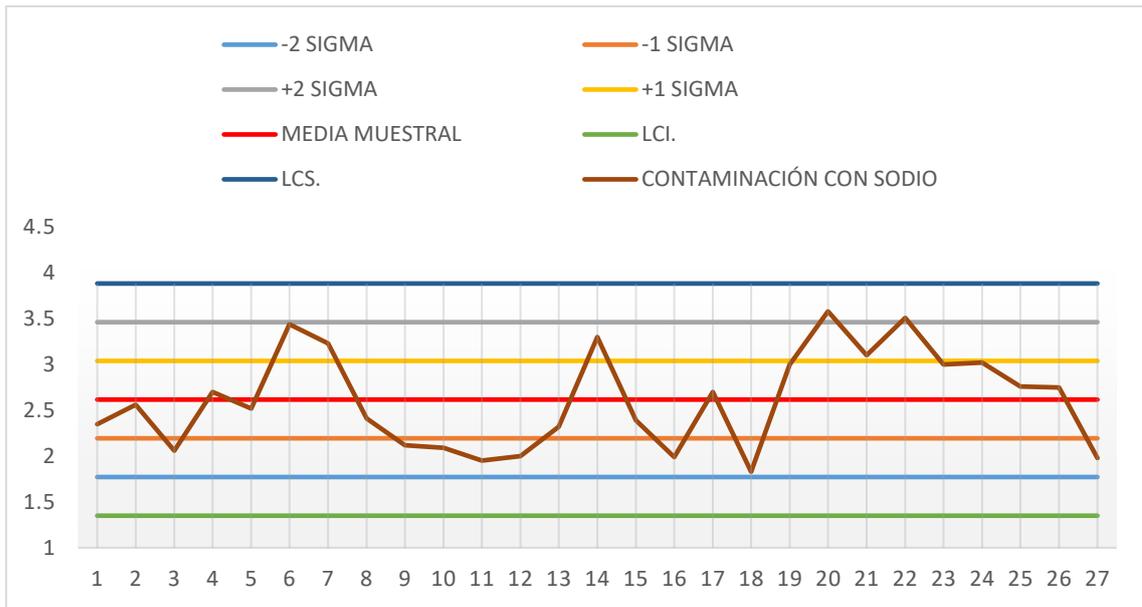


Figura 67. Límites de control superior e inferior en la contaminación con sodio

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.1 Resumen de resultados del análisis de capacidad del motor

Tabla 10. Resultados de análisis de capacidad del motor

DATOS	VISCOSIDAD (cSt)	FT-IR				Metales de desgaste y contaminantes							
		NITRACION (abs:mm2)	OXIDACIÓN (abs:mm2)	HOLLÍN %swt	SULFATACIÓN (abs:mm2)	TBN (mgKOH/g)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Al (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Si (ppm)	Na (ppm)
Límite de control superior (LCS)	13.953	8.031	14.312	1.5416	19.742	10.341	40.84	6.088	2.735	0.5992	2.85	6.833	3.884
Límite de control inferior (LCI)	12.211	6.219	12.696	0.6884	17.827	8.459	15.41	1.839	0.933	0.1483	0.124	3.022	1.35
Límite de especificación superior (LES)	14.001	8.06	14.533	1.557	20.006	10.41	45.2	6.548	2.736	0.594	2.989	6.944	3.999
Límite de especificación inferior (LEI)	12.163	6.19	12.474	0.673	17.563	8.39	11.056	1.379	0.931	0.153	0	2.912	1.235
Capacidad (dentro) del Potencial													
Z.Bench	2.96	2.88	3.65	2.9	3.65	3.02	3.86	3.47	2.79	2.71	3.09	2.97	3.07
Z.LEI	3.17	3.1	3.82	3.11	3.83	3.22	4.03	3.65	3.01	2.94	3.27	3.17	3.27
Z.LES	3.17	3.1	3.82	3.11	3.83	3.22	4.03	3.65	3	2.93	3.31	3.17	3.27
Cpk	1.06	1.03	1.27	1.04	1.28	1.07	1.34	1.22	1	0.98	1.09	1.06	1.09
Capacidad General													
Z.Bench	2.39	2.34	2.35	2.37	2.37	2.35	2.44	2.37	2.37	2.42	2.32	2.35	2.36
Z.LEI	2.64	2.58	2.6	2.62	2.62	2.6	2.68	2.62	2.62	2.67	2.56	2.6	2.6
Z.LES	2.64	2.58	2.6	2.62	2.62	2.6	2.68	2.62	2.62	2.66	2.58	2.6	2.6
Ppk	0.88	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.89	0.87	0.87	0.89	0.85	0.87	0.87
PPM<LEI	774.65	983.21	66.01	940.74	64.67	641.61	28.13	131.34	1323.83	1657.05	534.35	733.56	535.12
PPM>LES	774.65	983.21	66.41	940.74	64.86	641.61	28.14	131.29	1333.9	1692.95	473.63	751.75	535.45
PPM TOTAL DENTRO	1549.29	1966.43	132.42	1881.48	129.52	1283.23	56.27	262.63	2657.73	3350	1007.98	1505.31	1070.58
PPM<LEI	4159	4869.3	4624.85	4423.55	4392.64	4645.62	3654.56	4400.66	4382.42	3844.82	5257.98	4635.64	4624.02
PPM>LES	4159	4869.3	4638.76	4423.55	4399.02	4645.62	3655.45	4399.65	4408.32	3914.41	4868.88	4627.89	4625.91
PPM TOTAL DENTRO GENERAL	8318.19	9739.27	9263.61	8847.1	8791.65	9291.24	7310.01	8800.31	8790.74	7759.22	10127.86	9263.53	9249.93

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10 se muestra el resumen de los Anexos 13, 14 y 15, la capacidad de proceso y su influencia en los límites de control, en las características fisicoquímicas, metales de desgaste y contaminantes.

### 4.3.2 Resumen de los límites condenatorios

Tabla 11. Límites condenatorios

DATOS	VISCOSIDAD (cSt)	FT-IR			Metales de desgaste y contaminantes								
		NITRACION (abs/mm2)	OXIDACIÓN (abs/mm2)	HOLLIN %wt	SULFATACIÓN (abs/mm2)	IBN (mgKOH/g)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Al (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Si (ppm)	Na (ppm)
MEDIA DE LA MUESTRA	13.082	7.125	13.5037	1.115	18.7846	9.4	28.1283	3.96346	1.83385	0.37375	1.48679	4.92778	2.61704
NUMERO DE MUESTRA	25	28	27	26	26	27	23	26	26	24	28	27	27
D. EST DENTRO	0.290337	0.302075	0.269367	0.142199	0.319149	0.313693	4.23839	0.708156	0.300355	0.0751619	0.454426	0.635529	0.422463
D. EST GENERAL	0.348255	0.361709	0.395631	0.168837	0.466212	0.38829	6.36449	0.986557	0.344454	0.0828205	0.581142	0.774737	0.530992
PPM TOTAL DENTRO	1549.29	1966.43	132.42	1881.48	129.52	1283.23	56.27	262.63	2657.73	3350	1007.98	1505.31	1070.58
PPM TOTAL DENTRO GENERAL	8318.19	9739.27	9263.61	8847.1	8791.65	9291.24	7310.01	8800.31	8790.74	7759.22	10127.86	9263.53	9249.93
NORMAL +1	13.372	7.427	13.773	1.257	19.104	9.714	32.367	4.672	2.134	0.449	1.941	5.563	3.040
ALERTA +2	13.663	7.729	14.042	1.399	19.423	10.027	36.605	5.380	2.435	0.524	2.396	6.198	3.462
CRITICO +3	13.953	8.031	14.312	1.542	19.742	10.341	40.843	6.088	2.735	0.599	2.850	6.833	3.884
NORMAL -1	12.792	6.823	13.234	0.973	18.465	9.086	23.890	3.255	1.533	0.299	1.032	4.293	2.195
ALERTA -2	12.501	6.521	12.965	0.831	18.146	8.773	19.652	2.547	1.233	0.223	0.578	3.657	1.772
CRITICO -3	12.211	6.219	12.696	0.688	17.827	8.459	15.413	1.839	0.933	0.148	0.124	3.022	1.350
VALOR SIGMA	3.18	3.09	3.81	3.12	3.84	3.21	4.02	3.66	3.00	2.94	3.27	3.18	3.27
% Incremento Z. Bench	23.85	23.08	55.32	22.36	54.01	28.51	58.20	46.41	17.72	11.98	33.19	26.38	30.08

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11 se observan los límites condenatorios: normal, alerta y crítico, bajo control obtenidos de la capacidad de proceso dentro del potencial (ASTM D 7720-11, 2017), a su vez se muestra el % de incremento de capacidad en cada proceso controlado en comparación con la capacidad general como (Altman, 2016) lo recomienda en el uso de alarmas estadísticas basadas en los propios valores registrados en el equipo, el análisis de tendencia estadística para identificar fallas en los componentes, (Analyse-it®, 2020b) recomienda que se debe medir directamente la capacidad de referencia a corto plazo y largo plazo. La capacidad a corto plazo detalla como referencia los valores de sigma mediante interpolación de los datos obtenidos del ANEXO 10.

### 4.3.3 Resumen de resultados y comparativas

Tabla 12. Tabla comparativa de resultados obtenidos en diferentes investigaciones de acuerdo al Six Sigma

	*MOBIL 15W40			**A ure'lia XL4055			***SAE 40			****CAT DEO 15W40 & CAT S.O.S		
	NORMAL	ALERTA	CRÍTICO	NORMAL	ALERTA	CRÍTICO	NORMAL	ALERTA	CRÍTICO	NORMAL	ALERTA	CRÍTICO
Viscosidad (cSt)	13.37-12.79	13.66-12.50	13.95-12.21	13.83	<11.04	>17.25	134.6	<124 o >165	<117 o >172	15.00	-	-
Nitración (abs/mm2)	7.43-6.82	7.73-6.52	8.03-6.22	-	-	-	10.51	>13.1	>18.4	-	-	-
Oxidación (abs/mm2)	13.77-13.23	14.04-12.96	14.31-12.70	-	-	-	5.11	>5.68	>7.16	-	-	-
Hollín (%wt)	1.26-0.97	1.40-0.83	1.54-0.69	0	0.08	0.1	-	>1.2674	>1.3762	1.10	-	-
Sulfatación (abs/mm2)	19.10-18.47	19.42-18.15	19.74-17.83	-	-	-	9.91	>12.4	>17.3	-	-	-
TBN (mgKOH/g)	9.71-9.09	10.03-8.77	10.34-8.46	59.8	44	27.5	31.86	<27 y >32	<26	10.60	-	-
Fe (ppm)	32.37-23.89	36.61-19.65	40.84-15.41	8.5	42	51	4	>15	>17.08	0.60	61-78	78<
Cu (ppm)	4.67-3.26	5.38-2.55	6.09-1.84	0	21	30	0	>5	>6.76	0.8.0	9.0-10	10<
Al (ppm)	2.13-1.53	2.43-1.23	2.73-0.93	8.2	39	47	4	>5	>10	0.3	4.0-5.0	5<
Cr (ppm)	0.45-0.30	0.52-0.22	0.60-0.15	0	2	3	0	>1.27	>1.38	0.2	3.0-4.0	4<
Pb (ppm)	1.94-1.03	2.40-0.58	2.85-0.12	-	-	-	1	>1.32	>1.47	0.3	4.0-5.0	5<
Si (ppm)	5.56-4.29	6.20-3.66	6.83-3.02	28	25	32	12	>14.5	>16.6	0.8	9.0-11	11<
Na (ppm)	3.04-2.19	3.46-1.77	3.88-1.35	347	522	627	8	>10	-	-	-	25<

Fuente: Elaboración propia.

\*Resultados obtenidos en la presente investigación, \*\* Resultados obtenidos de (Arellano Ortiz, 2009), \*\*\* Resultados obtenidos de (Pozo Morejón et al., 2014) y \*\*\*\* Parámetros especificados por el fabricante CAT DEO & CAT SOS.

En la Tabla 12. Se puede ver que los resultados obtenidos en la presente investigación ofrecen nuevas especificaciones respaldándose de acuerdo a la (ASTM D 7720-11, 2017) y teniendo como base la media muestral de los resultados del análisis previamente tratado estadísticamente.



## V. CONCLUSIONES

- Se concluye que en los resultados para el primer objetivo, que de los datos obtenidos en los resultados de análisis de las características fisicoquímicas, metales de desgaste y contaminantes, se obtienen los límites de control (LCS & LCI) donde la evaluación de los datos en el software Minitab nos permite visualizar y evaluar la necesidad de ajustar a los límites tratados estadísticamente, siendo estos respaldados por tener mejor capacidad de proceso (Z. Bench) y una mayor valoración sigma ( $\sigma$ ); aportando como base en la implementación de una estrategia de control para las 250 horas de trabajo del aceite lubricante de motor.
- Se concluye para el segundo objetivo en la importancia de la compilación de los datos fuera de los límites de control a través del tiempo y en su respectiva observación con la interacción de las fallas; cumpliéndose que esta técnica nos ayuda a la compilación de fallas y nos brinda la confiabilidad y tiempo para corregir y reparar componentes antes de que produzcan daños mayores en el motor y así alargar su tiempo de vida.
- Se concluye para el tercer objetivo, que de los resultados obtenidos en el análisis de capacidad de las características fisicoquímicas, metales de desgaste y contaminantes, se utiliza la desviación estándar a corto plazo debido a su valor Z. Bench y valor sigma porque tienen más significancia indicando esto un valor óptimo, por consiguiente, se realiza la distribución de acuerdo a los valores  $X \pm \sigma$ ,  $X \pm 2\sigma$  y  $X \pm 3\sigma$  denominándolos límites condinatorios; cumpliendo de esta manera un mejor control a las 250 horas de trabajo del aceite lubricante



minimizando los defectos en las características fisicoquímicas, defectos en el desgaste de los componentes del motor y sus contaminantes.



## VI. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios concernientes a las estrategias de implantación de límites de control (LCS & LCI) para el mantenimiento preventivo del motor, sistemas hidráulicos, transmisión y mandos finales a las 250, 500, 1000, 2000 y 3000 horas de trabajo sistematizando de control de los parámetros en la optimización de procesos en áreas donde se manejen gran cantidad de datos visibles en tendencias centrándose en la confiabilidad e incrementando el rendimiento en operación.
- Se recomienda desarrollar programas para la optimización de procesos en el desarrollo de límites condenatorios en tiempo real utilizando los datos de las propiedades de los aceites lubricantes.
- Con respecto a lo presentado, se sugiere el estudio de tecnologías para el tratamiento y disposición final de los aceites lubricantes usados.
- Se sugiere estudios para el alargamiento de vida del motor y protección de componentes con los diferentes tipos de aceites lubricantes disponibles.
- Realizar estudios de la relación entre rentabilidad, gestión de activos, eficiencia de uso de combustible, reducción de emisiones.
- Realizar estudios del KPI's de mantenimiento.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, M. A., Saleman, S. A., Tamaldin, N., & Suhaimi, M. S. (2013). Reducing wear and friction by means of lubricants mixtures. *Procedia Engineering*, 68, 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.189>
- Adams, M. J., Romeo, M. J., & Rawson, P. (2007). FTIR analysis and monitoring of synthetic aviation engine oils. *Talanta*, 73(4), 629–634. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.04.036>
- Aguirre Parra, R. C. (2015). *Gestión del Manteminiendo Mediante Six Sigma para la Optimización de la Productividad de las Máquinas y Equipos Diversos de la Empresa REMAP SAC - Lima*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Altman, C. (2016). El Análisis del Aceite como Herramienta del Mantenimiento Proactivo en Flotas de Maquinaria Pesada. Retrieved September 29, 2017, from <https://es.scribd.com/document/54295829/Analisis-de-Aceite-en-Mantenimiento-Proactivo>
- Analyse-it®. (2020a). Capability ratios (Cp/Pp indices). Retrieved July 9, 2020, from <https://analyse-it.com/docs/user-guide/process-capability/capability-ratios>
- Analyse-it®. (2020b). Z benchmark. Retrieved May 23, 2020, from <https://analyse-it.com/docs/user-guide/process-capability/z-benchmark>
- Araya Tekie, H. (2013). *Determination of Trace Metals in Lubricating Oils By ICP-OES*. Tshwane University Of Technology. Retrieved from <http://tutvital.tut.ac.za:8080/vital/access/manager/Repository/tut:1483>
- Arellano Ortiz, G. A. (2009). *Implantación de Análisis de Aceite en Motores de Combustión Interna de Ciclo Diesel*. Escuela Superior Politécnica Del Litoral. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/347058493/Implantacion-de->



analisis-de-aceite-en-motores-de-combustion-interna-de-Ciclo-Diesel-pdf

ASTM D 7720-11. Statistically evaluating measurand alarm limits when using oil for fitness and contamination, i § (2017). <https://doi.org/10.1520/D7720>

ASTM D445. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids ( and Calculation of Dynamic Viscosity ) 1, i Annual Book of ASTM Standards § (2010). <https://doi.org/10.1520/D0445-11A>.In

ASTM D6595. Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry 1 (2014). EEUU.  
<https://doi.org/10.1520/D6595-00R11.2>

ASTM E2412-10. Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared ( FT-IR ), i Annual Book of ASTM Standards § (2010). <https://doi.org/10.1520/E2412-10.2>

Bird, R., Stewart, W., & Lightfoot, E. (2008). *Fenómenos de Transporte*. (N. Y. John Wiley and Sons, Inc., Ed.) (1era Edici). México: Editorial Reverté.

Blackledget, J. M. (2006). The Fourier Transform. In *Digital Signal Processing* (pp. 75–113). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857099457.1.75>

Bluehost. (2020). Cálculo de índice de Habilidad Cp e Índice de Capacidad Cpk en el Control Estadístico de Procesos. Retrieved June 2, 2020, from <https://www.gestiondeoperaciones.net/control-estadistico-de-procesos/calculo-de-indice-de-habilidad-cp-e-indice-de-capacidad-cpk-en-el-control-estadistico-de-procesos/>

Buchelli Carpio, L., & Garcia Granizo, V. (2015). Detección temprana de fallas en motores de combustión interna a diesel mediante la técnica de análisis de aceite / The use of using oil analysis for early detection of faults in diesel internal



combustion engines. *Ciencia Unemi*, 8(15), 84. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol8iss15.2015pp84-95p>

Diaz Sepulveda, J. (2006). *Documento de apoyo a la gestión de mantenimiento, para la selección y aplicación de lubricantes*. Universidad Austral de Chile, Valdivia.

Retrieved from

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcid542d/doc/bmfcid542d.pdf>

Exxon Mobil Team. (2017). Mobiltrans HD Series. Retrieved April 10, 2018, from

<https://www.mobil.com/spanish-pe/commercial-vehicle-lube/pds/glxxmobiltrans-hd-series>

ExxonMobil. (2017). Signum Oil Analysis. Retrieved from

<https://www.exxonmobil.com/signum>

ExxonMobil Corporation. (2016). Qué es el análisis de número de ácido total | Mobil™.

Retrieved April 6, 2018, from <https://www.mobil.com.mx/es->

[mx/industrial/Lubricant-Expertise/Resources/understanding-total-acid-number-test](https://www.mobil.com.mx/es-mx/industrial/Lubricant-Expertise/Resources/understanding-total-acid-number-test)

Guillén Fernández, L. F. (2007). *Procedimiento para el Análisis de Muestras de Aceite*

*Usado en la Agroindustria*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Retrieved

from [http://www.repositorio.usac.edu.gt/5145/1/LUIS\\_FERNANDO\\_GUILLÉN](http://www.repositorio.usac.edu.gt/5145/1/LUIS_FERNANDO_GUILLÉN_FERNANDEZ.pdf)

[FERNANDEZ.pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/5145/1/LUIS_FERNANDO_GUILLÉN_FERNANDEZ.pdf)

Gunda, R. K., & Narala, S. K. R. (2017). Evaluation of friction and wear characteristics

of electrostatic solid lubricant at different sliding conditions. *Surface and Coatings*

*Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.08.073>

Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y*

*Seis Sigma* (Segunda Ed). México DF: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A

de C.V.

Imran, A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Varman, M., Hasmelidin, M., Al Mahmud, K.



- A. H., ... Habibullah, M. (2013). Study of friction and wear characteristic of Jatropha oil blended lube oil. *Procedia Engineering*, 68, 178–185.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.165>
- Jafari, A. J., & Hassanpour, M. (2014). Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.026>
- Jara Trujillo, A. A. (2015). *El Análisis de Lubricantes como Herramienta para el Diagnóstico y Mantenimiento de Equipos de Minería*. Universidad Nacional de Ingeniería. Retrieved from  
[http://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI\\_48cdda11e75c242ffd16b712c1e8470d](http://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_48cdda11e75c242ffd16b712c1e8470d)
- Jiménez Macías, M. (2011). *Análisis de Metales en Aceites Lubricantes Automotrices Usados por Espectroscopía de Absorción Atómica*. Instituto Politécnico Nacional. Retrieved from <http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/8061/1/JIMENEZ MACIAS.pdf>
- Latip, S. A., Kasolang, S., Alias, S. K., Yunus, S., Abdullah, A. H., & Jenal, N. (2013). Wear elemental spectrometric quantitative analysis of used perodua automatic transmission fluid-3 series (ATF-3). *Procedia Engineering*, 68, 193–198.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.167>
- Llacta Moscoso, A. E. (2004). *Análisis del Rendimiento de Lubricantes para Motor Diesel DEUTZ 413, en el Mantenimiento de las Maquinarias de la Empresa CONY MUTSE E.I.R.L.* Universidad Nacional Del Centro del Perú. Retrieved from <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/181>
- Lubrisa. (2020). Programa de mantenimiento Gulf. Retrieved May 14, 2020, from [https://www.lubrisa.com/media/PROGRAMA\\_DE\\_MANTENIMIENTO\\_GULF.P](https://www.lubrisa.com/media/PROGRAMA_DE_MANTENIMIENTO_GULF.P)



DF

- Matzunaga Zamudio, L. (2017). *Implementación de un sistema de mejora de calidad y productividad en la línea de fileteado y envasado de pescados en conserva basado en las herramientas de la metodología six sigma*. Universidad Ricardo Palma.
- Mendoza Quispe, A. (2017). *Implementación del Análisis de Lubricante como Herramienta de Mejora en el Monitoreo de Condición del Aceite en Unidades Hidráulicas y Cajas Reductoras en la Empresa OPP FILM para el Año 2017*. Universidad Privada del Norte. Retrieved from <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/11209>
- Mideros Romero, A. J. (2013). *Diseño de un Laboratorio de Análisis de Aceites Lubricantes en la ESPOL para sustentar programas de mantenimiento Predictivo*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Retrieved from <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/25398>
- Minitab Inc. (2016). MINITAB 16. Pennsylvania: Minitab Inc.
- Minitab Inc. (2019). Nivel Z como una estimación de la capacidad sigma. Retrieved May 14, 2020, from <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/capability-analysis/supporting-topics/capability-metrics/z-bench-as-an-estimate-of-sigma-capability/>
- Montalvo Lima, D. A. (2013). *Análisis de Medios Lubricantes de los Rodamientos 6202 y NJ202E. TYP2 y su Incidencia en la velocidad de Desgaste*. Universidad Técnica de Ambato. Retrieved from <http://repo.uta.edu.ec/handle/123456789/6504>
- Moreno, J. R. P. (2011). Descripción de los efectos del biodiesel en las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes. Barcelona: Universidad De Oriente Núcleo Anzoategui.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de los Fluidos*. (P. M. G. Rosas, Ed.) (Séptima Ed). México:



Pearson Prentice Hall.

Noria Corporation. (2002). Oil Viscosity How It's Measured and Reported. Retrieved September 24, 2017, from <http://www.machinerylubrication.com/Read/411/oil-viscosity>

Noria Corporation. (2013a). ¿Qué es el TBN y qué Indica en el Análisis de Aceite? | Noria Latín América. Retrieved April 6, 2018, from <http://noria.mx/lublearn/q-a-que-es-el-tbn-y-que-indica-en-el-analisis-de-aceite/>

Noria Corporation. (2013b). Tipos de Análisis de Lubricante. *Noria Latin América, SA de CV*, 1–42.

Noria Corporation. (2014a). Determinando la causa de la degradación del lubricante. Retrieved April 6, 2018, from <http://noria.mx/lublearn/monitoreo-de-la-degradacion-del-lubricante-con-espectrometria-infrarroja/>

Noria Corporation. (2014b). La oxidación - Enemiga del lubricante. Retrieved May 14, 2020, from <https://noria.mx/lublearn/la-oxidacion-enemiga-del-lubricante/>

Padilla Silva, N. A. (2013). *Análisis de Aceite para Detección Temprana de Fallas en Motores Caterpillar*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Retrieved from [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0770\\_M.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0770_M.pdf)

Peak, D. (2013). Fourier Transform Infrared Spectroscopic Methods of Soil Analysis. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.05170-8>

Pérez Urrego, M., Pelaez Zuñiga, J., & Carrión García, A. (2014). La capacidad de procesos como métrica de calidad para características cualitativas. *IX Encuentro Internacional de Investigadores de La Red Latinoamericana de Cooperación Universitaria*, (December), 12. Retrieved from [http://rlcu.org.ar/recursos/ponencias\\_IX\\_encuentro/Perez\\_Urrego\\_Pelaez\\_Zuniga\\_](http://rlcu.org.ar/recursos/ponencias_IX_encuentro/Perez_Urrego_Pelaez_Zuniga_)



Carrion\_Garcia.pdf

- Pozo Morejón, J., Martínez Jiménez, B., Rodríguez Rico, I., Martínez Martínez, R., Herrera Artiles, A., & Cabral Leite, J. (2014). Análisis de aceite en motores de combustión interna estacionarios de planta de generación de energía eléctrica. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 37(3), 206–212. Retrieved from [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702014000300003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702014000300003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Ramirez Hernández, J. F. (2007). : *Plan de Lubricación para el Mantenimiento Mecánico para la Maquinaria Pesada Utilizada en movimiento de tierra, en la industria de la construcción por TOPSA Construcciones S.A.* Universidad de San Carlos de Guatemala. Retrieved from <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5140/1/JULIO FRANCISCO RAMIREZ HERNÁNDEZ.pdf>
- Ruiz-Falco, A. (2006). Control estadístico de procesos. *Universidad Pontificia Comillas*, 1–74. Retrieved from <http://web.cortland.edu/matresearch/ControlProcesos.pdf>
- Saldivia, F. (2013). Aplicación De Mantenimiento Predictivo . Caso Estudio: Analisis De Aceite Usado En Un Motor De Combustion Interna. *Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity*, 4. Retrieved from <http://www.laccei.org/LACCEI2013-Cancun/RefereedPapers/RP264.pdf>
- Sanz Tejedor, A. (2017). Lubricantes. Retrieved July 23, 2017, from <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-13.php>
- Schlumberger. (2017). Fluidos de Perforación. Retrieved January 22, 2018, from [http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/n/newtonian\\_fluid.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/n/newtonian_fluid.aspx)
- Skoog, D., Holler, J., & Crouch, S. (2008). *Principios de Análisis Instrumental*. (Sergio



- Cervantes Gonzáles, Ed.) (Sexta Edic). México DF: CENGAGE Learning.
- SpectroScientific. (2020). White Paper Overview of Rotating Disc Electrode (RDE) Optical Emission Spectroscopy for in-Service. *Spectro Scientific*, 1–7. Retrieved from <https://www.spectrosci.com/product/spectroil-q100/?fileID=8a8081894571a87e0145b84085180b56>
- Stachowiak, G., & Batchelor, A. (2004). *Experimental Methods ind Tribology*. (D. Dowson, Ed.). Elsevier Science. Retrieved from <https://www.elsevier.com/books/experimental-methods-in-tribology/stachowiak/978-0-444-51589-6>
- Streeter, V. (2008). *Mecánica de los Fluidos*. (N. Y. John Wiley and Sons, Inc., Ed.). México: Editorial Reverté.
- Syahrullail, S., Kamitani, S., & Shakirin, A. (2013). Performance of vegetable oil as lubricant in extreme pressure condition. *Procedia Engineering*, 68, 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.164>
- Vo-Dinh, T., & Gauglitz, G. (2003). *Handbook of Spectroscopy*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Retrieved from [http://www.phy.pmf.unizg.hr/~dandroic/nastava/fem/temp/00/Handbook Of Spectroscopy - G. Gauglitz , T. Vo-Dinh.pdf](http://www.phy.pmf.unizg.hr/~dandroic/nastava/fem/temp/00/Handbook%20Of%20Spectroscopy%20-%20G.%20Gauglitz%20,%20T.%20Vo-Dinh.pdf)
- Widman. (2017). Índice de Viscosidad. Retrieved January 22, 2018, from <http://www.widman.biz/seleccion/iv.html>
- Widman International SRL. (2018). Análisis: Desgaste en el aceite. Retrieved May 14, 2020, from <https://www.widman.biz/Analisis/desgaste.html>
- Widman International SRL. (2019). Interpretando el Reporte de Análisis de Aceite. Retrieved July 9, 2020, from <https://www.widman.biz/boletines/46.php>
- Yingzhong, G., Liang, G., Liguang, W., & Liye, Z. (2016). Two-channel and



differential dielectric spectroscopy characterization of lubricating oil. *Sensors and*

*Actuators, A: Physical*, 241, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.02.013>

Zulkifli, N. W. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., & Yunus, R. (2013). Experimental analysis of tribological properties of biolubricant with nanoparticle additive.

*Procedia Engineering*, 68, 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.161>



## ANEXOS

### ANEXO 1

#### 1.1 Certificados de análisis del Laboratorio de Lubricantes – MUR-WY SAC



##### MUR-WY SAC LABORATORIO DE LUBRICANTES

Para : Sr. Carlos Humberto Juli Quispe  
Asunto : Certificado de Análisis de Laboratorio  
Fecha : 19-12-2019

---

Motivo:

Por medio de la presente se envía los resultados de los siguientes componentes de un Tractor Oruga D8T – TO-047.

Aceites lubricantes analizados, de la Unidad Minera ARUNTANI - ARASI S.A.C.

ATTENTAMENTE,

  
ING. CIP. NOHELY DINA GOMEZ VELASQUEZ  
Registro 150535 - QUIMICO



## ANEXO 2

### 2.1 Viscosímetro – SpectroVisc q300



Anexo 2.1. ANÁLISIS DE ACEITE LUBRICANTE EN EL VISCOSÍMETRO SPECTROVISC Q300.

## ANEXO 3

### 3.1 Equipo Analizador por Espectrometría de Emisión Atómica – Spectroil Q100



Anexo 3.1. ANÁLISIS DE ACEITE LUBRICANTE EN EL ESPECTROFOTÓMETRO DE EMISIÓN ATÓMICA SPECTROIL Q100.

## ANEXO 4

### 4.1 Estándar de Calibración Spectroil Q100 a 0 PPM

MAIN PROG \*\*\* PPM-0 \*\*\*

	Ag	Al	B	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu
1	0.000	7.818	0.035	5.685	0.096	0.000	0.000	0.000
2	0.000	8.232	0.038	5.665	0.120	0.000	0.000	0.000
3	0.000	8.625	0.000	5.491	0.092	0.000	0.000	0.000

	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P
1	0.734	0.875	0.009	0.000	0.000	0.000	0.724	97.569
2	0.779	0.901	0.003	0.000	0.000	0.000	0.861	100.42
3	0.638	0.891	0.012	0.000	0.000	0.000	0.889	97.527

	Pb	Si	Sn	Ti	V	Zn	H	H2
1	0.668	0.000	0.000	0.000	1.592	0.469	101K	95109
2	0.219	0.000	0.000	0.000	1.773	0.536	103K	93640
3	0.471	0.000	0.174	0.000	1.907	0.510	101K	98478

	C	C2	B2	Ba2	Ba3	Ca2	Ca3	Cr2
1	142K	135K	0.000	22.317		5.639		0.503
2	147K	134K	0.011	23.566		7.107		0.438
3	149K	143K	0.000	20.556		6.297		0.383

	Cu2	K2	Mg1	Mg2	Mn2	Na1	Na2	P2
1	0.000	2.162	13.176		0.000	0.000	197.47	
2	0.000	2.449	13.134		0.000	0.000	194.90	
3	0.000	2.301	12.911		0.000	0.000	189.21	

	Ti2	V2	Zn2	Zn3	Ag2
1	0.000	0.792	40.530		2.539
2	0.000	1.159	41.493		5.080
3	0.000	0.751	37.370		0.683

Anexo 4.1. CALIBRACIÓN CON EL ACEITE MATRIZ CS-75 EN EL SOFTWARE SPECTROIL.

## 4.2 Estándar de calibración Spectroil Q100 A 100 PPM

Spectroil

File Edit View Set Up System Program Operations Databases Help

Ready

MAIN PROG \*\*\* CS22-100 \*\*\*

	Ag	Al	H	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu
1	126.26	120.56	277.50	113.92	116.20	99.919	109.80	107.21
2	129.33	122.81	283.35	106.31	107.32	104.98	110.74	108.14
3	98.690	116.22	264.02	107.12	106.39	102.74	105.27	96.666
AV	118.09	119.86	274.96	109.12	109.97	102.55	108.60	104.01

	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P
1	115.29	0.000	111.25	114.90	106.60	112.34	116.31	112.96
2	116.48	0.000	113.50	114.51	110.71	107.13	116.47	120.52
3	101.79	0.000	99.271	105.78	93.324	109.32	101.61	96.007
AV	111.19	0.000	108.01	111.73	103.54	109.59	111.47	109.83

	Pb	Si	Sn	Ti	V	Zn	H	H2
1	112.29	110.32	101.14	104.45	107.93	113.48	79406	70204
2	113.32	111.17	101.56	107.03	110.40	120.40	81623	69854
3	102.28	99.112	92.112	89.711	99.638	101.62	79554	67290
AV	109.30	106.87	98.272	100.40	105.99	111.83	80194	69116

	C	C2	B2	Ba2	Ba3	Ca2	Ca3	Cr2
1	241K	238K	297.36		113.90	126.56	112.47	109.52
2	249K	226K	288.31		111.58	129.02	104.08	110.31
3	223K	217K	272.52		106.84	108.13	103.27	103.82
AV	237K	227K	286.06		110.78	121.24	106.60	107.88

	Cu2	K2	Mg1	Mg2	Mn2	Na1	Na2	P2
1	92.573	102.96	102.16	115.14	108.30	111.93	115.50	110.98
2	92.552	109.73	99.569	118.73	102.51	109.10	108.30	119.47
3	89.064	106.20	89.998	103.13	100.11	111.39	104.53	94.349
AV	91.396	106.30	97.244	112.33	103.64	110.80	109.44	108.27

	Ti2	V2	Zn2	Zn3	Ag2
1	104.50	110.92		71.869	109.86
2	105.92	114.75		67.086	110.22
3	93.136	97.066		40.262	97.608
AV	101.18	107.58		59.739	105.89

Anexo 4.2. CALIBRACIÓN CON EL ACEITE ESTÁNDAR CS-24@ 100 EN EL SOFTWARE SPECTROIL

### 4.3 Estándar de Calibración Spectroil Q100 a 900 PPM

The screenshot shows the Spectroil software interface with a menu bar (File, Edit, View, Set Up, System, Program, Operations, Databases, Help) and a toolbar. A green 'Ready' button is visible. The main window displays 'MAIN PROG' and a red status bar with '\*\*\* MA 900 \*\*\*'. The data is organized into several tables for different elements.

Ag	Al	B	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu
1							
2							
3							

Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P
1							
2							
3							

Pb	Si	Sn	Ti	V	Zn	H	H2
1						88158	78913
2						94156	79249
3						87719	72988

C	C2	B2	Ba2	Ba3	Ca2	Ca3	Cr2
1	253K	231K		1084.7	1095.2		1007.4
2	278K	238K		1272.4	1219.5		1042.6
3	278K	230K		1287.0	1045.1		915.21

Cu2	K2	Mg1	Mg2	Mn2	Na1	Na2	P2
1				952.49			962.53
2				1016.5			1053.0
3				991.13			1009.1

Ti2	V2	Zn2	Zn3	Ag2
1		1242.8	1128.7	
2		1402.0	1131.1	
3		1296.2	1009.1	

Anexo 4.3. CALIBRACIÓN CON EL ACEITE METALORGÁNICO SMA-900 EN EL SOFTWARE SPECTROIL



## ANEXO 5

### 5.1 Certificado de Análisis en Matrix Oil de 0 PPM



One Executive Drive, Suite 101  
Chelmsford, MA 01824-2563

Matn: 978.466.0123  
Fax: 978.466.0030  
www.spectrosci.com

#### Certificate of Analysis

Matrix Oil

Product: CS-75

Product No.: CS-75-500

Lot No.: 710657230-B

Expires: August 31, 2017

This matrix oil is intended for use as a diluent for other metallo-organic standards. It is a 75 cSt hydrocarbon oil that was analyzed for trace metals by plasma emission spectrometry, with traceability to NIST SRM 1085b.

Trace Concentrations (µg/g)							
Ag	<1	Cu	<1	Mn	<1	Si	<1
Al	<1	Cr	<1	Mo	<1	Sn	<1
As	<1	Cd	<1	Nb	<1	Sr	<1
B	<1	Fe	<1	Ni	<1	Ti	<1
Ba	<1	Mg	<1	P	<1	Tl	<1
Be	<1	K	<1	Pb	<1	V	<1
Bi	<1	La	<1	Sb	<1	Y	<1
Ca	<1	Li	<1	Sc	<1	Zn	<1
Cd	<1	Mg	<1	Se	<1	Zr	<1

Spectro Scientific guarantees the accuracy of this solution until the expiration date shown above, provided it is kept tightly capped and stored under normal laboratory conditions.

Spectro Scientific

Q. A. Manager

Spectro Scientific waives all responsibility for any damages resulting from the usage and/or implementation of the products/data described herein.

#### Anexo 5.1. CERTIFICADO DE ANÁLISIS ACEITE MATRIZ CS-75.



## 5. 2 Certificado de Análisis en Aceite Estándar de 100 PPM



One Executive Drive, Suite 101  
Chelmsford, MA 01824-2583

Main: 978.485.0123  
Fax: 978.485.0030  
www.spectrosci.com

### Certificate of Analysis

#### Calibration Standard

Product: **CS-24 @ 100**

Product No.: CS-24-100-200G

Contents: See below

Lot No.: 112288-2

Matrix: 75 cSt Hydrocarbon Oil

Expires: August 31, 2017

This solution is intended for use as a calibration standard for plasma emission spectroscopy (ICP or DCP), rotating disk (RDE) or atomic absorption spectroscopy (AA). It is a multielement solution that was prepared to contain the element concentrations shown below.

**Certification:** This standard was manufactured under an ISO 9001:2000 certified quality control system. This standard was prepared to a nominal concentration of 100 µg/g. The certified concentration values are based upon the assayed concentrations of the raw materials and the gravimetric procedures used to prepare the final standard. The uncertainty associated with each certified concentration is ± 1% relative, which is the sum of the estimated errors due to the assay of the raw material and the gravimetric preparation of the solution. Secondary verification of the certified concentration was done using ICP emission spectrometry and is traceable to NIST SRM 1085b.

Element	Concentration & Uncertainty	Element	Concentration & Uncertainty	Element	Concentration & Uncertainty
Ag	100 µg/g ±1.1%	Fe	99.4 µg/g ±1.1%	P	99.5 µg/g ±1.1%
Al	99.4 µg/g ±1.1%	K	100 µg/g ±1.1%	Pb	99.5 µg/g ±1.1%
B	99.0 µg/g ±1.1%	Li	100 µg/g ±1.1%	Sb	100 µg/g ±1.1%
Ba	99.4 µg/g ±1.1%	Mg	99.5 µg/g ±1.1%	Si	99.4 µg/g ±1.1%
Ca	99.5 µg/g ±1.1%	Mn	99.4 µg/g ±1.1%	Sn	99.5 µg/g ±1.1%
Cd	99.4 µg/g ±1.1%	Mo	99.4 µg/g ±1.1%	Ti	99.7 µg/g ±1.1%
Cr	99.4 µg/g ±1.1%	Na	100 µg/g ±1.1%	V	99.4 µg/g ±1.1%
Cu	99.4 µg/g ±1.1%	Ni	99.5 µg/g ±1.1%	Zn	99.4 µg/g ±1.1%

**Tools:** The balances used in the preparation of the standard are calibrated regularly with traceability to NIST.

Spectro Scientific guarantees the accuracy of this solution until the expiration date shown above, provided it is kept tightly capped and stored in the original bottle under normal laboratory conditions. Do not refrigerate or expose to direct sunlight. Minimize exposure to moisture or high humidity. We recommend that the solution be thoroughly mixed, by shaking the bottle, immediately prior to use. Dilutions to lower concentrations using solvents reduces the shelf life. To achieve the highest accuracy, fresh working solutions should be made daily. We suggest the addition of stabilizer (Product No. STAB-2) to enhance the stability of metallo-organic standards that have been diluted using solvents. All surfaces, which come into contact with the solution, must have been previously cleaned. Never pour used standard back into original bottle to avoid contamination.

Spectro Scientific

Q. A. Manager

Spectro Scientific waives all responsibility for any damages resulting from the usage and/or implementation of the products/data described herein.

Anexo 5.2. CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE ESTÁNDAR DE CALIBRACIÓN CS-24 @ 100.



### 5.3 Certificado de Análisis en Aceite estándar de 900 PPM



One Executive Drive, Suite 101  
Chelmsford, MA 01924-2903  
Main: 978.488.0123  
Fax: 978.488.9000  
www.spectrosci.com

#### Certificate of Analysis

#### Metallo-Organic Standard

Element: **SMA-900**

Product No.: SMA-900-200G

Contents: See below

Lot No.: 88439-1

Matrix: 75 cSt Hydrocarbon Oil

Expires: April 30, 2017

This solution is intended for use as a calibration standard for rotating disc electrode (RDE), plasma emission spectroscopy (ICP or DCP), or atomic absorption spectroscopy (AA). It is a multielement solution that was prepared to contain the elements/concentrations shown below.

**Certification:** The standard was manufactured under an ISO 9001:2000 certified quality control system. The certified concentrations are based upon the assayed concentrations of the raw materials and the gravimetric procedures used to prepare the final standard. The uncertainty associated with each certified concentration is  $\pm 1\%$  relative, which is the sum of the estimated errors due to the assay of the raw material and the gravimetric preparation of the solution. Secondary verification of the certified concentration was done using ICP emission spectroscopy and is traceable to NIST SRM 1065b.

**Tools:** The balances used in the preparation of the standard are calibrated regularly with traceability to NIST.

Element	Concentration & Uncertainty	Element	Concentration & Uncertainty	Element	Concentration & Uncertainty
Ba	900 µg/g ±1%	Mg	900 µg/g ±1%	Zn	900 µg/g ±1%
Ca	900 µg/g ±1%	P	900 µg/g ±1%		

Spectro Scientific guarantees the accuracy of this solution until the expiration date shown above, provided it is kept tightly capped and stored in the original bottle under normal laboratory conditions. Do not refrigerate or expose to direct sunlight. Minimize exposure to moisture or high humidity. We recommend that the solution be thoroughly mixed, by shaking the bottle, immediately prior to use. All surfaces, which come into contact with the solution, must have been previously cleaned. Never pour used standard back into original bottle to avoid contamination.

Spectro Scientific

Q. A. Manager

Spectro Scientific waives all responsibility for any damages resulting from the usage and/or implementation of the products/data described herein.

Anexo 5.3. CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE ESTÁNDAR METALORGÁNICO  
SMA-900.

## ANEXO 6

Materiales del equipo Spectroil Q100

### F.1 Varillas de Grafito



Anexo 6.1 VARILLAS DE GRAFITO PARA EL ESPECTROFOTÓMETRO DE EMISIÓN ATÓMICA SPECTROIL Q100.

### F.2 Rodamientos de Grafito



Anexo 6.2 RODAMIENTOS DE GRAFITO PARA EL ESPECTROFOTÓMETRO DE EMISIÓN ATÓMICA SPECTROIL Q100.

## ANEXO 7

### 7.1 Equipo Analizador Infrarrojo por la Transformada de Fourier -

#### FluidScan®1000



Anexo 7.1. ANÁLISIS DE ACEITE LUBRICANTE EN EL EQUIPO FLUID SCAN®1000.

## ANEXO 8

### 8.1 Aceite Lubricante con Metales de Desgaste



Anexo 8.1. MUESTRA DE ACEITE LUBRICANTE CON METALES DE DESGASTE PRECIPITADO.

### 8.2 Aceite Lubricante en Estado de Oxidación



Anexo 8.2. MUESTRA DE ACEITE LUBRICANTE EN ESTADO DE OXIDACIÓN.

### 8.3 Aceite Lubricante Emulsionado



Anexo 8.3. MUESTRA DE ACEITE LUBRICANTE EMULSIONADO.

## ANEXO 9

### 9.1 Datos de Ficha Técnica de Aceite Lubricante Mobil Delvac MX 15W-40



## Mobil Delvac MX™ 15W-40

Aceite SHPD de muy alto rendimiento para motores diesel

### Descripción de producto

Mobil Delvac MX™ 15W-40 es un aceite de muy alto rendimiento para motores diesel que proporciona una excelente lubricación a los motores diesel modernos que promueve una mayor vida útil del motor. Como resultado, este producto cumple o excede con la mayoría de las especificaciones de los fabricantes de motores americanos y europeos. Su elevado rendimiento ha sido probado en un amplio rango de industrias, aplicaciones y flotas mixtas.

Su avanzada formulación química ofrece un insuperable rendimiento en motores modernos diesel de bajas emisiones, así como en motores más antiguos que operan con combustible de bajo o alto contenido de azufre. Mobil Delvac MX 15W-40 combina una mezcla de aceites base de alta calidad con un progresivo sistema de aditivos, que le proporcionan un control superior del espesamiento del aceite debido a la formación de hollín y a las elevadas temperaturas así como una insuperable resistencia a la oxidación, corrosión y depósitos a altas temperaturas.

### Propiedades y Beneficios

Los modernos motores de elevada potencia y bajo nivel de emisiones incrementan cada vez más la demanda sobre el aceite. Los diseños cada vez más compactos reducen el consumo de aceite dando lugar a una menor cantidad de aceite fresco de reposición con que reponer los aditivos agotados. Los anillos superiores de los pistones están más altos en el pistón lo que causa que la película de lubricante este sometida a mayores temperaturas en la cámara de combustión, dando como resultado un mayor esfuerzo térmico. Mayores presiones de inyección y tiempos retardados mejoran la eficiencia de la mezcla pero también incrementan las temperaturas y el hollín que debe soportar el lubricante. La avanzada tecnología del Mobil Delvac MX 15W-40 ofrece un excepcional rendimiento, tanto en los motores diesel modernos como en los modelos anteriores. Los principales beneficios incluyen:

Propiedades	Ventajas y Beneficios potenciales
Alta estabilidad térmica y a la oxidación	Menor formación de lodos y depósitos
Reservas TBN	Control de depósitos y neutralización de ácidos
Mantiene su viscosidad, estabilidad al cizallamiento Protección	Protección contra el desgaste y control de la viscosidad
Avanzada detergencia/dispersancia	Motores más limpios y vida más larga de los componentes
Mejor manejo del hollín	Mejora el control de la viscosidad y la facilidad de bombeo del aceite usado
Excelentes propiedades a bajas temperaturas	Protección contra el desgaste durante el arranque
Compatibilidad con componentes	Vida más prolongada de las juntas
Cumple con las especificaciones de los principales fabricantes originales de equipos	Un solo aceite para flotas mixtas





## Aplicaciones

Recomendado por ExxonMobil para el uso en:

- Motores diesel turboalimentados o de aspiración natural fabricados por los principales constructores americanos, europeos y japoneses.
- Camiones de carga pesada y carga ligera de uso en carretera.
- Maquinaria industrial de construcción, minería, explotación de canteras y agricultura.
- Flotas mixtas.

## Especificaciones y Aprobaciones

Mobil Delvac MX 15W-40 cumple o excede los requerimientos de:

API CI-4/CH-4/SL/SJ	X
ACEA E7	X
Caterpillar ECF-2	X
Cummins CES 20077, 20076	X
Izuzu D60 (w/o DPO Equipped Vehicles)	X

Mobil Delvac MX 15W-40 tiene las siguientes aprobaciones de fabricantes:

MB-Approval 228.3	X
Mack EO-M PLUS/EO-N	X
Volvo VDS-3	X
MAN M3275-1	X
Renault Trucks RLD-2	X
MTU Oil Category 2	X

Mobil Delvac MX 15W-40 es recomendado por ExxonMobil para el uso en aplicaciones que requieren:

API CG-4/ CF-4/ CF	X
ACEA A2/B2	X
Volvo VDS-2	X
Renault Trucks RLD	X
Mack EO-M	X
Cummins CES 20072, 20071	X
Detroit 7SE 270 (4-Stroke Cycle)	X



#### Características típicas

##### Mobil Delvac MX 15W-40

SAE Grade	15W-40
Viscosidad, ASTM D 445	
cSt @ 40°C	106
cSt @ 100°C	14.5
Índice de viscosidad, ASTM D 2270	140
Cenizas sulfatadas, % peso, ASTM D 874	1.1
TBN, mg KOH/g, ASTM D 2896	10
Punto de congelación, °C, ASTM D 97	-30
Punto de inflamación, °C, ASTM D 92	230
Densidad @ 15°C kg/l, ASTM D 4052	0.88

#### Seguridad e Higiene

Con base en Información disponible, no es de esperar que este producto cause efectos adversos en la salud mientras se utilice en las aplicaciones a las que está destinado y se sigan las recomendaciones de la Ficha de Datos de Seguridad (FDS). Las Fichas de Datos de Seguridad están disponibles a través del Centro de Atención al Cliente. Este producto no debe utilizarse para otros propósitos distintos a los recomendados. Al deshacerse del producto usado, tenga cuidado para así proteger el medio ambiente.

El logotipo Mobil, el diseño del Pegasus, y Delvac son marcas registradas por Exxon Mobil Corporation, o una de sus afiliadas.

© Copyright 2009-2017 Exxon Mobil Corporation. All Rights Reserved

3 de 3  
Fev/18

## Anexo 9.1. FICHA TÉCNICA DE ACEITE LUBRICANTE MOBIL DELVAC MX 15W-40



## ANEXO 10

### 10.1 Nivel Seis Sigma Blackberry & Cross

#### Nivel Seis Sigma con cambio de 1.5 Sigma

Nivel Sigma	Sigma + 1.5	1.5 - Sigma	Probabilidad Buenos	Probabilidad Defectos	DPMO	Cpk
0	0,933192799	0,933192799	0	1	1.000.000,00	0,000
0,5	0,977249868	0,841344746	0,135905122	0,864094878	864.094,88	0,167
0,75	0,987775527	0,773372648	0,21440288	0,78559712	785.597,12	0,250
1	0,993790335	0,691462461	0,302327873	0,697672127	697.672,13	0,333
1,25	0,997020237	0,598706326	0,398313911	0,601686089	601.686,09	0,417
1,5	0,998650102	0,5	0,498650102	0,501349898	501.349,90	0,500
1,75	0,999422975	0,401293674	0,598129301	0,401870699	401.870,70	0,583
2	0,999767371	0,308537539	0,691229832	0,308770168	308.770,17	0,667
2,25	0,999911583	0,226627352	0,77328423	0,22671577	226.715,77	0,750
2,5	0,999968329	0,158655254	0,841313075	0,158686925	158.686,93	0,833
2,75	0,999989311	0,105649774	0,894339538	0,105660462	105.660,46	0,917
3	0,999996602	0,066807201	0,933189401	0,066810599	66.810,60	1,000
3,25	0,999998983	0,040059157	0,959939826	0,040060174	40.060,17	1,083
3,5	0,999999713	0,022750132	0,977249581	0,022750419	22.750,42	1,167
3,75	0,999999924	0,012224473	0,987775451	0,012224549	12.224,55	1,250
4	0,999999981	0,006209665	0,993790316	0,006209684	6.209,68	1,333
4,25	0,999999996	0,002979763	0,997020232	0,002979768	2.979,77	1,417
4,5	0,999999999	0,001349898	0,998650101	0,001349899	1.349,90	1,500
4,75	1	0,000577025	0,999422975	0,000577025	577,03	1,583
5	1	0,000232629	0,999767371	0,000232629	232,63	1,667
5,25	1	8,84173E-05	0,999911583	8,84173E-05	88,42	1,750
5,5	1	3,16712E-05	0,999968329	3,16712E-05	31,67	1,833
5,75	1	1,06885E-05	0,999989311	1,06885E-05	10,69	1,917
6	1	3,39767E-06	0,999996602	3,39767E-06	3,40	2,000
6,25	1	1,01708E-06	0,999998983	1,01708E-06	1,02	2,083
6,5	1	2,86652E-07	0,999999713	2,86652E-07	0,29	2,167
6,75	1	7,60496E-08	0,999999924	7,60496E-08	0,08	2,250
7	1	1,89896E-08	0,999999981	1,89896E-08	0,02	2,333
7,25	1	4,46217E-09	0,999999996	4,46217E-09	0,00	2,417
7,5	1	9,86588E-10	0,999999999	9,86588E-10	0,00	2,500
7,75	1	2,05226E-10	1	2,05226E-10	0,00	2,583
8	1	4,016E-11	1	4,016E-11	0,00	2,667

elaborada por Blackberry&Cross [www.blackberrycross.com](http://www.blackberrycross.com)

elaborada por  
**Blackberry&Cross**  
[www.blackberrycross.com](http://www.blackberrycross.com)  
(506) 2234-5720  
(antes de utilizar esta tabla asegúrese de comprender los supuestos bajo los cuales fue confeccionada. Para más información escriba a [soporte@blackberrycross.com](mailto:soporte@blackberrycross.com))

#### Anexo 10.1. TABLA DE NIVEL SEIS SIGMA DE BLACKBERRY&CROSS



## ANEXO 11

### 11.1 Tabla de Metales de Desgaste y Contaminantes a las 250 Horas de Trabajo

#### Caterpillar S•O•S<sup>SM</sup> Services Wear table

Created	21 Jul 2008		
Manufacturer	CATERPILLAR		
Family	All		
Model	D8T		
Product ID Prefix	J8B		
Compartment	ENGINE		
Valid Equipment	311		
Valid Samples	1555		
Valid Fluid Hours	250		
Element	No Action Required	Monitor	Action Required
Copper	0 to 8	9 to 10	Over 10
Iron	0 to 60	61 to 78	Over 78
Chromium	0 to 2	3 to 4	Over 4
Aluminum	0 to 3	4 to 5	Over 5
Lead	0 to 3	4 to 5	Over 5
Silicon	0 to 8	9 to 11	Over 11
Tin	0 to 2	3 to 4	Over 4

Filter Criteria	
Maximum Fluid Hours	750
Maximum Equipment Hours	12000
Break-In Samples Excluded	True
Excluded Samples with Positive Fuel	True
Excluded Samples with Positive Water	True
Excluded Samples with Positive Glycol	True
Excluded Samples where Sodium (Na) Exceeds PPM	25
Excluded Samples where Potassium (K) Exceeds PPM	25
Excluded Samples where Silicon (Si) Exceeds PPM	20
Starting Sample Date	All
Ending Sample Date	All
Specific Jobsites	All
Specific Customers	All
Dealers Excluded	None
Minimum Samples set at	30
Minimum Equipment set at	3

Anexo 11.1. TABLA DE DESGASTE SOS DE CATERPILLAR PARA METALES A LAS 250 HORAS

**ANEXO 12****12.1 Tabla de control del laboratorio de lubricantes de MUR-WY SAC**

<b>TRACTOR MODELO D8T</b>		
<b><i>PRUEBAS FISICO –QUÍMICAS &amp; FT-IR</i></b>		
Parámetros	Mínimo	Máximo
Viscosidad 100°C (cSt)	12.16	16.45
TNB (mgKOH/g)	5	-
Oxidación (abs/mm <sup>2</sup> )	-	35
Nitración (abs/mm <sup>2</sup> )	-	30
Sulfatación (abs/mm <sup>2</sup> )	-	40
Hollín (% wt)	-	3
<b><i>METALES DE DESGASTE</i></b>		
Hierro (ppm)	-	100
Aluminio (ppm)	-	20
Cobre (ppm)	-	50
Cromo (ppm)	-	15
Estaño (ppm)	-	20
Plomo (ppm)	-	40
<b><i>METALES CONTAMINACIÓN</i></b>		
Silicio (ppm)	-	30
Sodio (ppm)	-	50

\* Nota: Los valores condonatorios máximos y mínimos dados solo se deberán de tomar como referencia, consultar al fabricante de la maquinaria para obtener los valores correspondientes.

Anexo 12.1. TABLA DE CONTROL PARA ACEITE LUBRICANTE MOBIL  
DELVAC MX 15W40 – LABORATORIO DE LUBRICANTES MUR-WY SAC

## ANEXO 13

### ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE PROCESO EN LA VISCOSIDAD A 100°C

Viscosidad a 100 °C

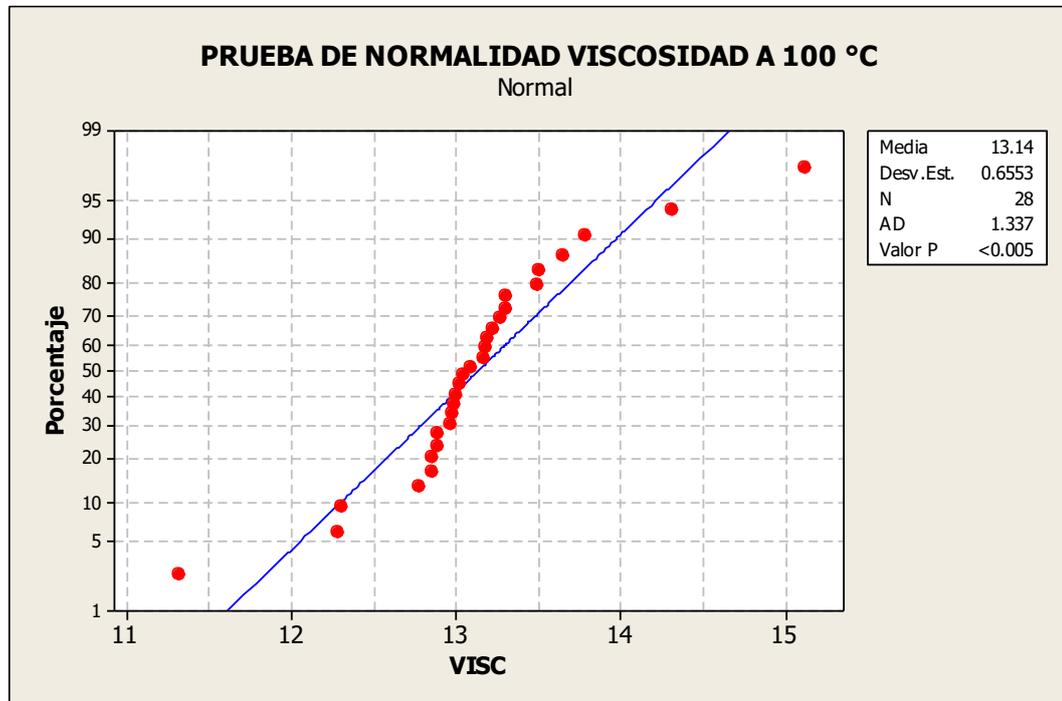


Figura 68. Prueba de normalidad de la viscosidad del motor a 100°C

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 68* nos da el valor de  $P > 0.005$ , nos indica que nuestros datos no siguen una distribución normal

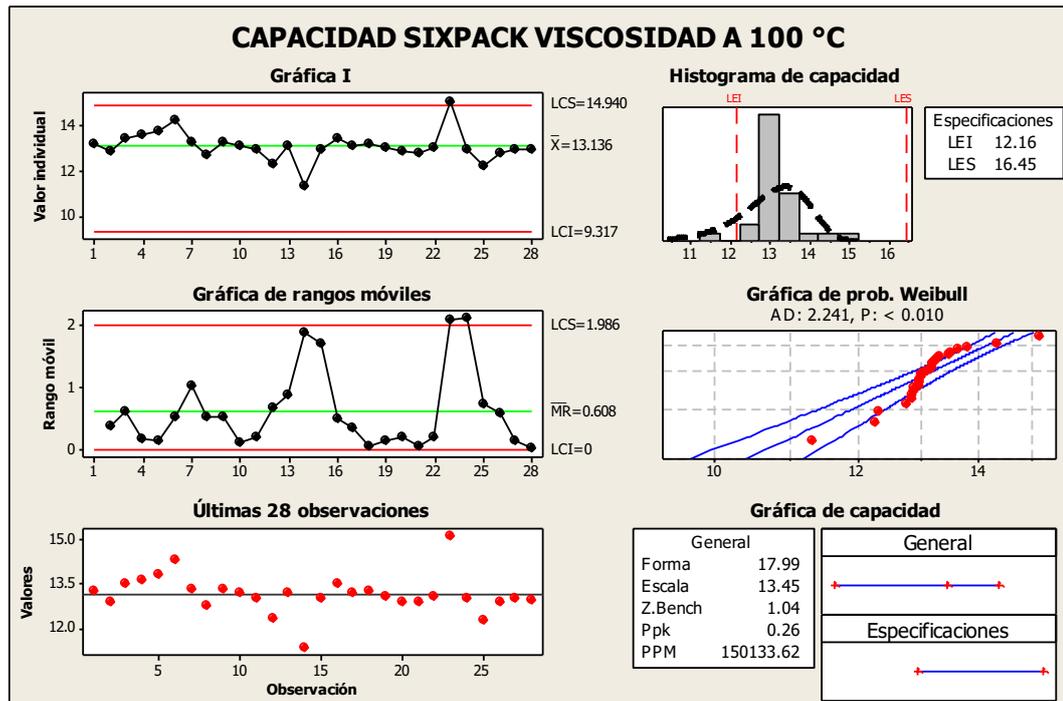


Figura 69. Capacidad sixpack del proceso en la viscosidad a 100°C

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 69* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : observación en el punto 23, fuera de control.

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 23, fuera de control.

Gráfica de Valores : Observación de valores en el punto 23.

P :  $P = 0.005 < 0.05$ , distribución no normal de datos

El punto 23 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

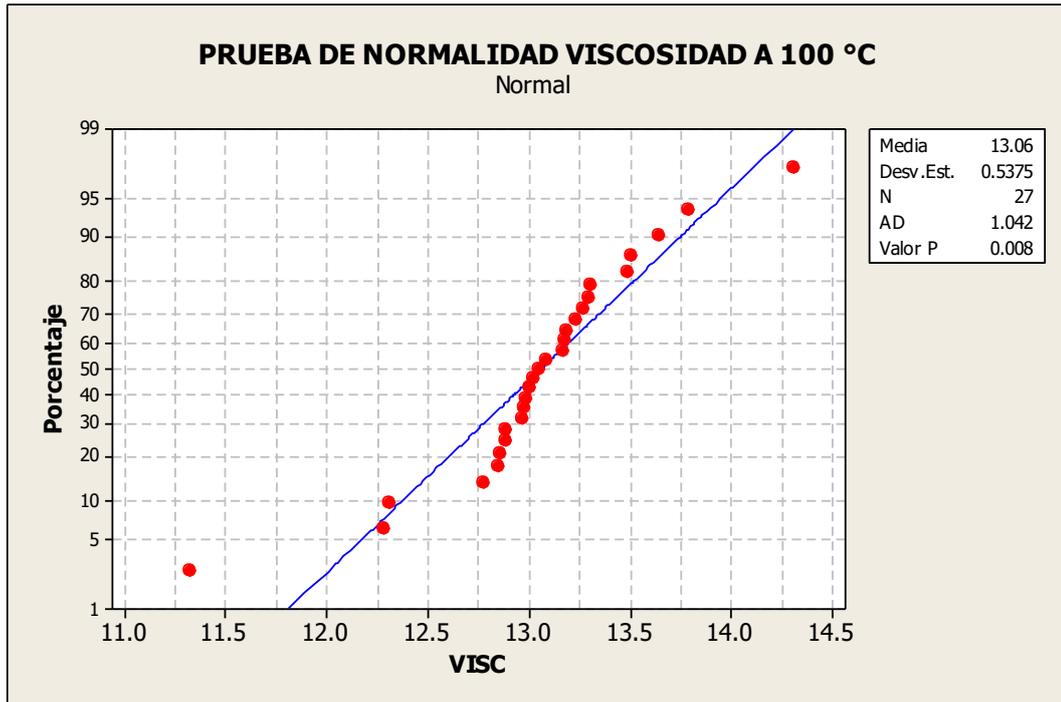


Figura 70. Prueba de normalidad de la viscosidad a 100°C

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 70* nos da el valor de  $0.05 > P > 0.008$ , nos indica que nuestros datos no siguen una distribución normal.

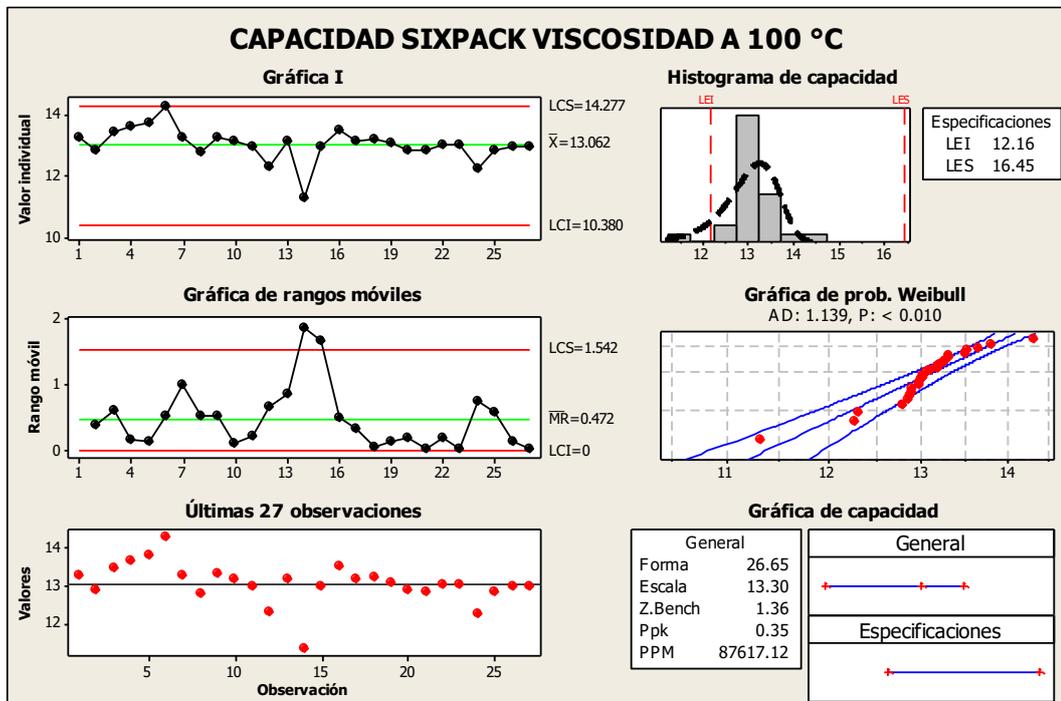


Figura 71. Capacidad sixpack del proceso en la viscosidad a 100°C

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 71* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 14 y 15, fuera de control

Gráfica de Valores : Observación en el punto 14

P :  $0.05 > P > 0.008$ , distribución no normal de datos

El punto 14 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

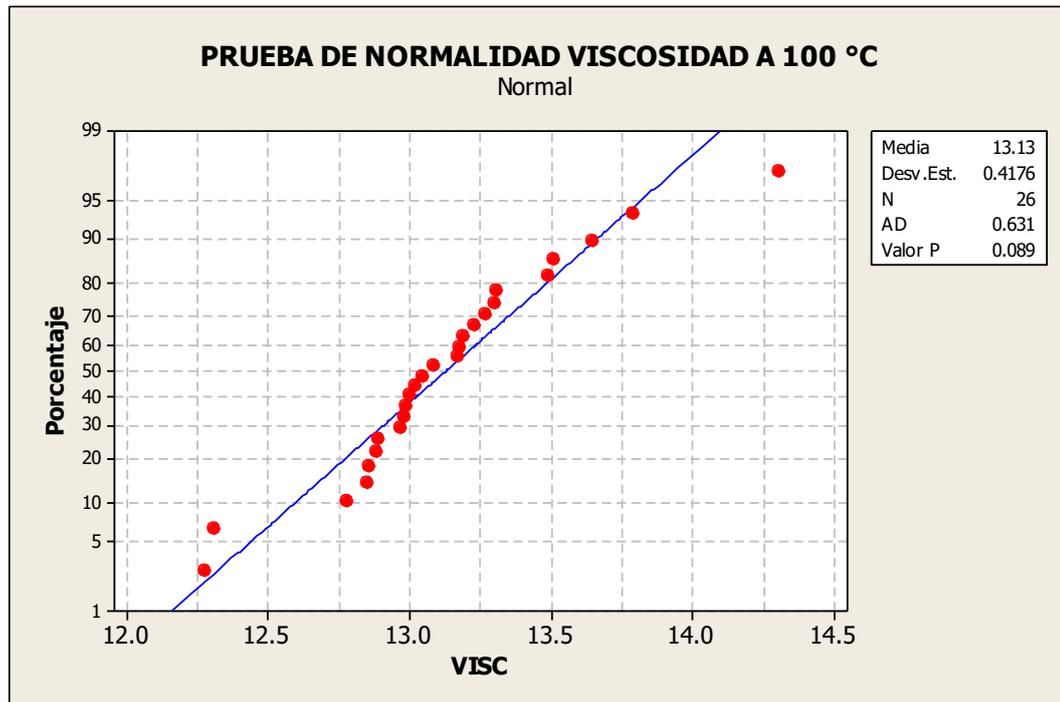


Figura 72. Prueba de normalidad de la viscosidad a 100°C

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 72* nos da el valor de  $0.089 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

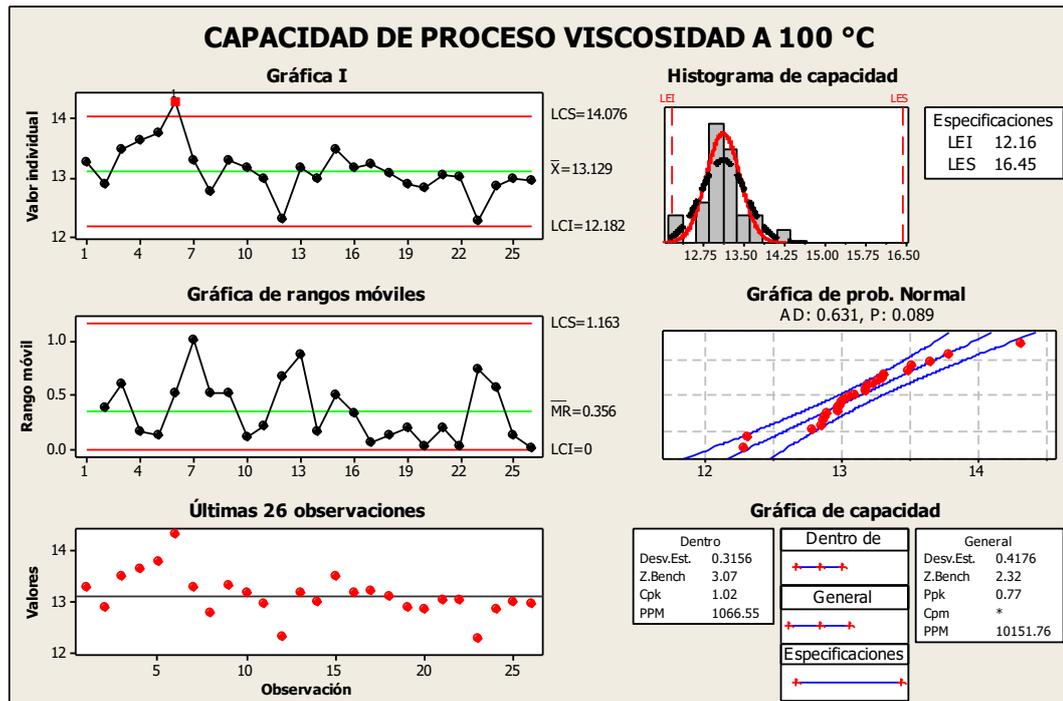


Figura 73. Capacidad sixpack del proceso en la viscosidad a 100°C

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 73* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : observación en el punto 06, fuera de control

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : observación de valores en el punto 06.

P :  $0.089 > P > 0.05$

El punto 06 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.



De acuerdo a la *Figura 75* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores P : Datos dentro de los límites de control

P : 0.246

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

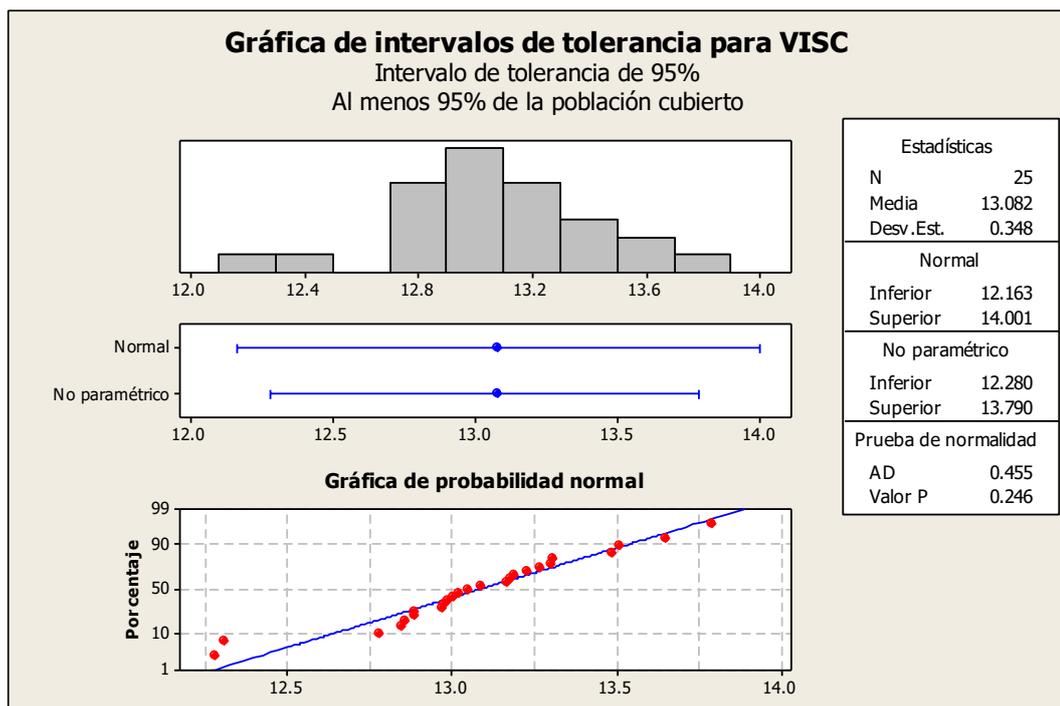


Figura 76. Intervalos de tolerancia para la viscosidad del motor a 100°C

Fuente: Software Minitab 16

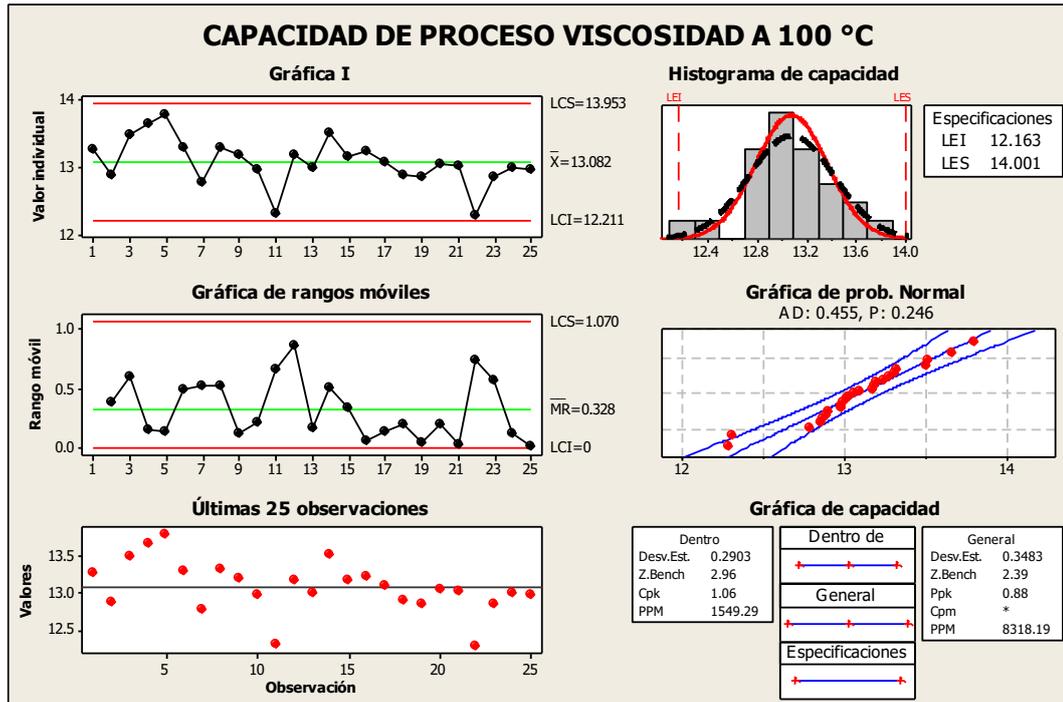


Figura 77. Capacidad sixpack del proceso en la viscosidad a 100°C

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

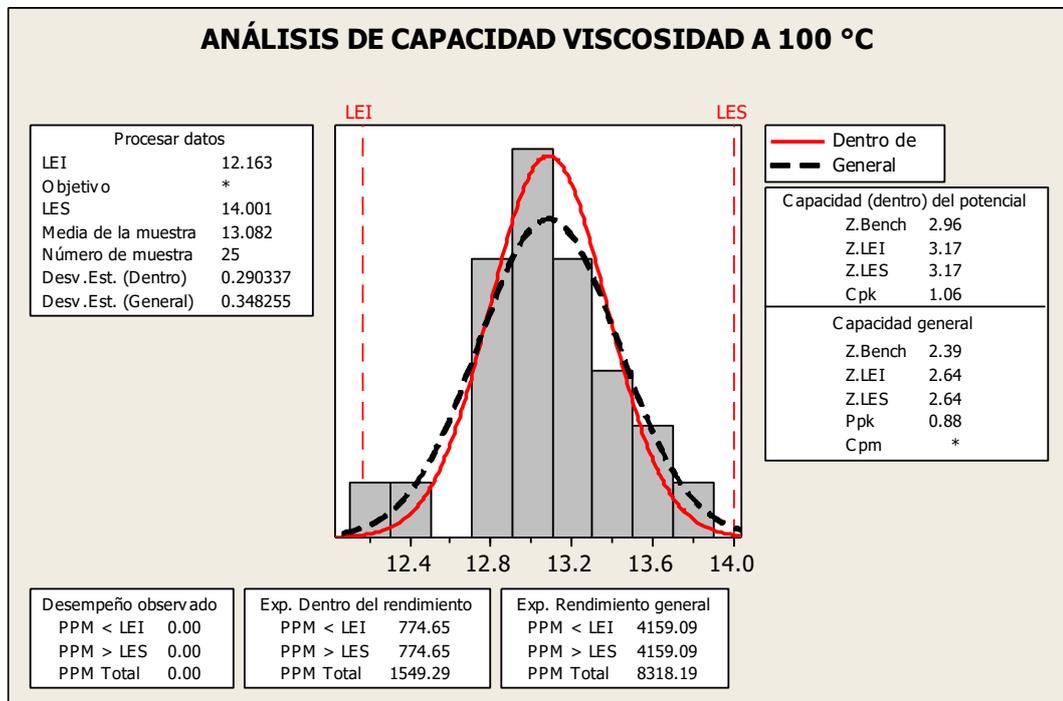


Figura 78. Análisis de capacidad en la viscosidad a 100°C

Fuente: Software Minitab 16



Límite de control superior (LCS)	: 13.953
Límite de control inferior (LCI)	: 12.211
Límite de especificación superior (LES)	: 14.001
Límite de especificación inferior (LEI)	: 12.163
Capacidad (dentro) del Potencial	
Z.Bench	: 2.96
Z.LEI	: 3.17
Z.LES	: 3.17
Cpk	: 1.06
Capacidad General	
Z.Bench	: 2.39
Z.LEI	: 2.64
Z.LES	: 2.64
Ppk	: 0.88

## ANEXO 14

### ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE PROCESO EN RESULTADOS OBTENIDOS

#### DE FT-IR

#### NITRACIÓN

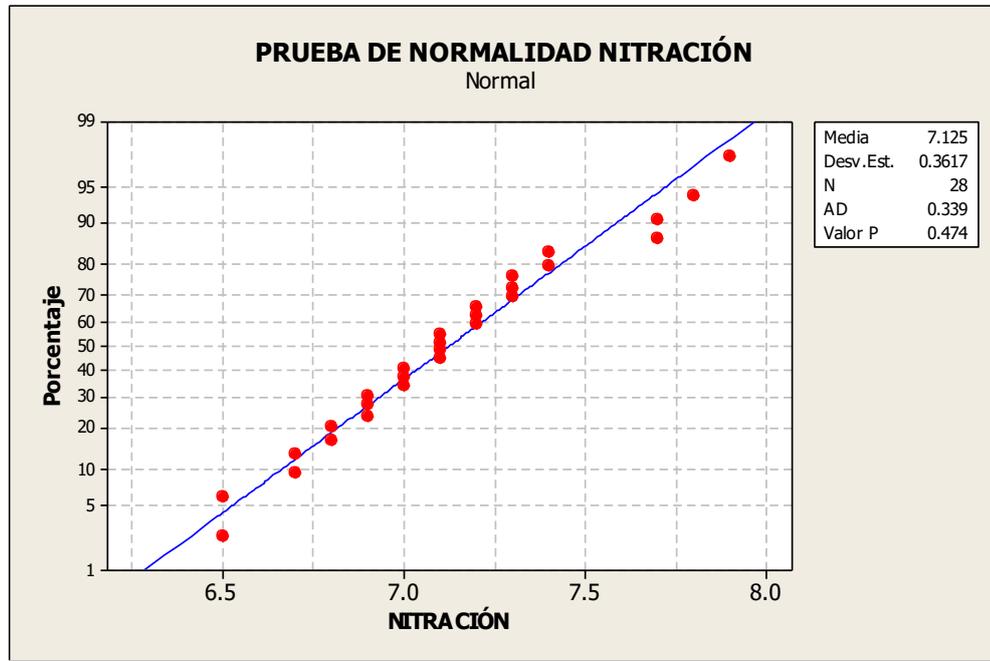


Figura 79. Prueba de normalidad de nitración

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 79* nos da el valor de  $0.474 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

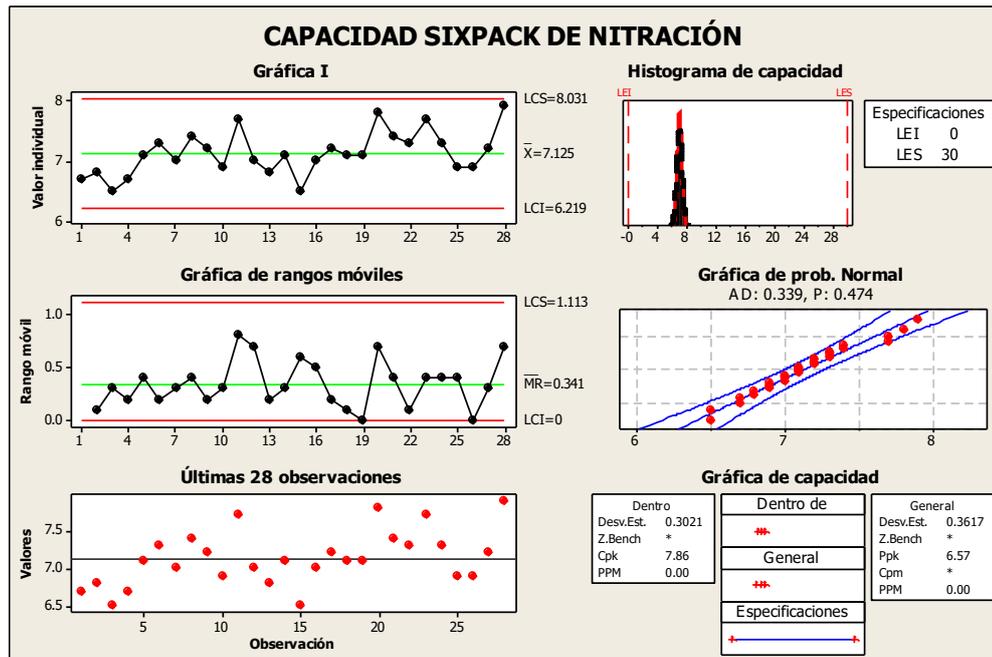


Figura 80. Capacidad sixpack del proceso de nitración

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 80* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control

P : 0.474

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

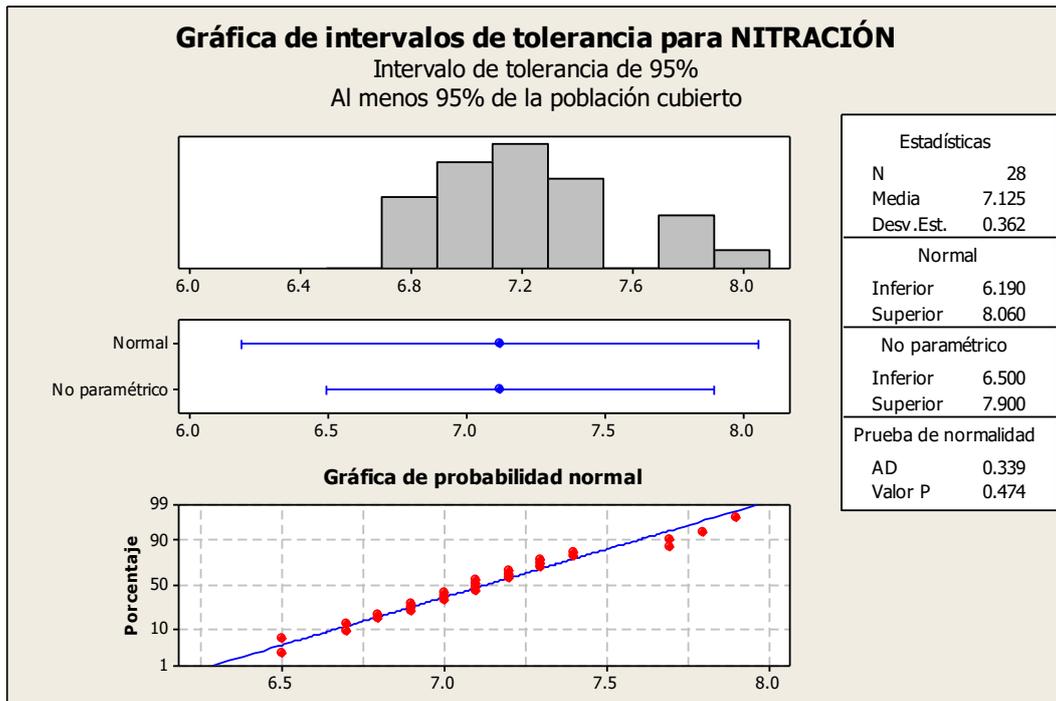


Figura 81. Intervalos de tolerancia para nitración

Fuente: Software Minitab 16

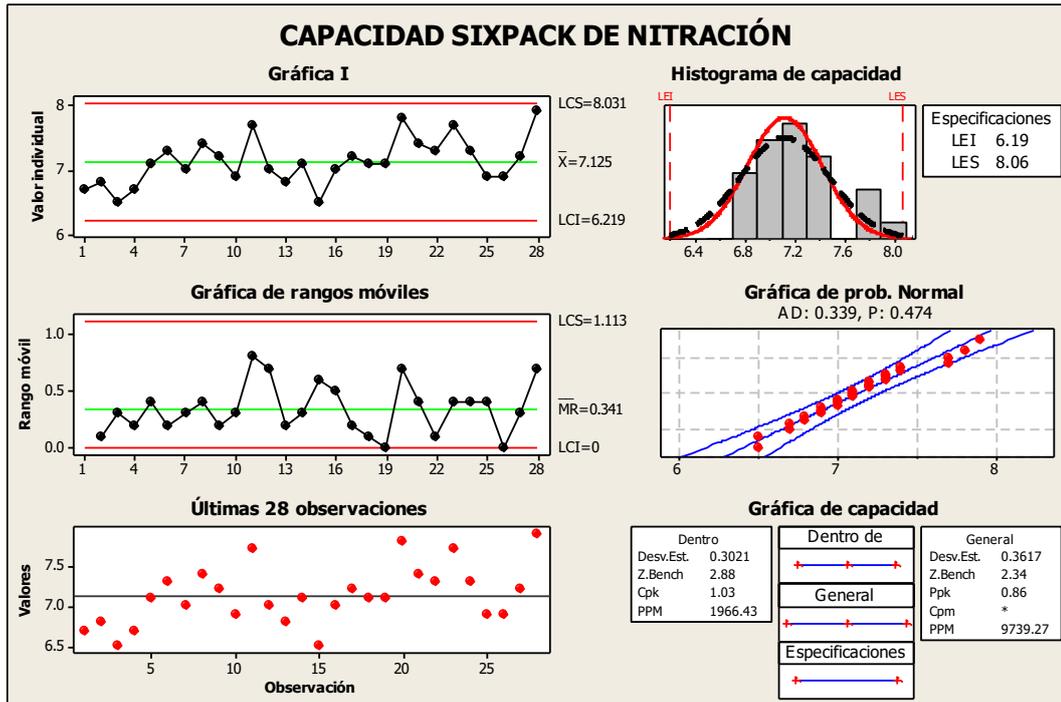


Figura 82. Capacidad sixpack del proceso de nitración

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

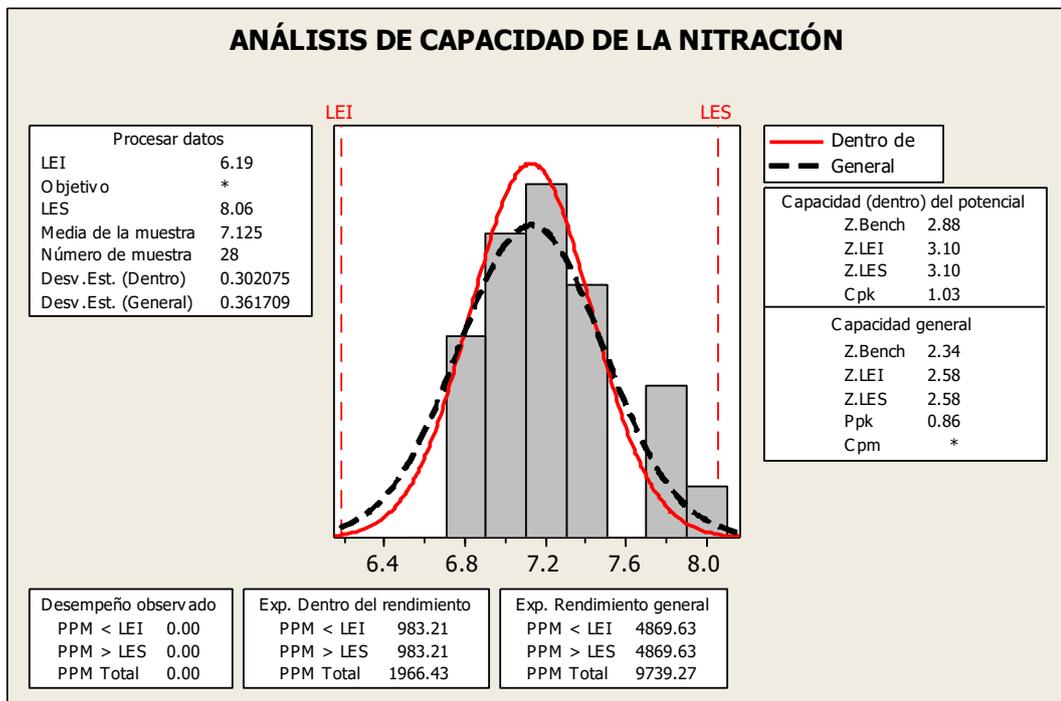


Figura 83. Análisis de capacidad de la nitración

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 8.031
Límite de control inferior (LCI)	: 6.219
Límite de especificación superior (LES)	: 8.06
Límite de especificación inferior (LEI)	: 6.19
Capacidad (dentro) del Potencial	
Z.Bench	: 2.88
Z.LEI	: 3.10
Z.LES	: 3.10
Cpk	: 1.03
Capacidad General	
Z.Bench	: 2.34
Z.LEI	: 2.58
Z.LES	: 2.58
Ppk	: 0.86

#### Oxidación

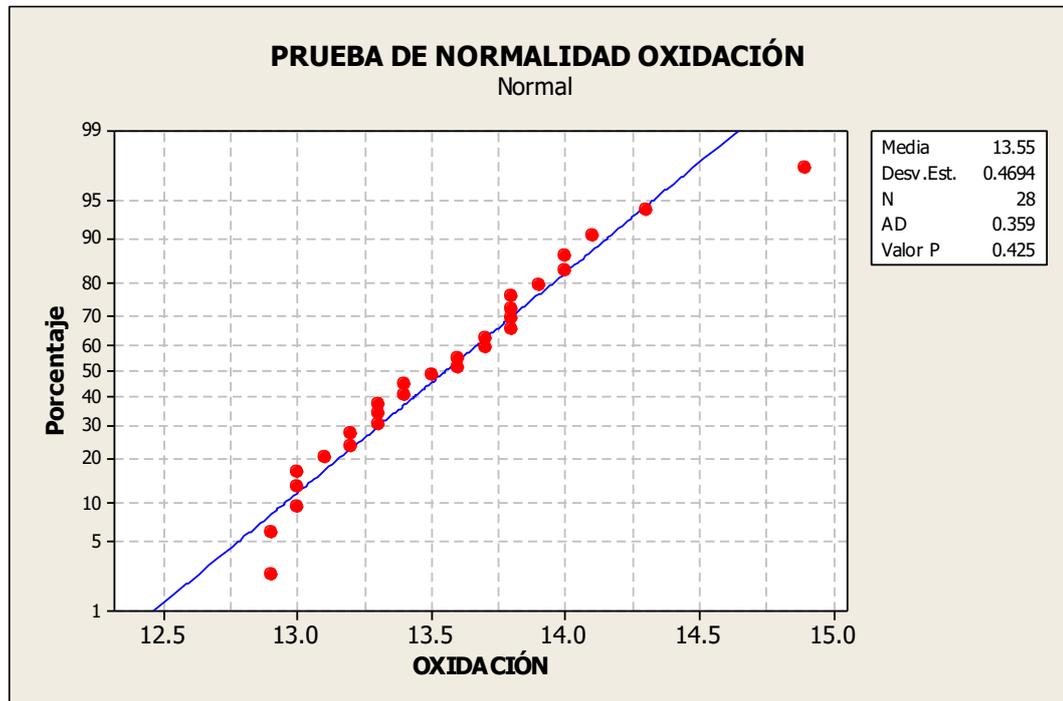


Figura 84. Prueba de normalidad oxidación

Fuente: Software Minitab 16

De la figura 84 nos da el valor de  $0.425 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

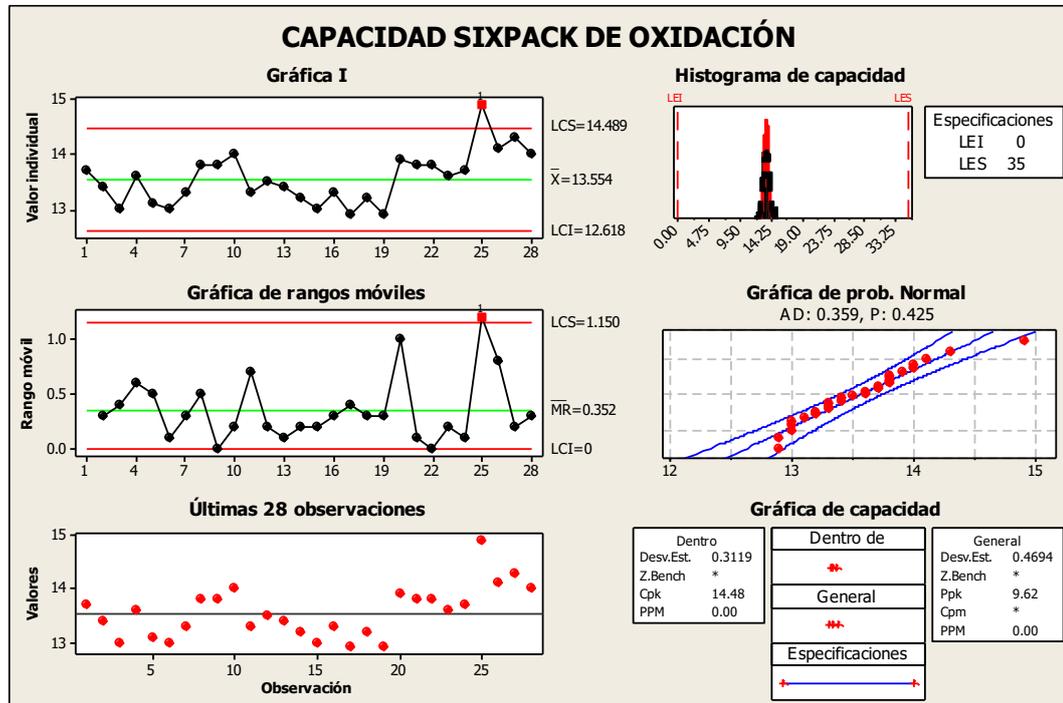


Figura 85. Capacidad sixpack del proceso oxidación

Fuente: Software Minitab 16

Datos dentro de los límites de control

De acuerdo a la Figura 85 se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 25, fuera de control

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 25, fuera de control

Gráfica de Valores : Observación de valor en el punto 25

P : 0.425

El punto 25 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

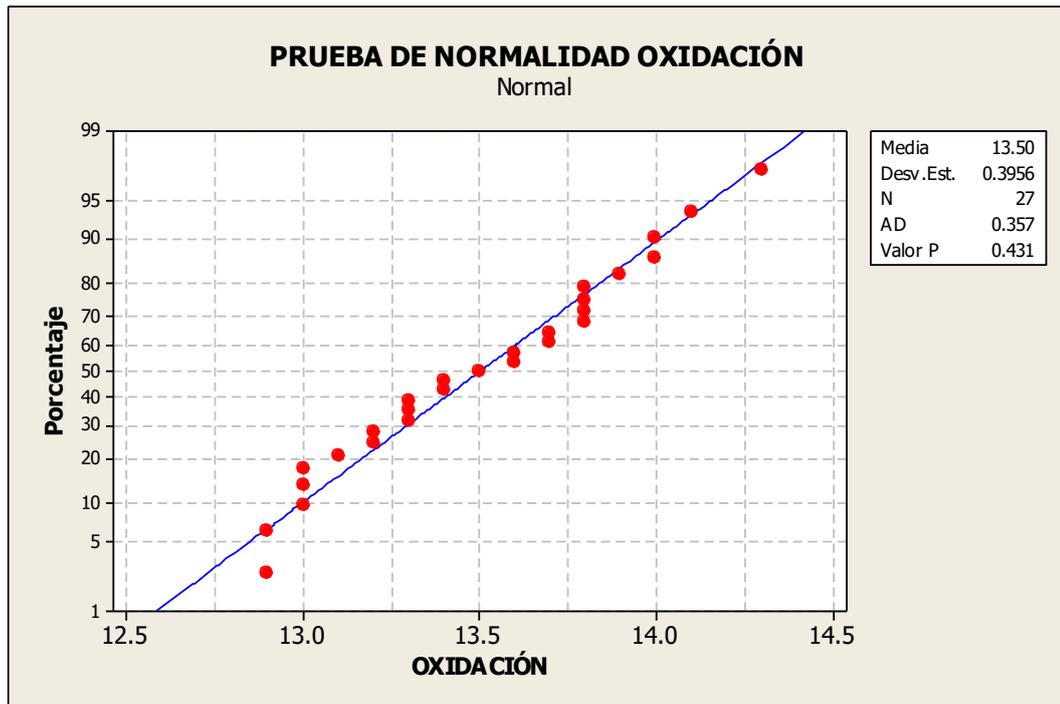


Figura 86. Prueba de normalidad de oxidación

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 86* nos da el valor de  $0.431 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

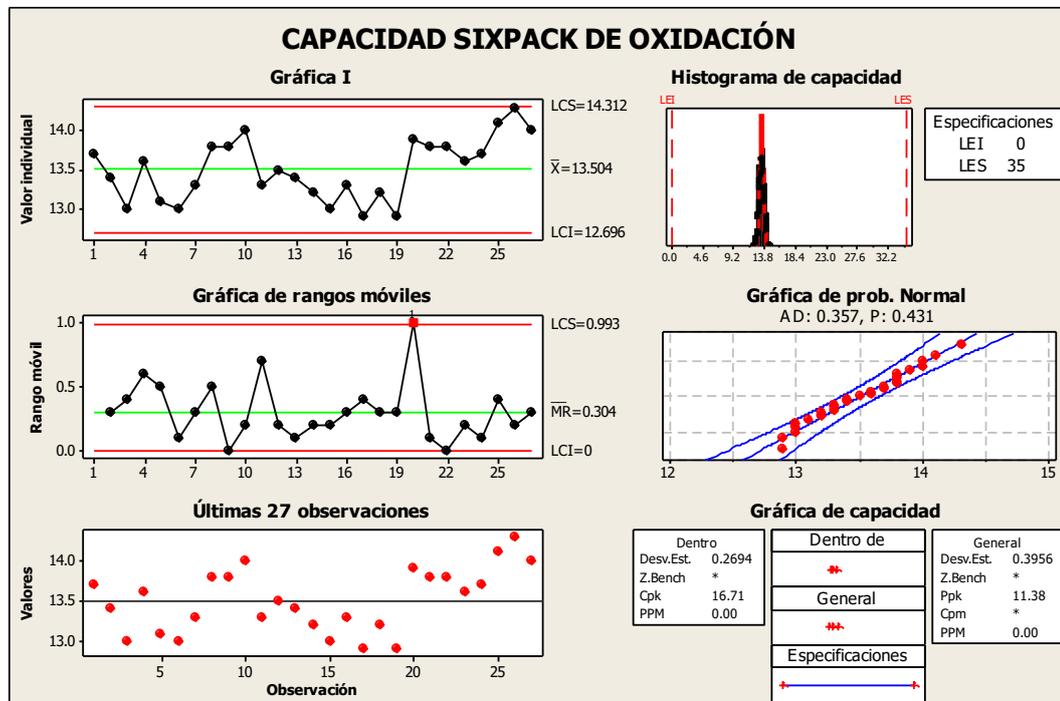


Figura 87. Capacidad sixpack del proceso de oxidación

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 87* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 20, fuera de control

Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control

P : 0.431

El punto 20 en la gráfica de rangos móviles no será asignado como causa asignable, debido a que el valor P es mayor que 0.05, la gráfica I y las últimas 27 observaciones siguen la línea de tendencia, mostrando que no hubo alteración en el motor, se realizará el ajuste de acuerdo a las especificaciones.

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

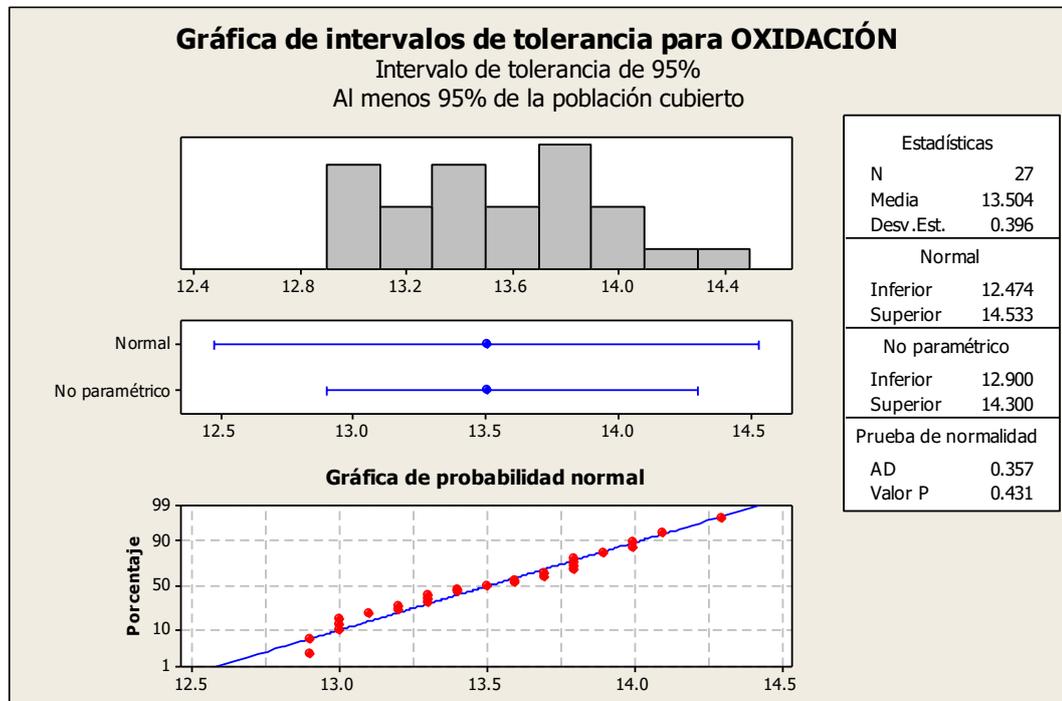


Figura 88. Intervalos de tolerancia para oxidación

Fuente: Software Minitab 16

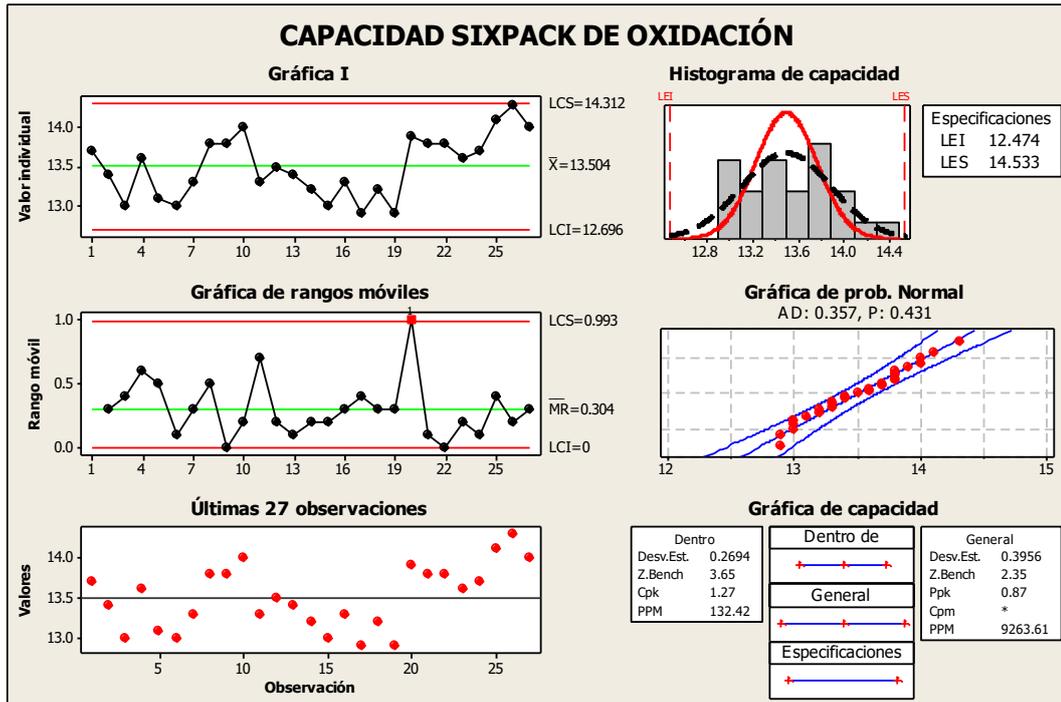


Figura 89. Capacidad sixpack del proceso oxidación

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

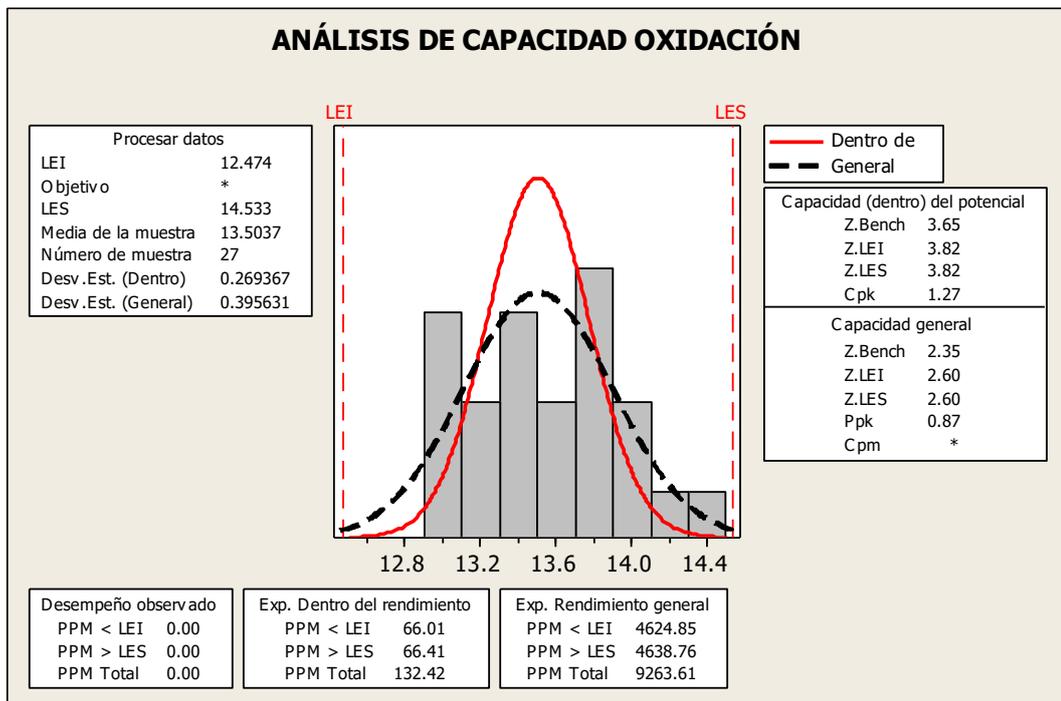


Figura 90. Análisis de capacidad en la oxidación

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 14.312
Límite de control inferior (LCI)	: 12.696
Límite de especificación superior (LES)	: 14.533
Límite de especificación inferior (LEI)	: 12.474
Capacidad (dentro) del Potencial	
Z.Bench	: 3.65
Z.LEI	: 3.82
Z.LES	: 3.82
Cpk	: 1.27
Capacidad General	
Z.Bench	: 2.35
Z.LEI	: 2.60
Z.LES	: 2.60
Ppk	: 0.87

Hollín:

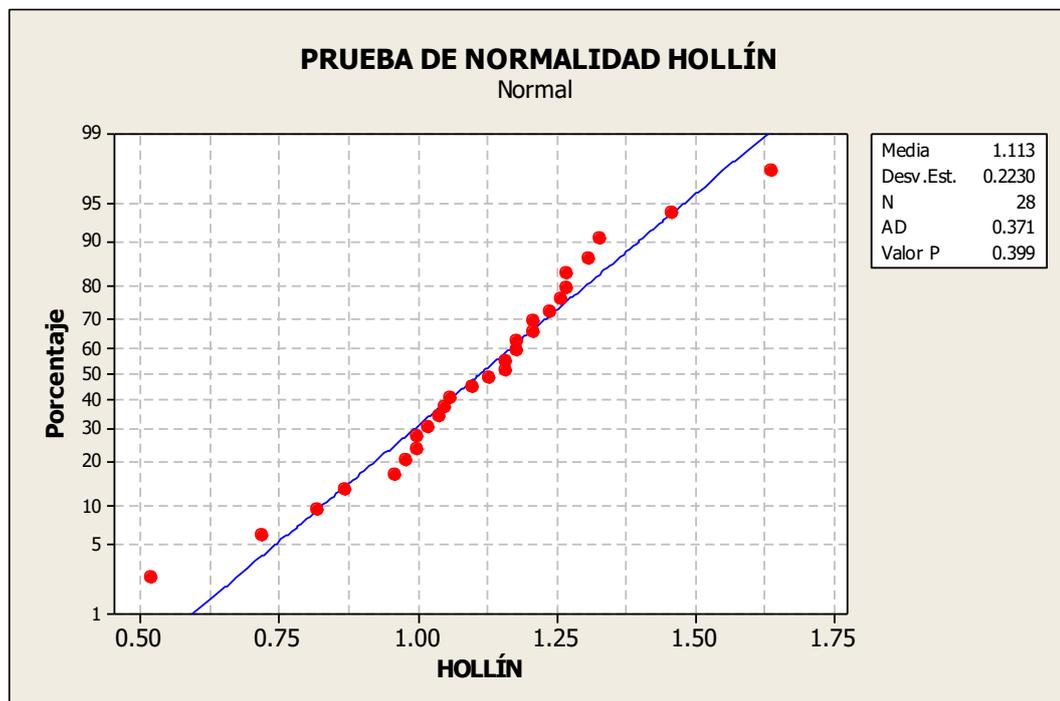


Figura 91. Prueba de normalidad de hollín

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 91* nos da el valor de  $0.399 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

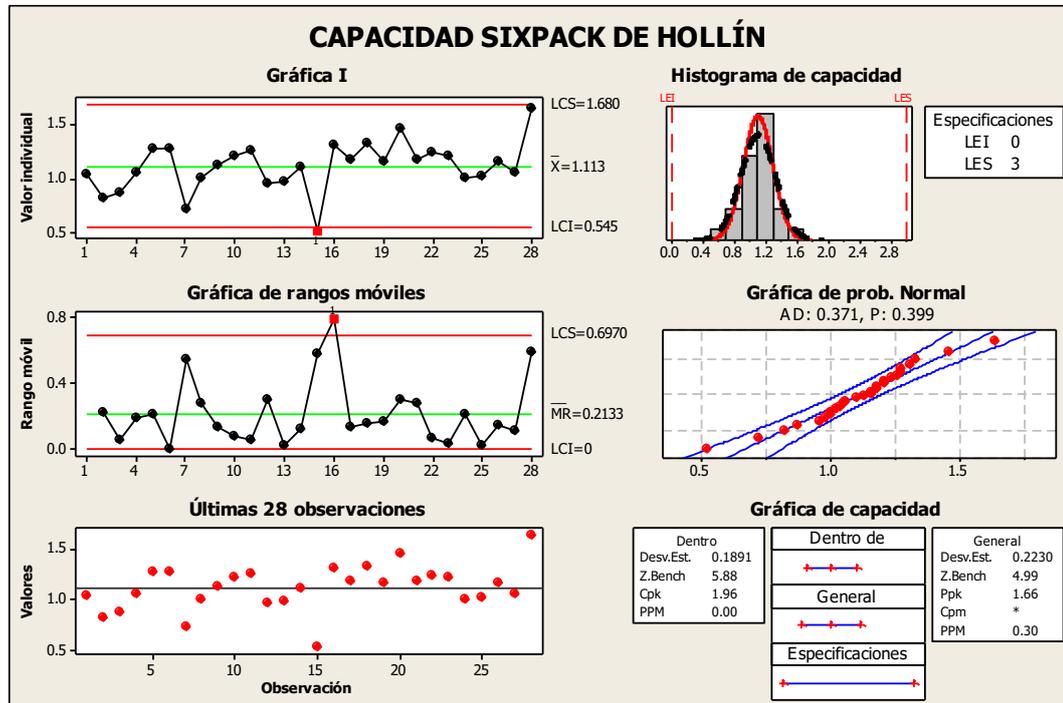


Figura 92. Capacidad sixpack del proceso de hollín

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 92* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 15, fuera de control

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 15, fuera de control

Gráfica de Valores : Observación de valor en el punto 15

P : 0.399

El punto 15 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

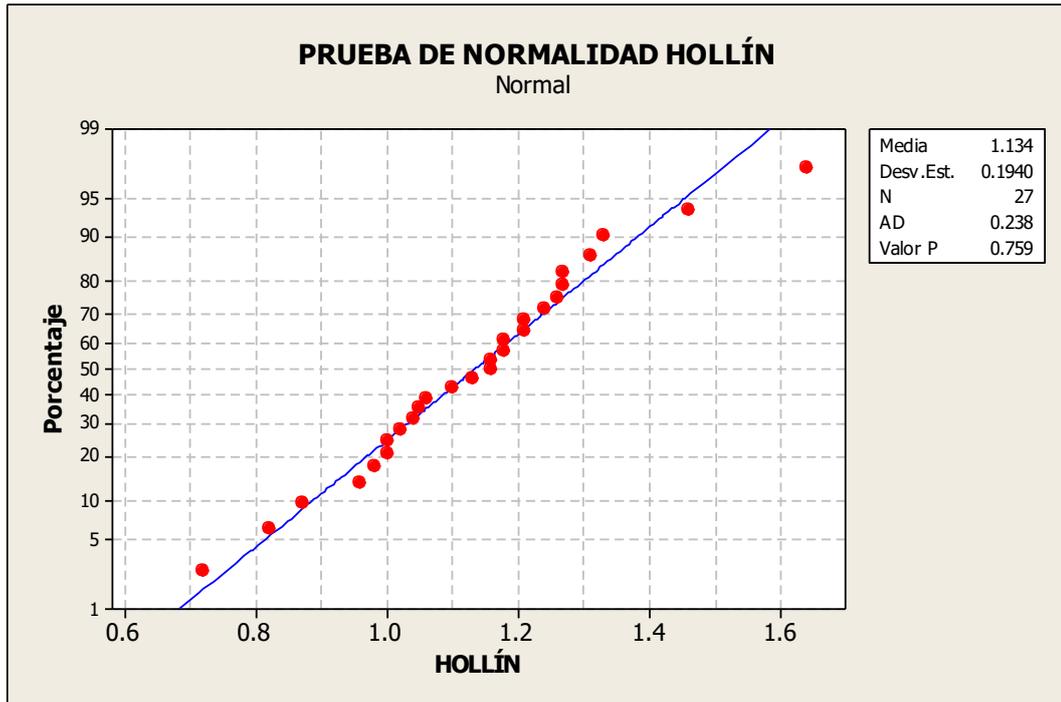


Figura 93. Prueba de normalidad de hollín

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 93* nos da el valor de  $0.759 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

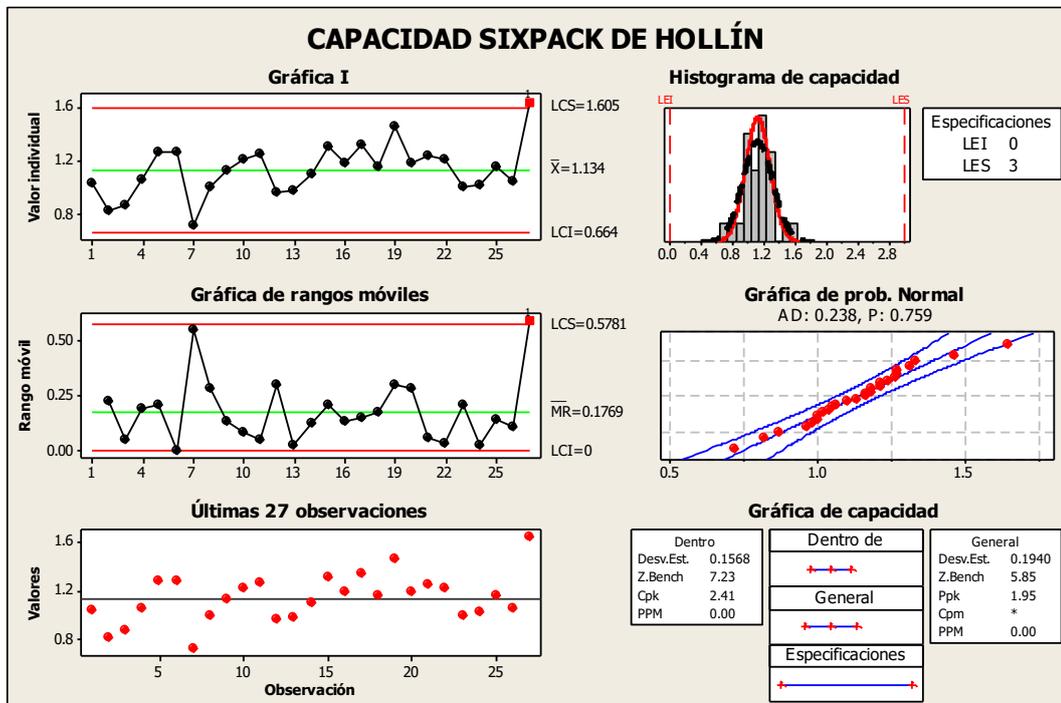


Figura 94. Capacidad sixpack del proceso hollín

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 94* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 27, fuera de control

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 27, fuera de control

Gráfica de Valores : Observación en el punto 27, fuera de control

P : 0.759

El punto 27 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

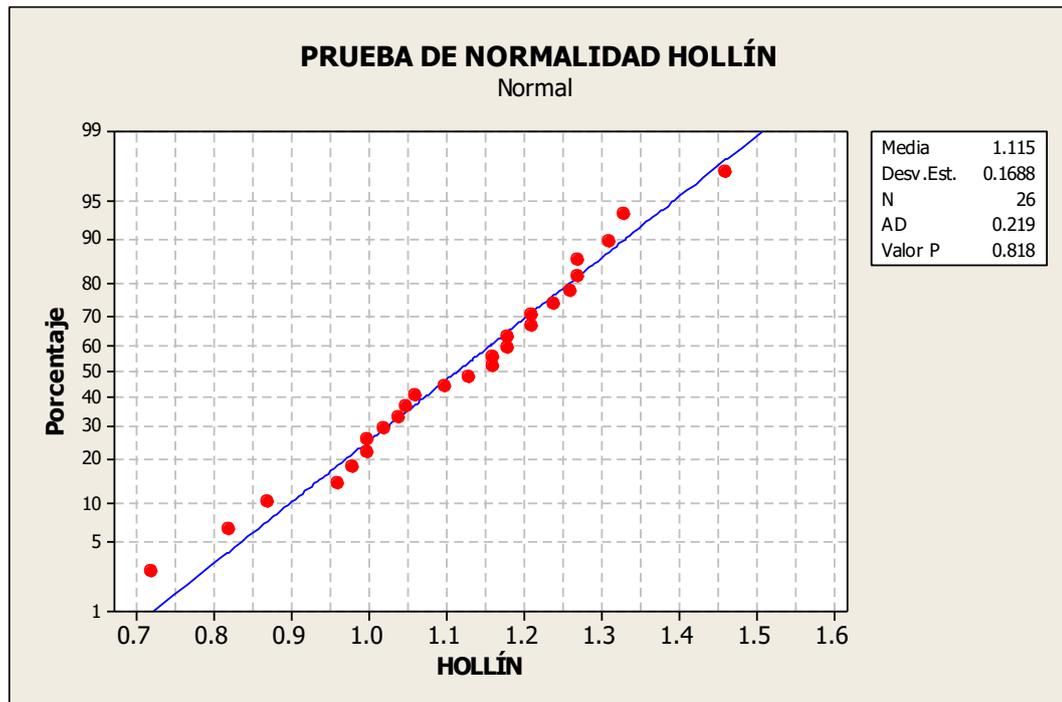


Figura 95. Prueba de normalidad hollín

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 95* nos da el valor de  $0.818 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

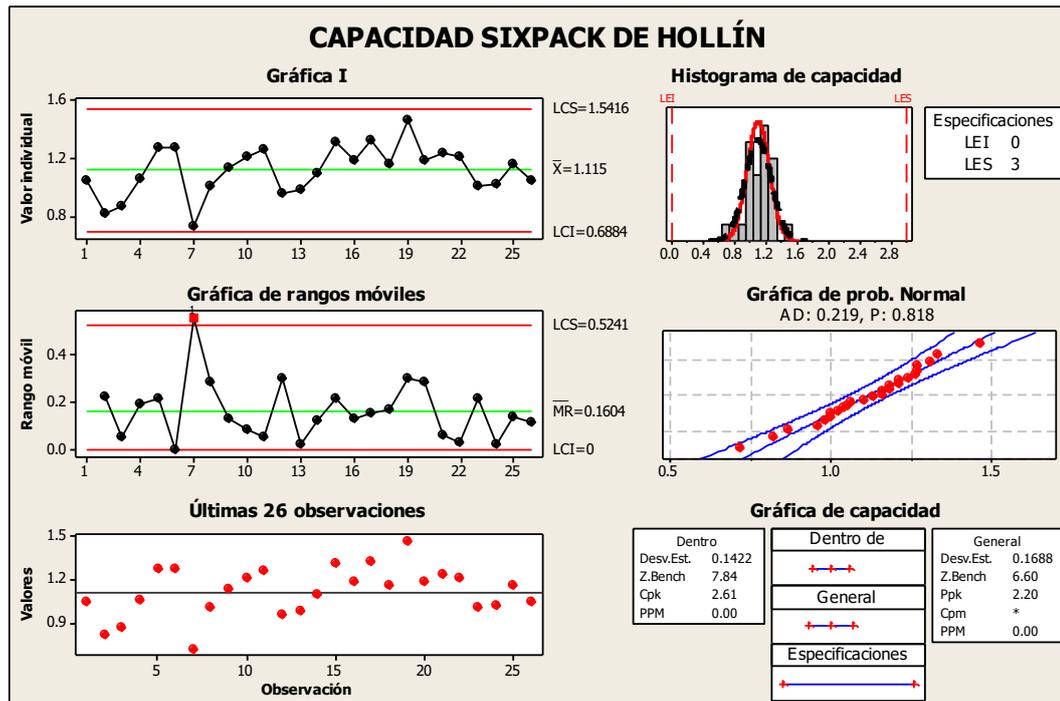


Figura 96. Capacidad sixpack del proceso hollín

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la Figura 96 se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 07, fuera de control

Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control

P : 0.818

El punto 07 en la gráfica de rangos móviles no será asignado como causa asignable, debido a que el valor P es mayor que 0.05, la gráfica I y las últimas 27 observaciones siguen la línea de tendencia, mostrando que no hubo alteración en el motor

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

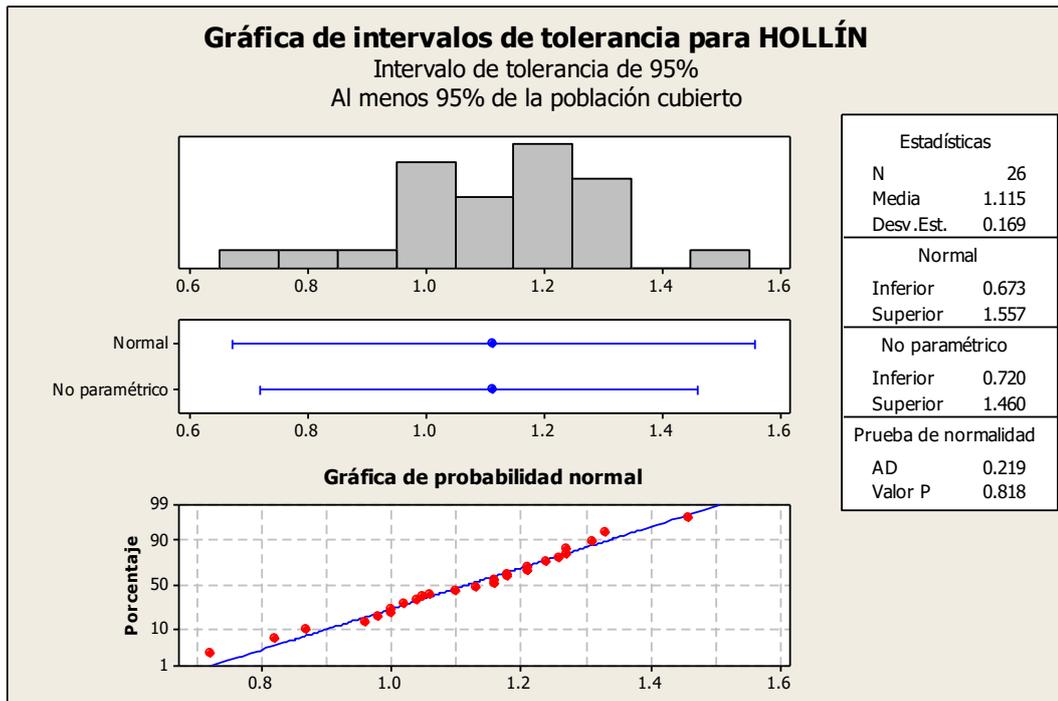


Figura 97. Intervalos de tolerancia para hollín

Fuente: Software Minitab 16

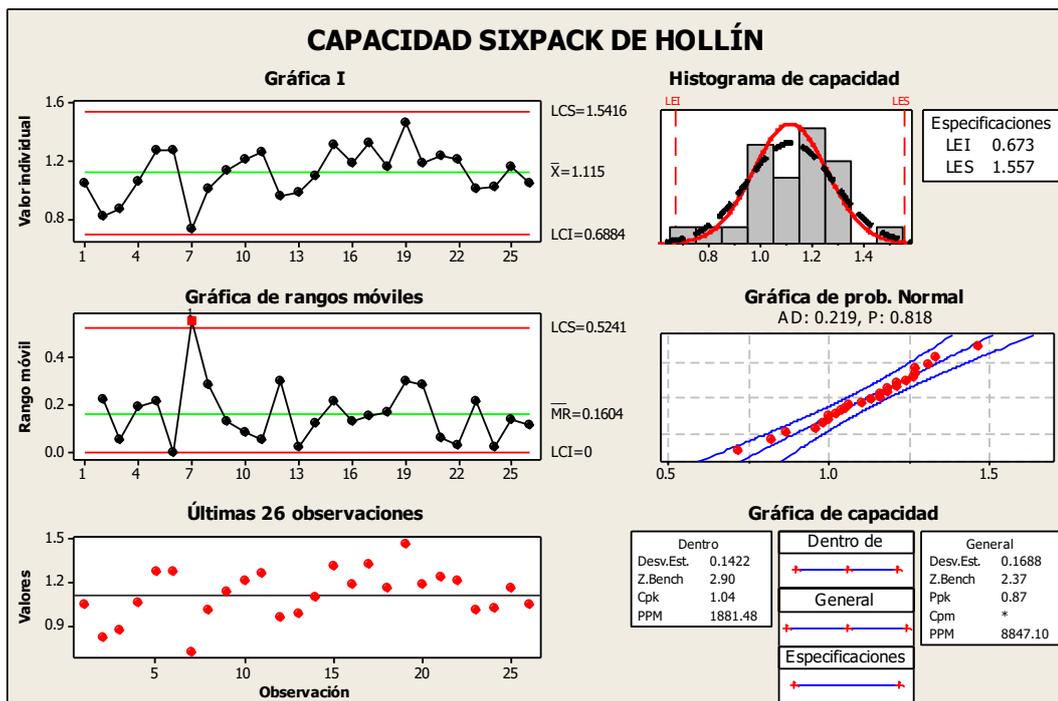


Figura 98. Capacidad sixpack del proceso de hollín

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

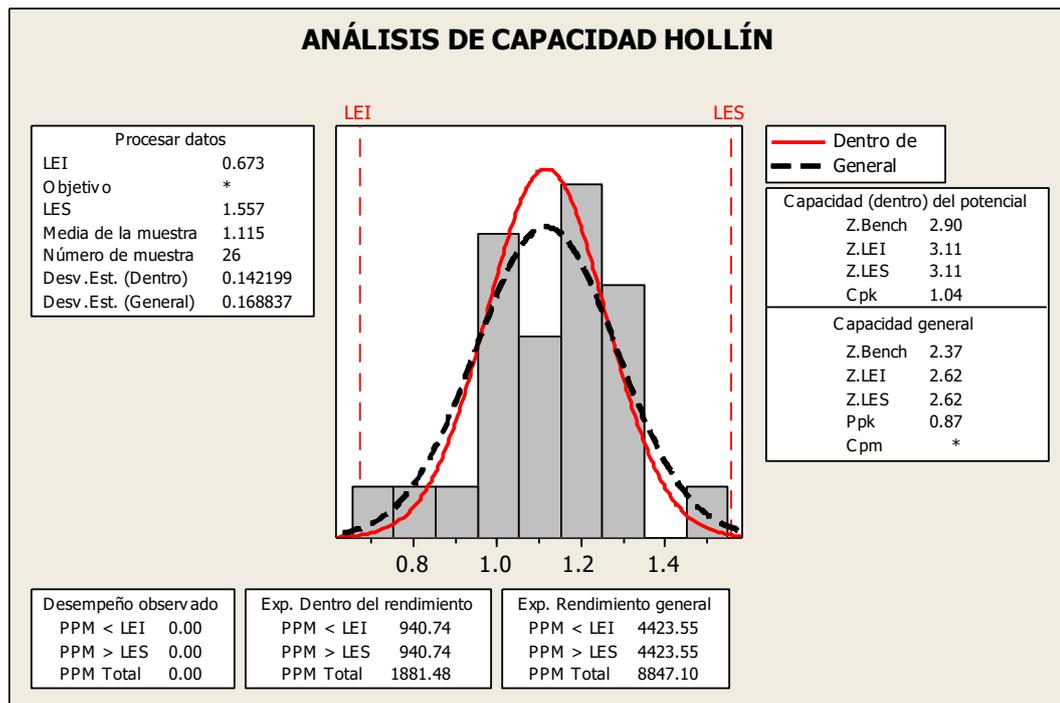


Figura 99. Análisis de capacidad hollín

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 1.5416
Límite de control inferior (LCI)	: 0.6884
Límite de especificación superior (LES)	: 1.557
Límite de especificación inferior (LEI)	: 0.673
<b>Capacidad (dentro) del Potencial</b>	
Z.Bench	: 2.90
Z.LEI	: 3.11
Z.LES	: 3.11
Cpk	: 1.04
<b>Capacidad General</b>	
Z.Bench	: 2.37
Z.LEI	: 2.62
Z.LES	: 2.62
Ppk	: 0.87

Sulfatación:

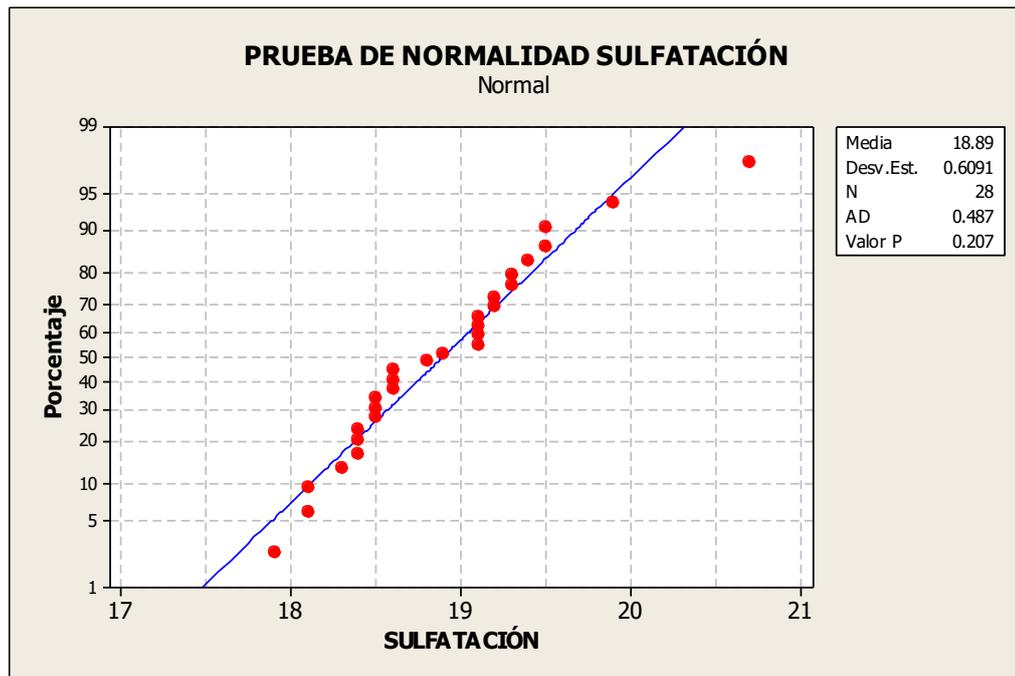


Figura 100. Prueba de normalidad sulfatación

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 100* nos da el valor de  $0.207 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

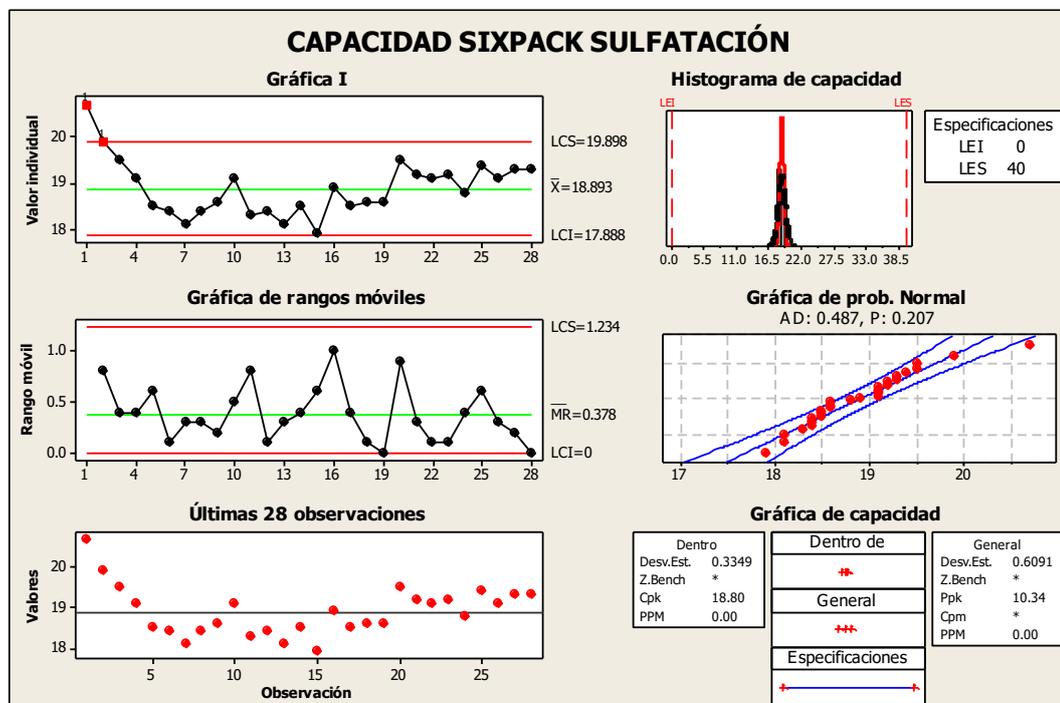


Figura 101. Capacidad sixpack de proceso sulfatación

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 101* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en los puntos 01 y 02, fuera de control

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : Observación de valores en el punto 01

P : 0.207

Los puntos 01 y 02 serán asignados como causas asignables, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

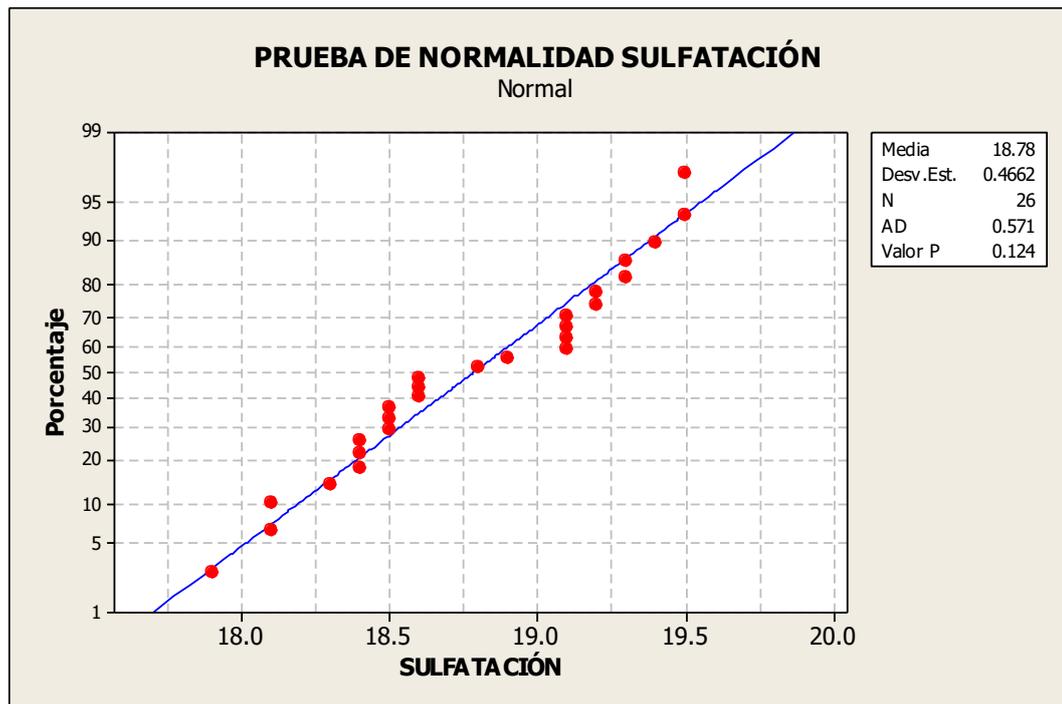


Figura 102. Prueba de normalidad sulfatación

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 102* nos da el valor de  $0.124 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

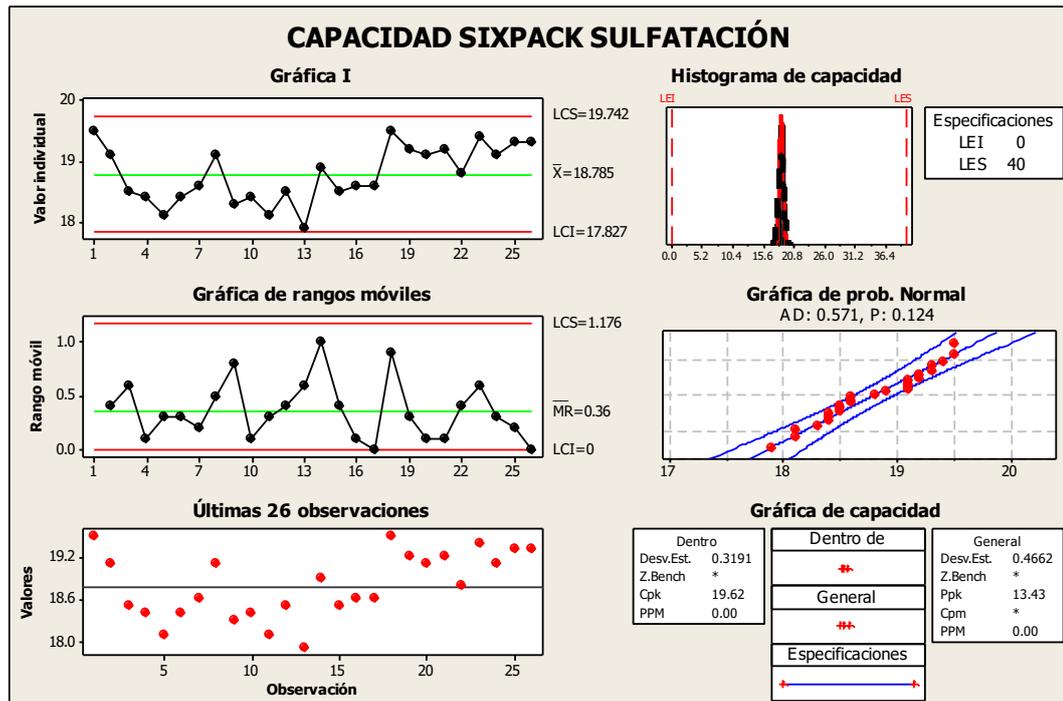


Figura 103. Capacidad sixpack del proceso sulfatación

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 103* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control

P : 0.124

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

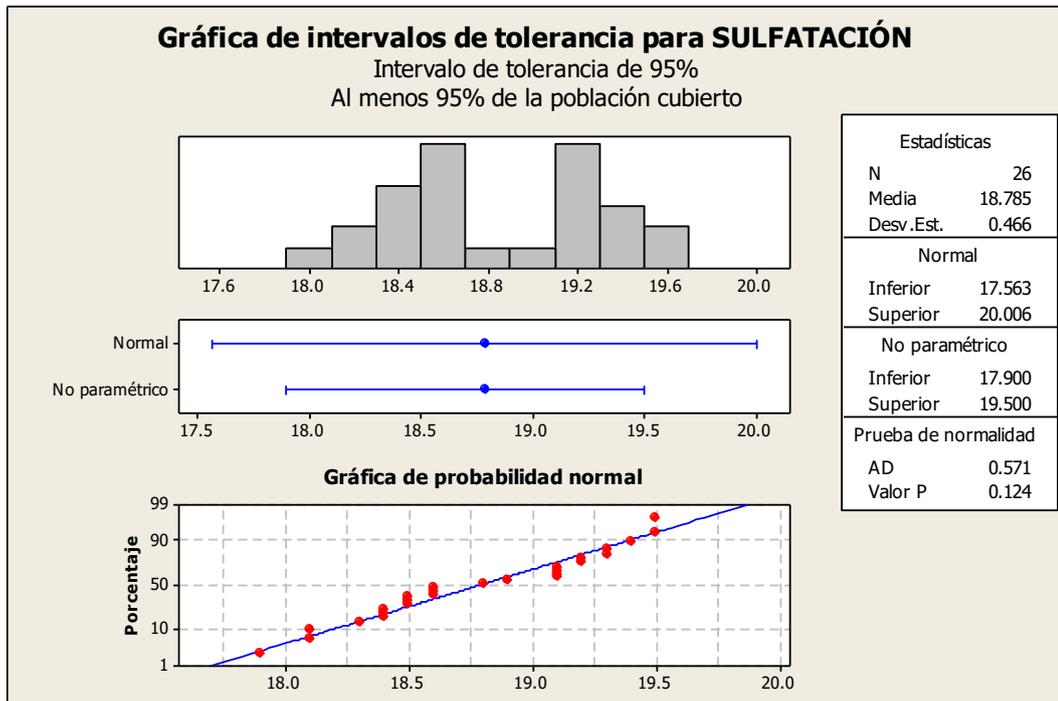


Figura 104. Intervalos de tolerancia sulfatación

Fuente: Software Minitab 16

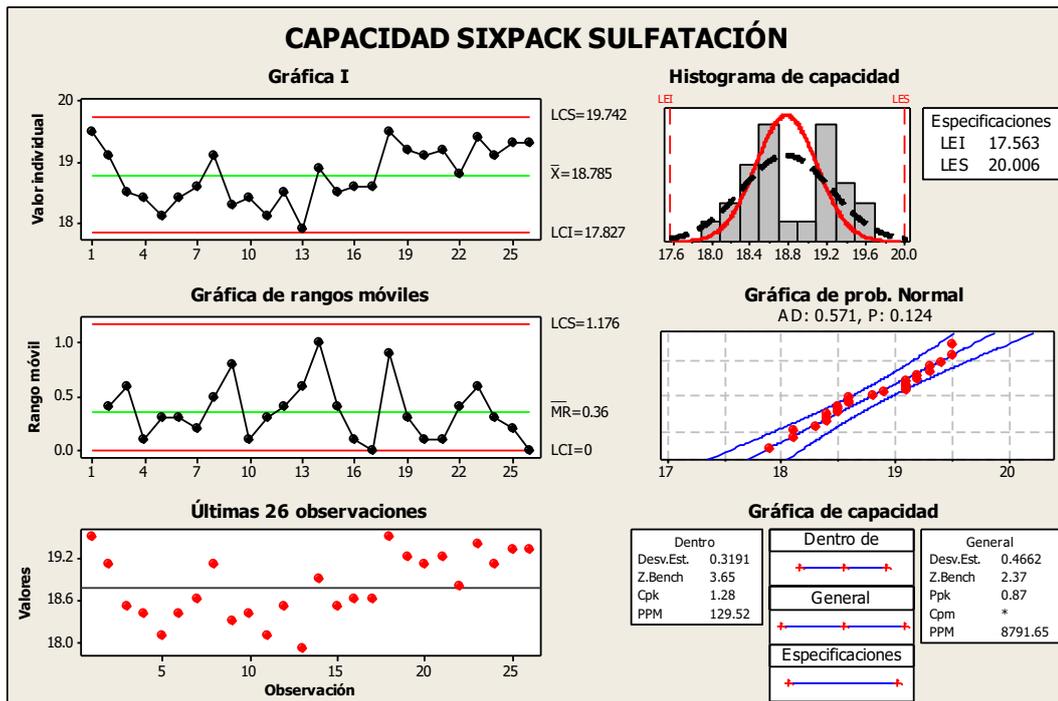


Figura 105. Capacidad sixpack del proceso sulfatación

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

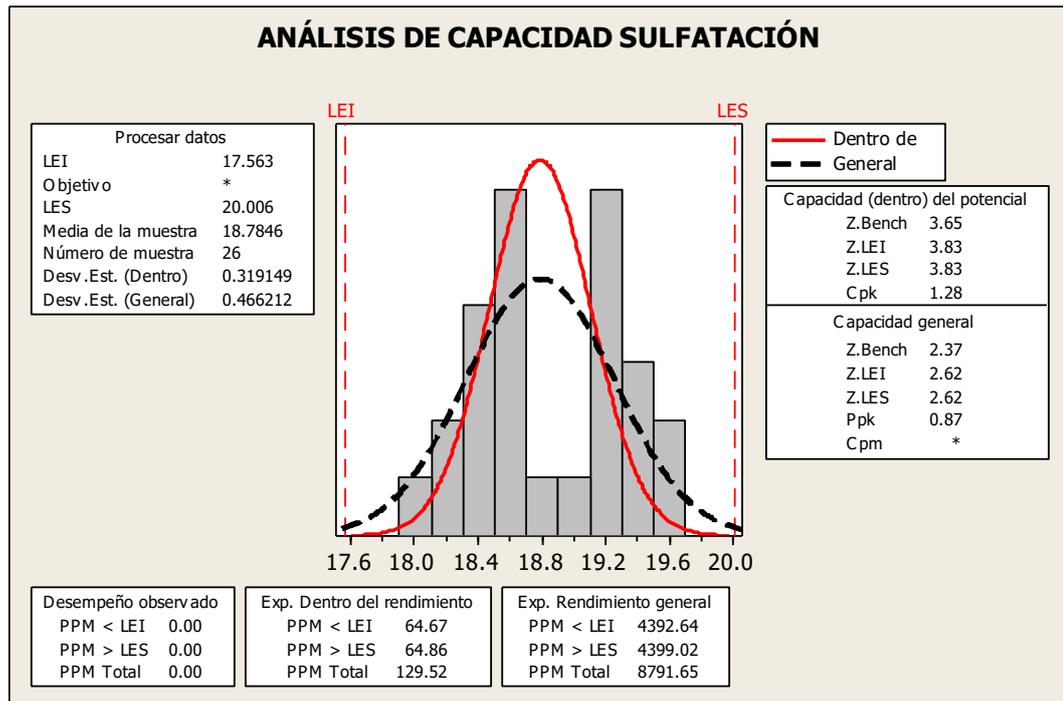


Figura 106. Análisis de capacidad en la sulfatación

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 19.742
Límite de control inferior (LCI)	: 17.827
Límite de especificación superior (LES)	: 20.006
Límite de especificación inferior (LEI)	: 17.563
<b>Capacidad (dentro) del Potencial</b>	
Z.Bench	: 3.65
Z.LEI	: 3.83
Z.LES	: 3.83
Cpk	: 1.28
<b>Capacidad General</b>	
Z.Bench	: 2.37
Z.LEI	: 2.62
Z.LES	: 2.62
Ppk	: 0.87

TBN:

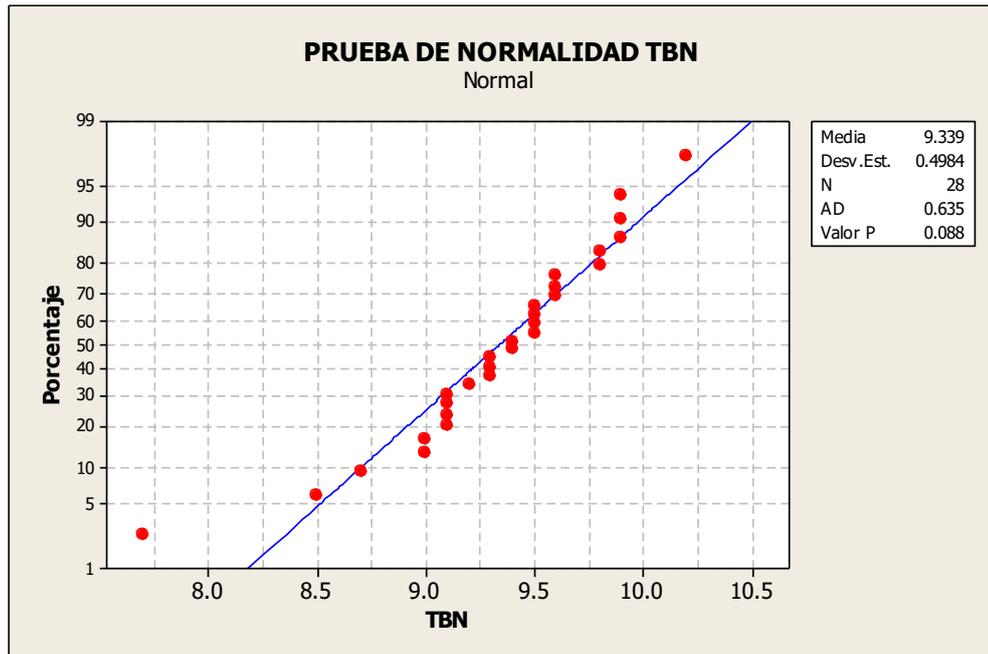


Figura 107. Prueba de normalidad TBN

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 107* nos da el valor de  $0.088 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

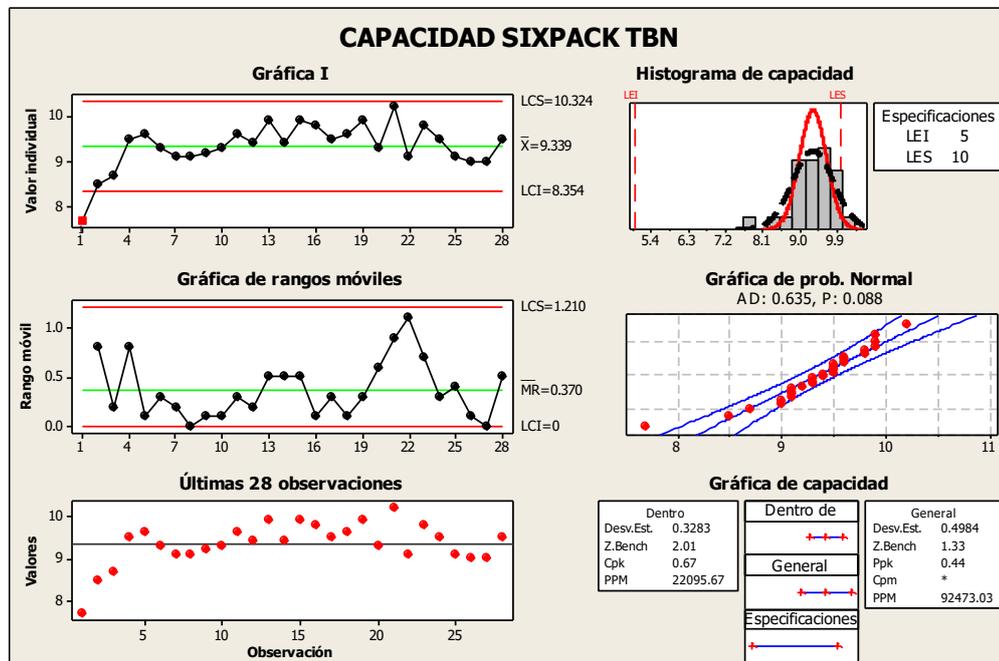


Figura 108. Capacidad sixpack de TBN

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 108* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 01, fuera de control

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 01, fuera de control

Gráfica de Valores : Observación de valor en el punto 01

P : 0.088

El punto 23 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

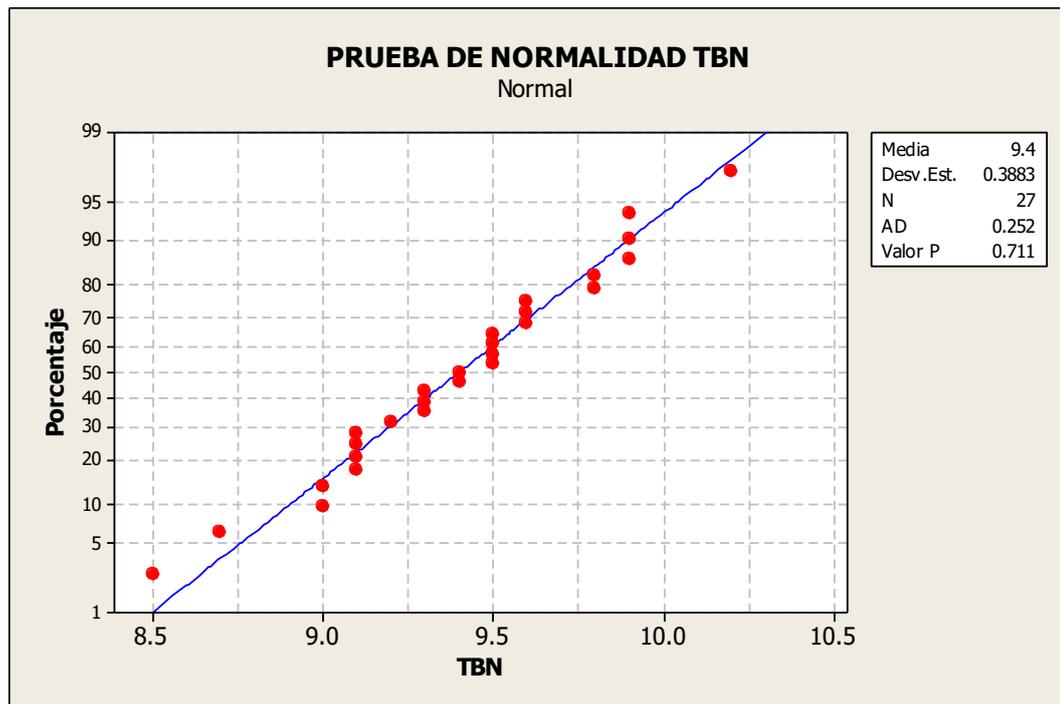


Figura 109. Prueba de normalidad TBN

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 109* nos da el valor de  $0.711 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

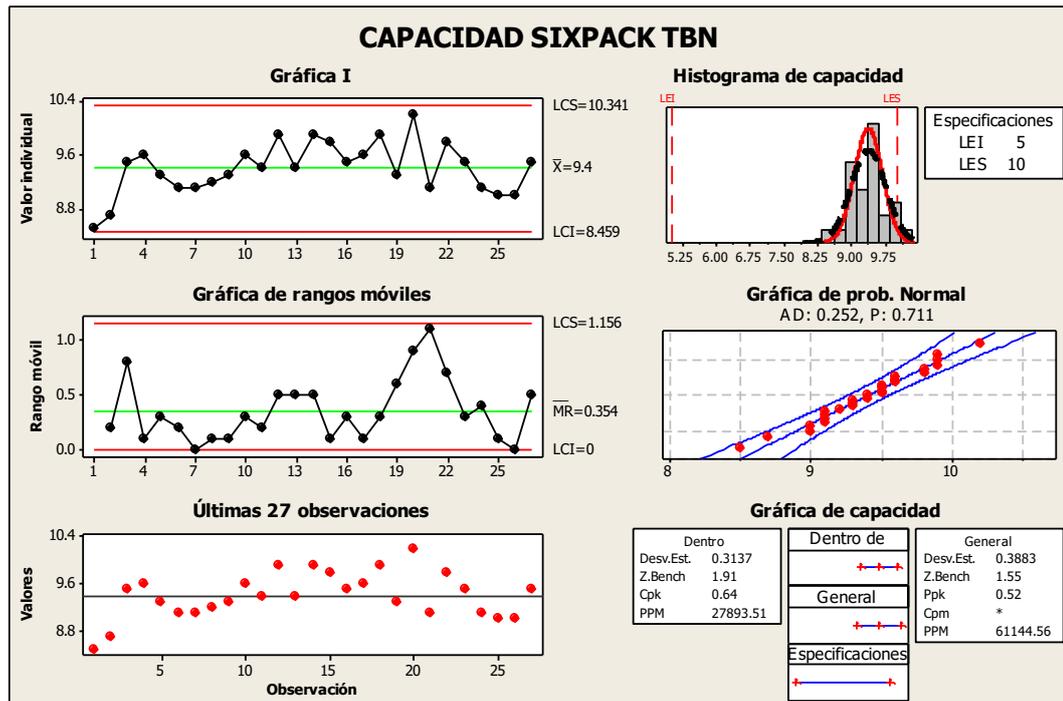


Figura 110. Capacidad sixpack del proceso TBN

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 110* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control

P : 0.711

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

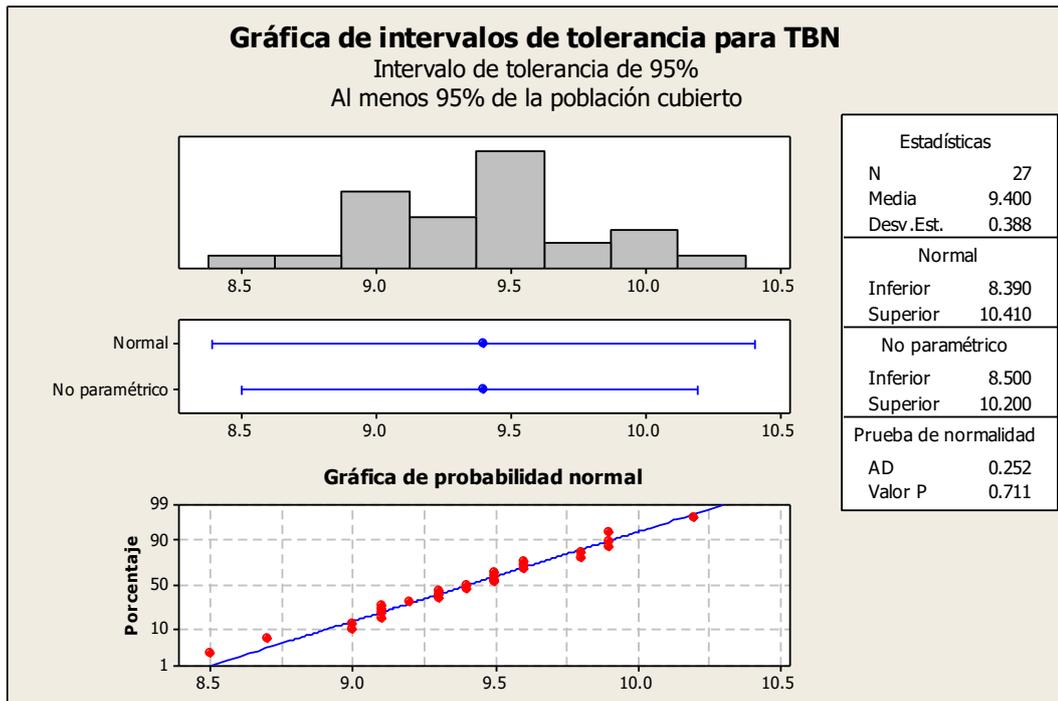


Figura 111. Intervalos de tolerancia para TBN

Fuente: Software Minitab 16

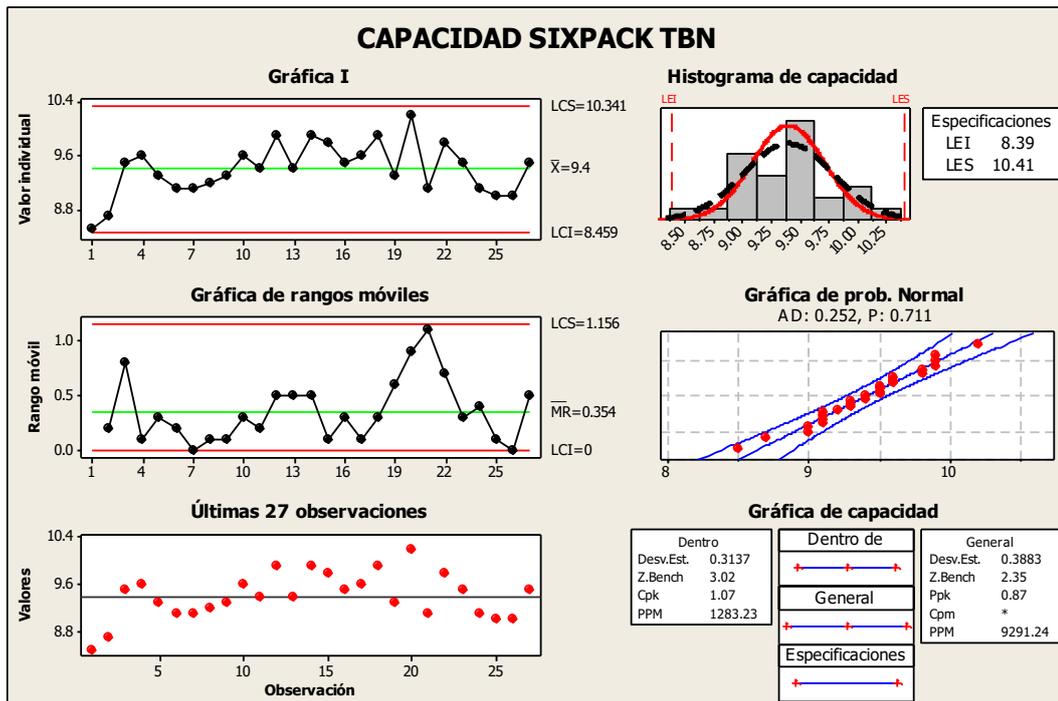


Figura 112. Capacidad sixpack del proceso de TBN

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado

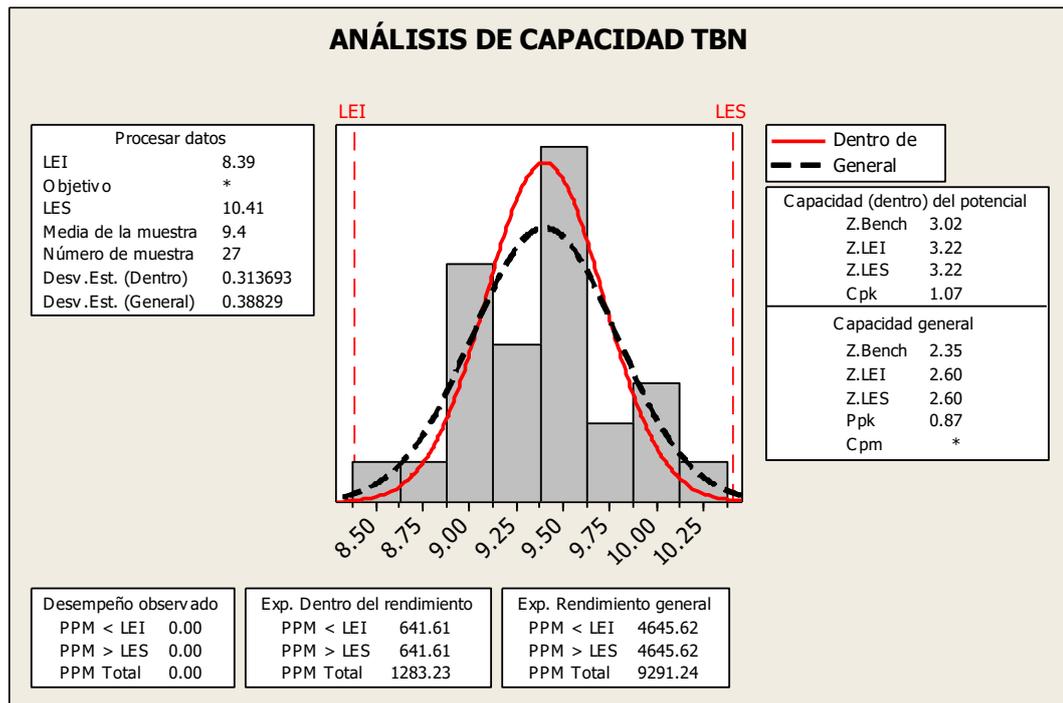


Figura 113. Análisis de capacidad TBN

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 10.341
Límite de control inferior (LCI)	: 8.459
Límite de especificación superior (LES)	: 10.41
Límite de especificación inferior (LEI)	: 8.39
<b>Capacidad (dentro) del Potencial</b>	
Z.Bench	: 3.02
Z.LEI	: 3.22
Z.LES	: 3.22
Cpk	: 1.07
<b>Capacidad General</b>	
Z.Bench	: 2.35
Z.LEI	: 2.60
Z.LES	: 2.60
Ppk	: 0.87

## ANEXO 15

### ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE PROCESO EN RESULTADOS OBTENIDOS DE ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ATÓMICA

Desgaste de Hierro (Fe)

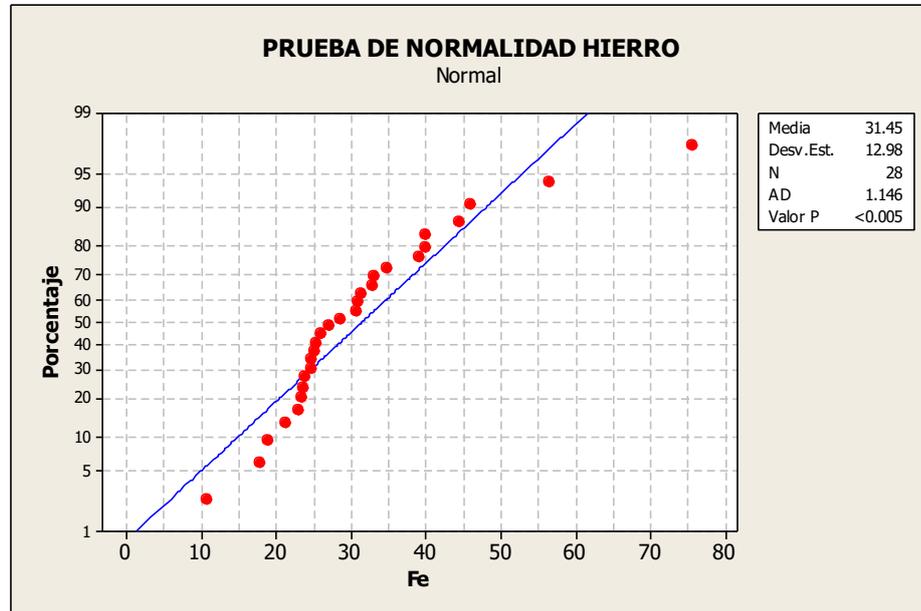


Figura 114. Prueba de normalidad del desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 114* nos da el valor de  $0.005 < P < 0.05$ , nos indica que nuestros datos no siguen una distribución normal.

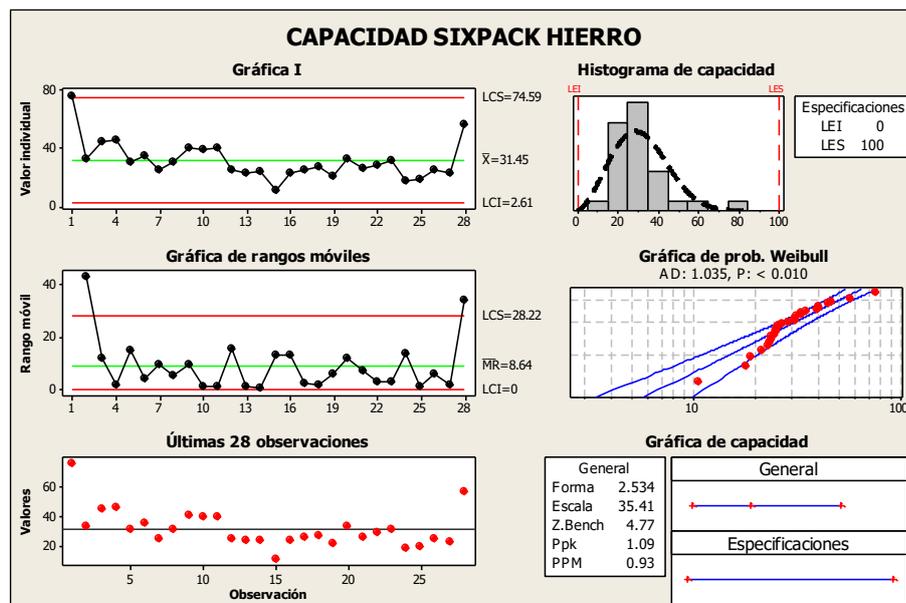


Figura 115. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 115* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 01, fuera de control

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en los puntos 01 y 28, fuera de control

Gráfica de Valores : Observación de valores en los puntos 01 y 28

P :  $<0.005$

Los puntos 01 y 28 serán asignados como causas asignables, se realizarán los ajustes de acuerdo a nuevas especificaciones.

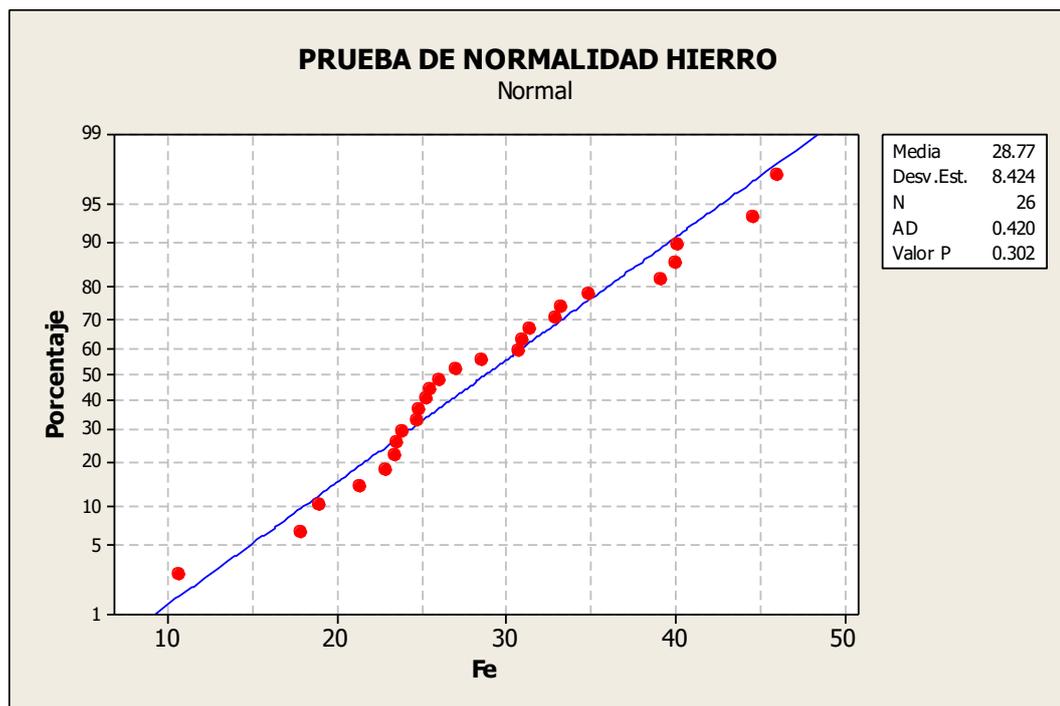


Figura 116. Prueba de normalidad del desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 116* nos da el valor de  $0.302 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

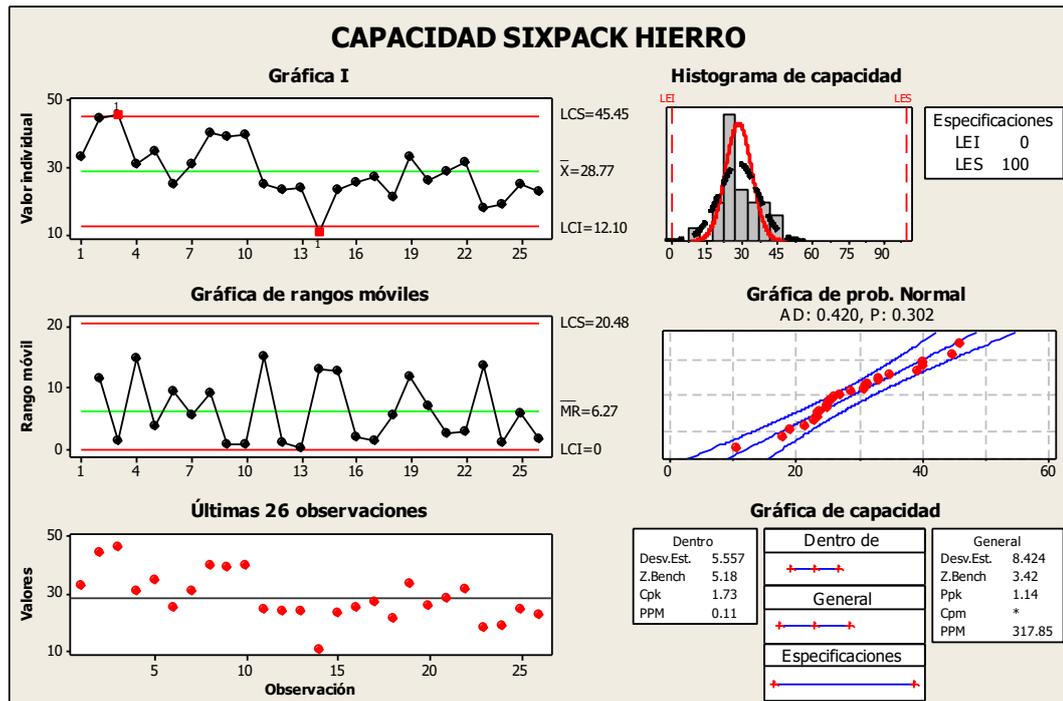


Figura 117. Capacidad sixpack del proceso de desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 117* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en los puntos 03 y 14, fuera de control.

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : Observación de valores en los puntos 03 y 14.

P : 0.302

Los puntos 03 y 14 serán asignados como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

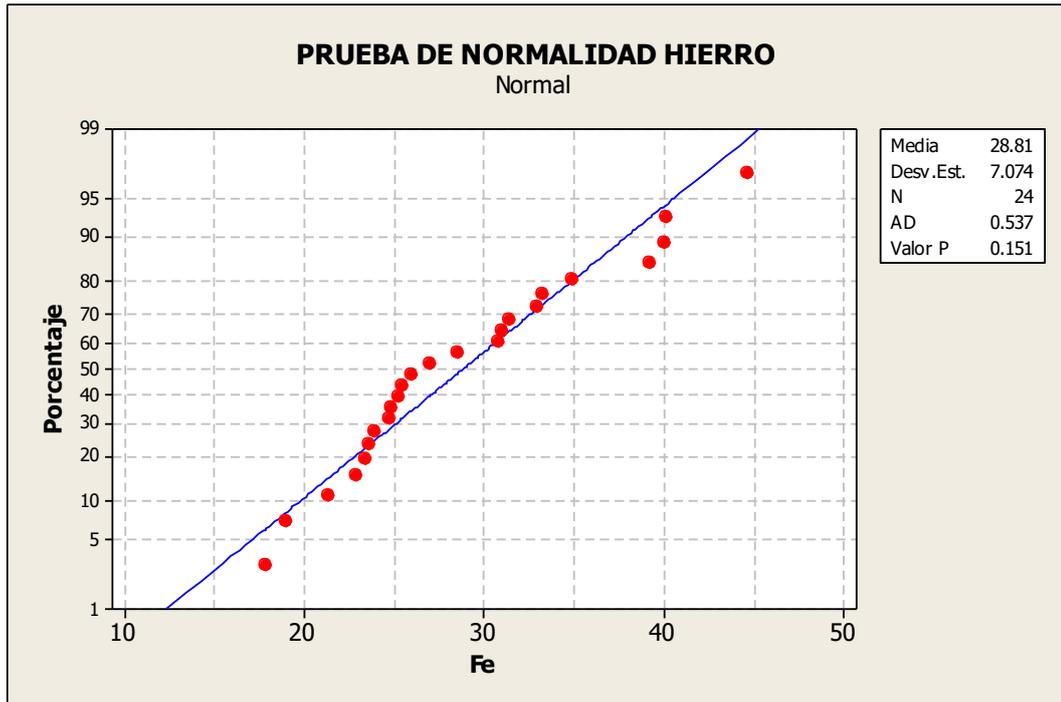


Figura 118. Prueba de normalidad del desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 118* nos da el valor de  $0.151 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

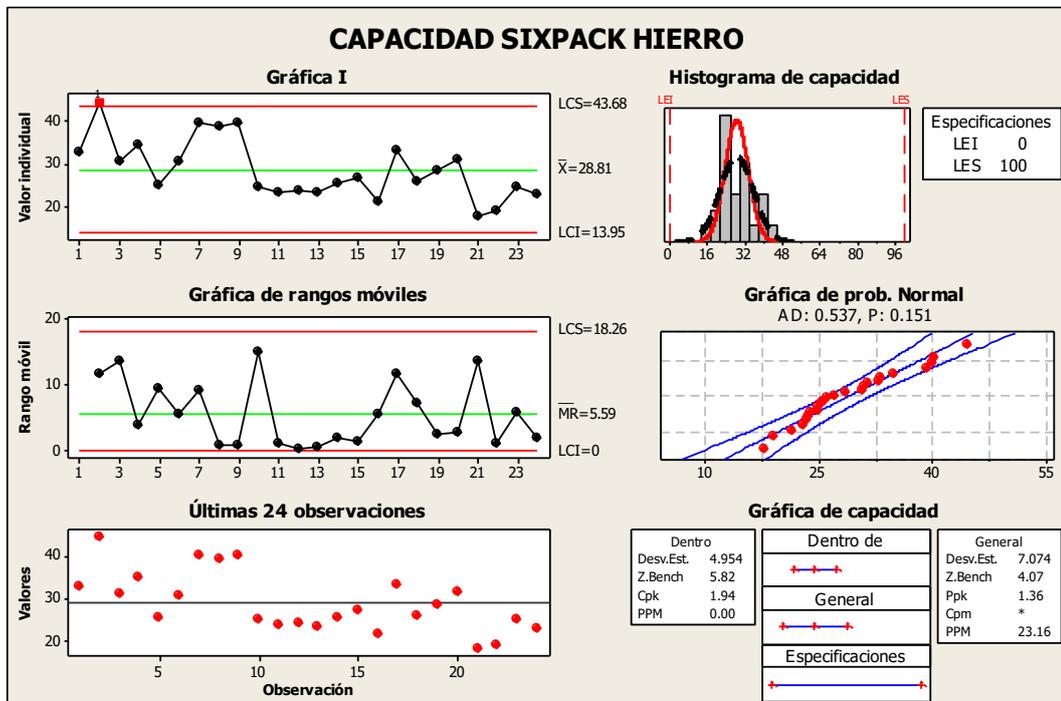


Figura 119. Capacidad sixpack de proceso de desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 119* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 02, fuera de control.

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : Observación de valor en el punto 02

P : 0.151

El punto 23 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

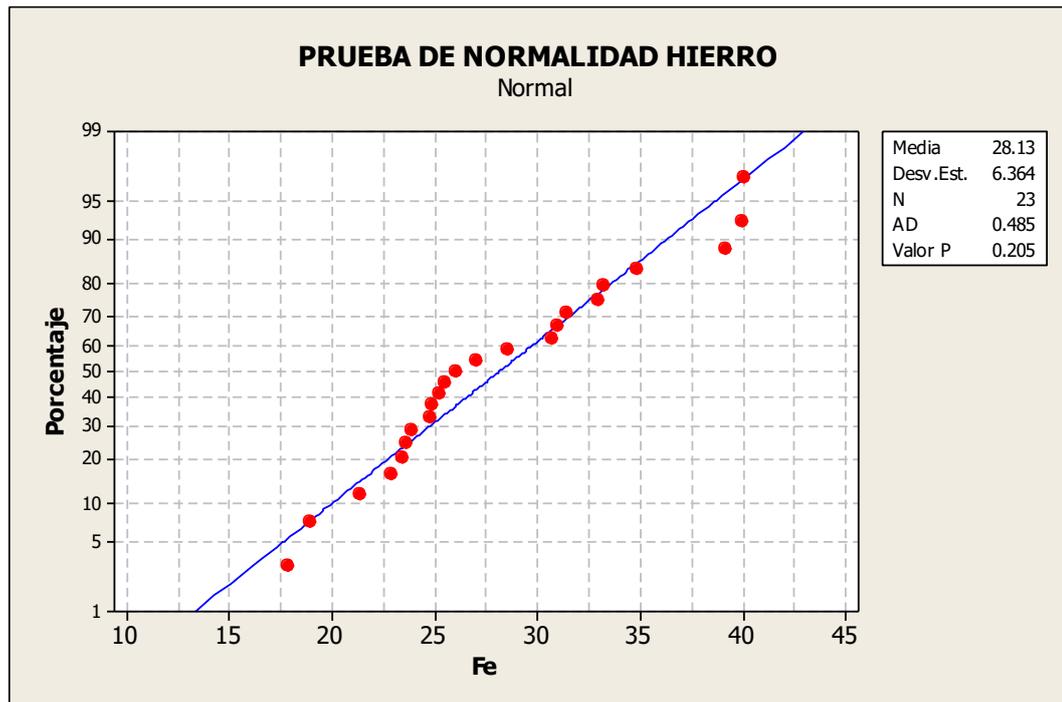


Figura 120. Prueba de normalidad del desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 120* nos da el valor de  $0.205 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

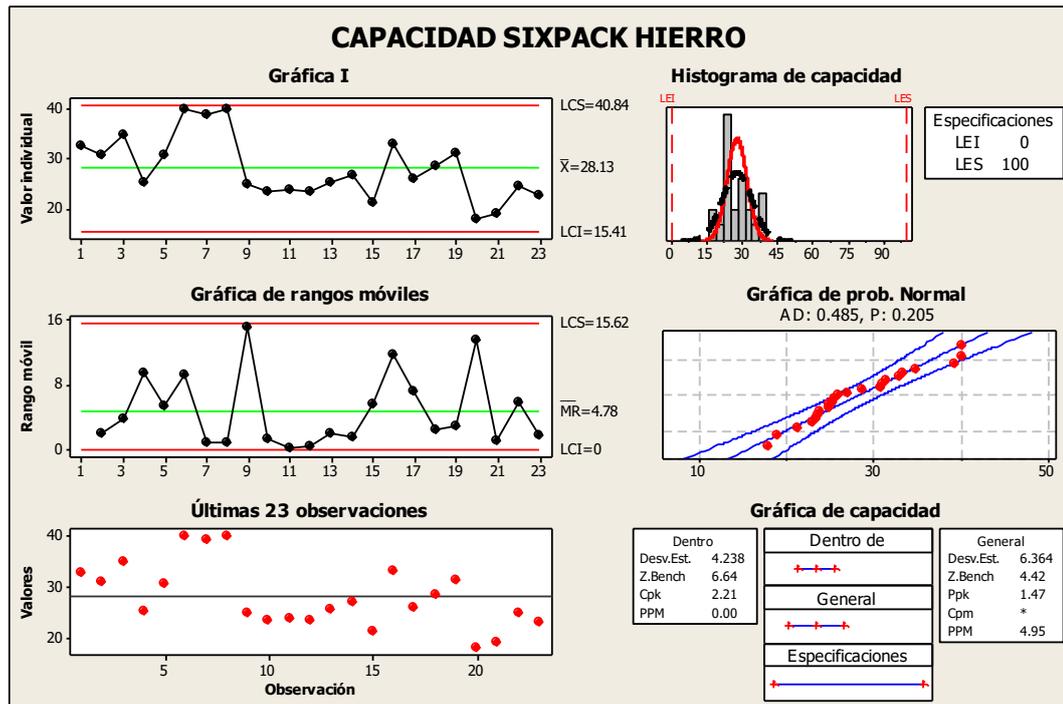


Figura 121. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 121* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control

P : 0.205

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

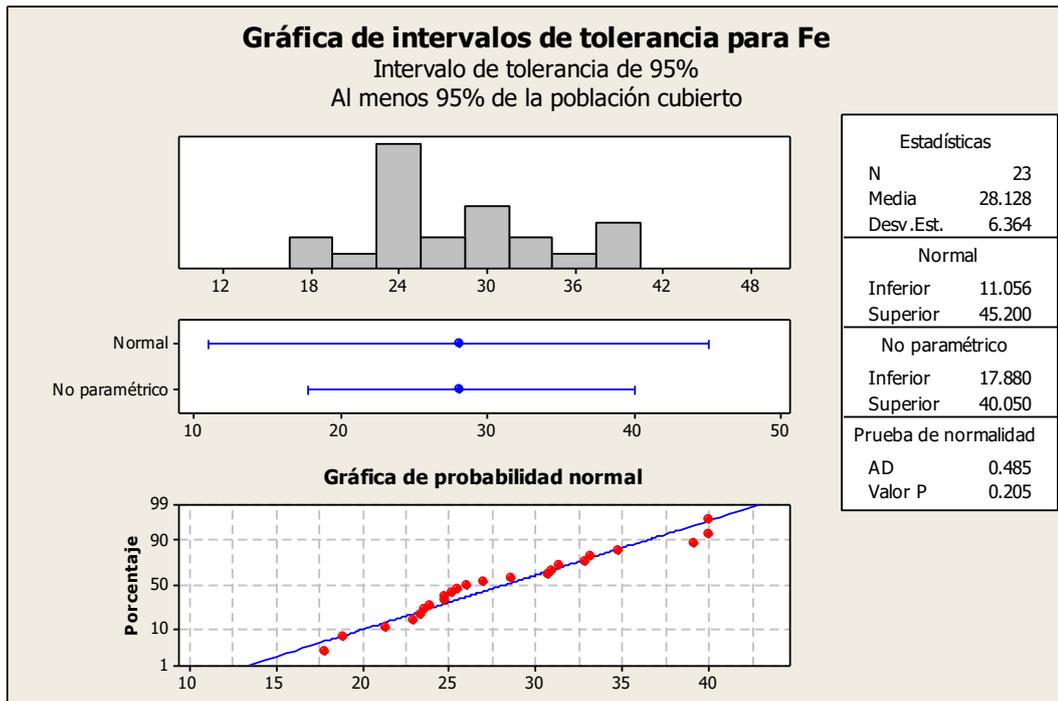


Figura 122. Intervalos de tolerancia para desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

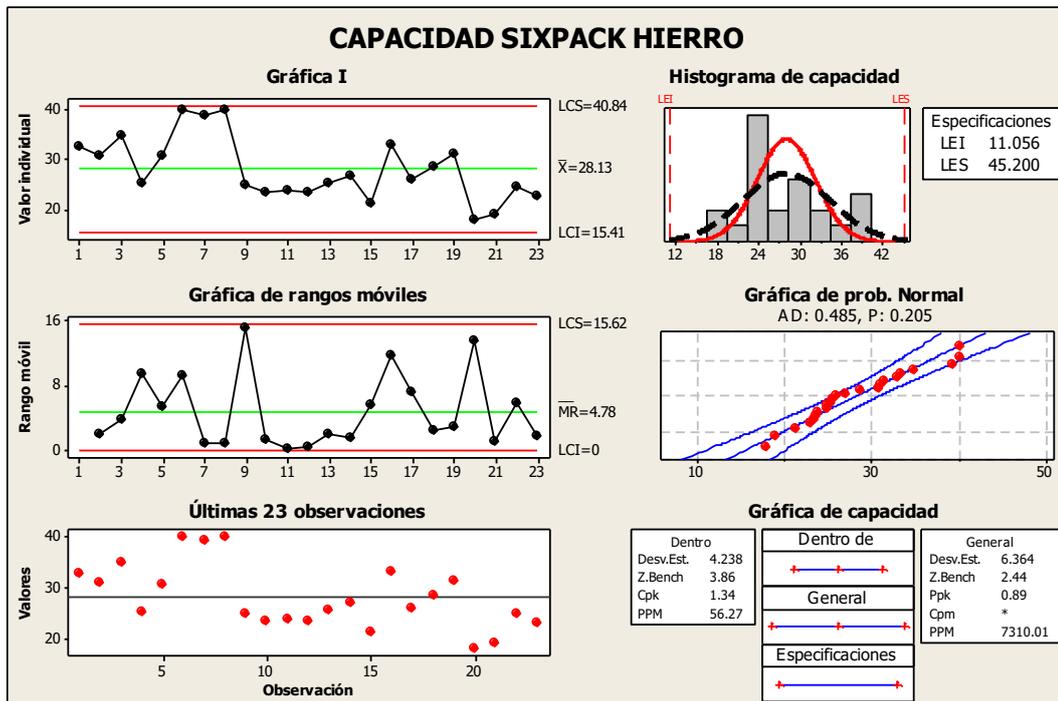


Figura 123. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

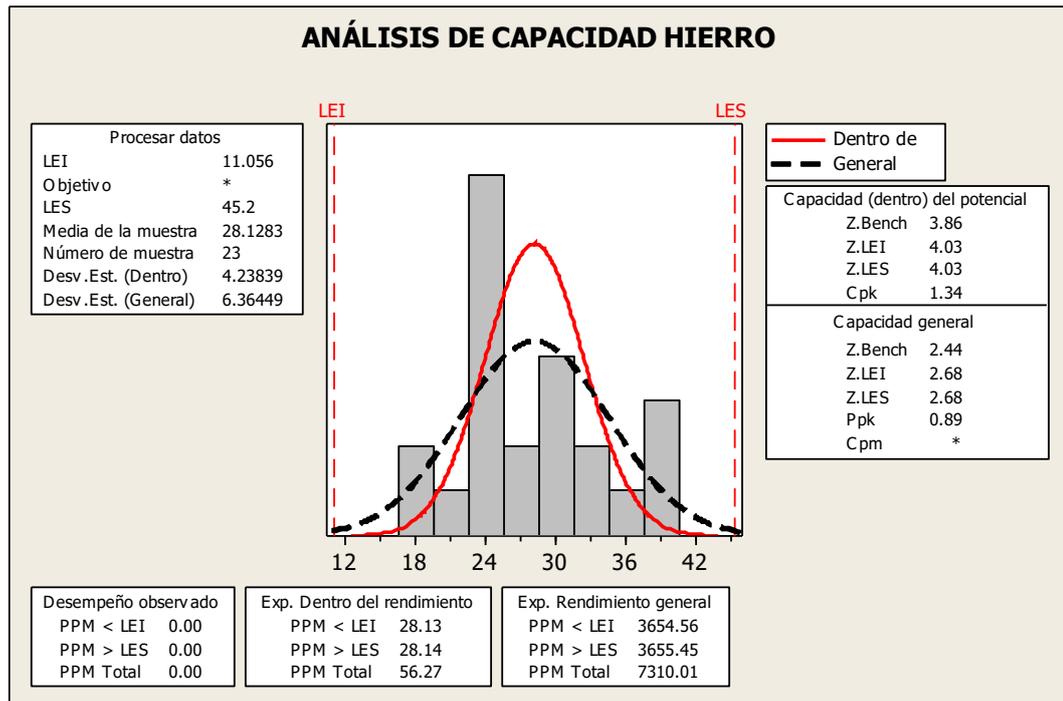


Figura 124. Análisis de capacidad en el desgaste de hierro

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 40.84
Límite de control inferior (LCI)	: 15.41
Límite de especificación superior (LES)	: 45.2
Límite de especificación inferior (LEI)	: 11.056
<b>Capacidad (dentro) del Potencial</b>	
Z.Bench	: 3.86
Z.LEI	: 4.03
Z.LES	: 4.03
Cpk	: 1.34
<b>Capacidad General</b>	
Z.Bench	: 2.44
Z.LEI	: 2.68
Z.LES	: 2.68
Ppk	: 0.89

### Desgaste de Cobre (Cu)

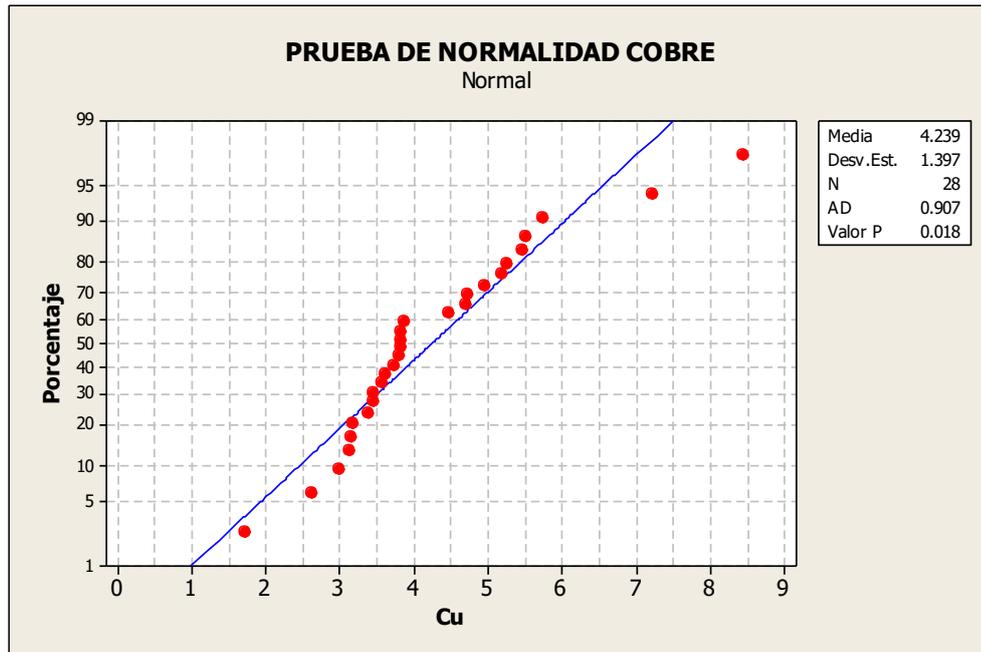


Figura 125. Prueba de normalidad del desgaste de cobre

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 125* nos da el valor de  $0.05 > P > 0.018$ , nos indica que nuestros datos no siguen una distribución normal.

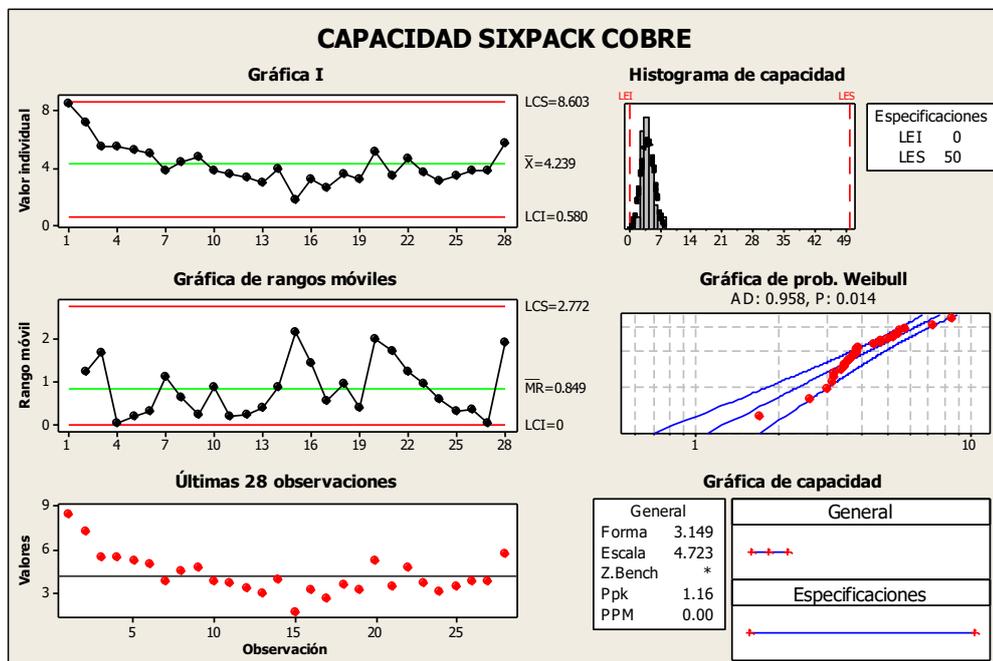


Figura 126. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cobre

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 126* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control, con variación notable en rangos móviles.

Gráfica de Valores P : Datos dentro de los límites de control

P : 0.018

Los puntos 01 y 02 serán asignados como causas asignables, debido a que en la *Figura 125* nos muestra dos puntos alejados de la línea de normalidad los cuales son los puntos 01 y 02, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

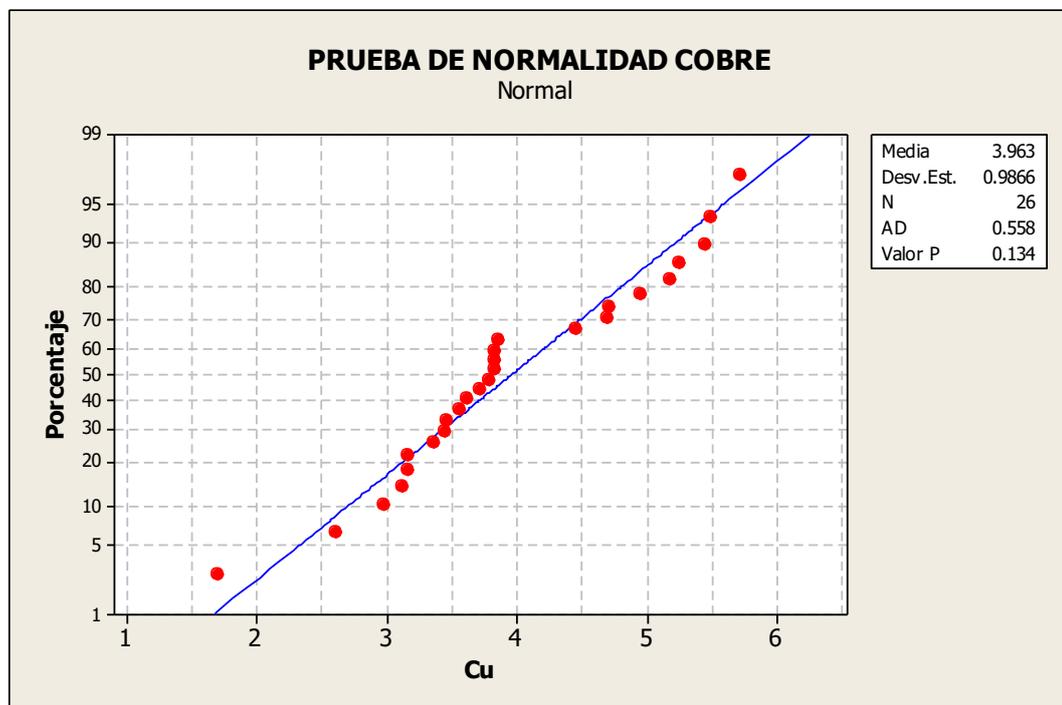


Figura 127. Prueba de normalidad del desgaste de cobre

Fuente: Software Minitab 16

De la Figura 127 nos da el valor de  $0.134 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

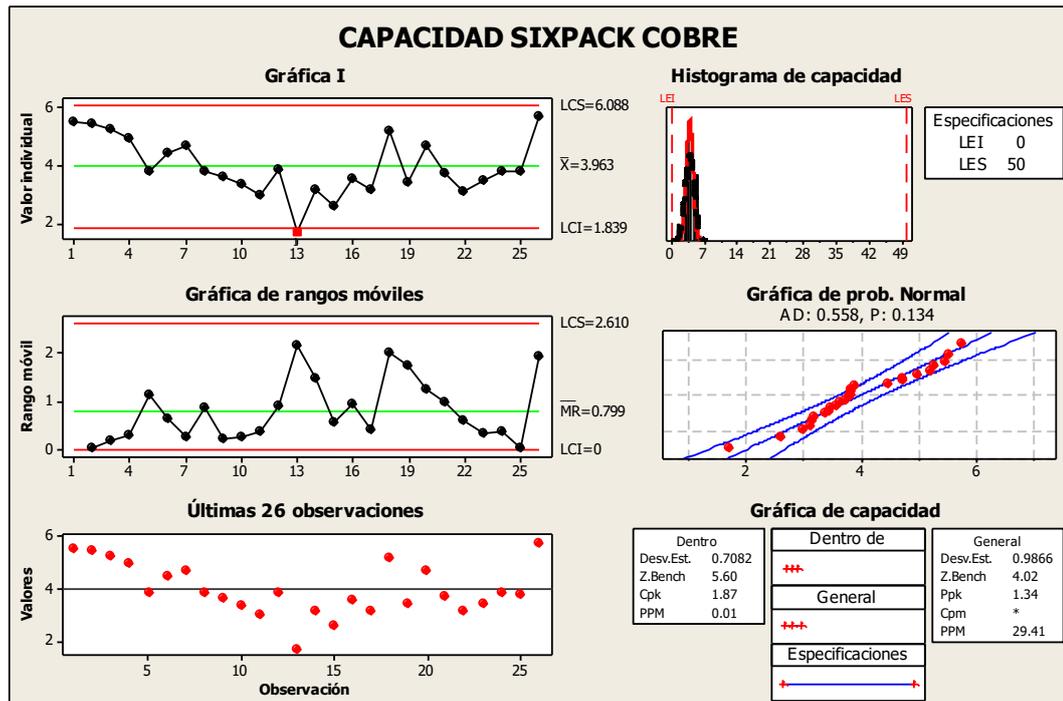


Figura 128. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cobre

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 128* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 13, fuera de control.

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control

P : 0.134

Se sugiere el punto 13 para ser tomado como causa asignable, en la gráfica de rangos móviles de la *Figura 128* hay una variación notable entre los rangos, se necesitarán más análisis de muestras para estabilizar las tendencias. El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

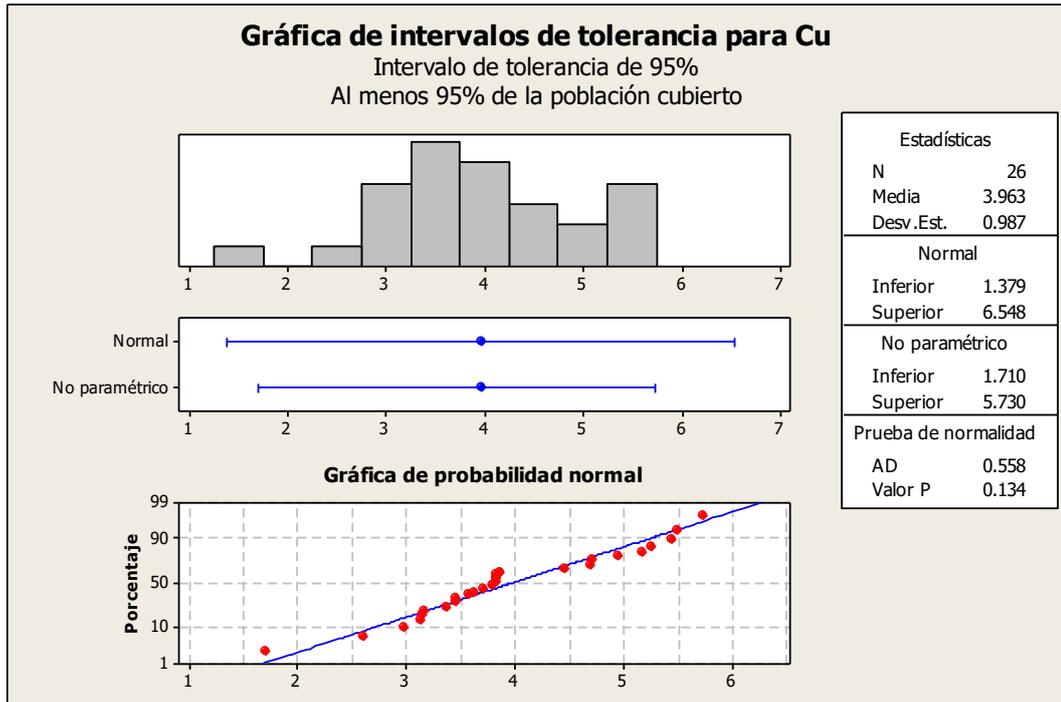


Figura 129. Intervalos de tolerancia para desgaste de cobre

Fuente: Software Minitab 16

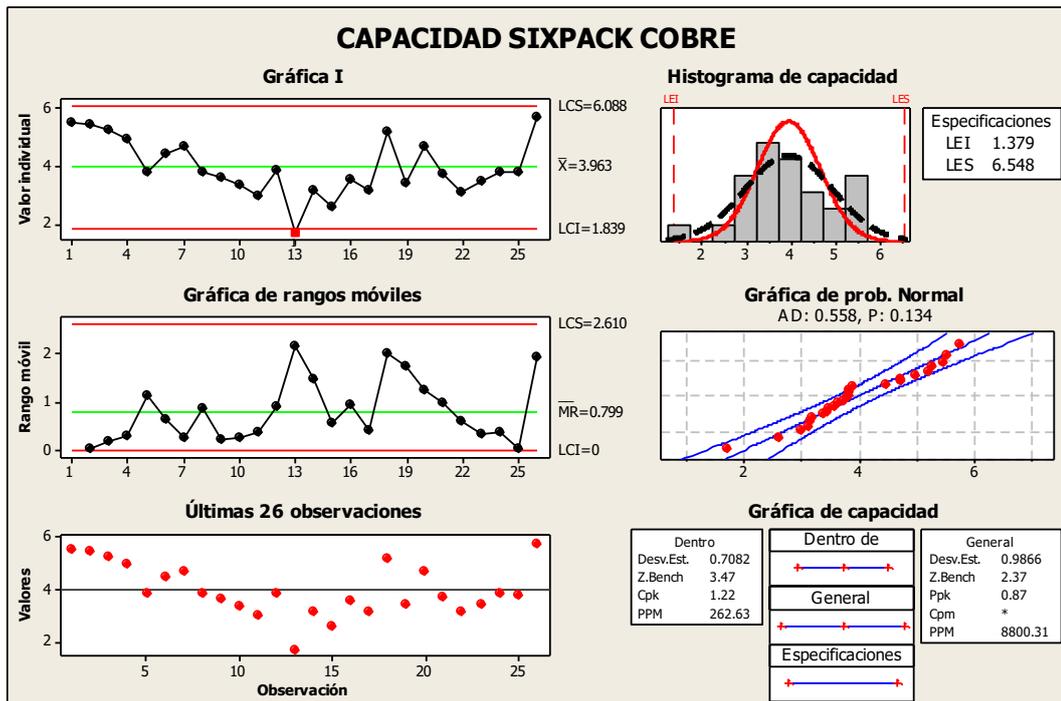


Figura 130. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cobre

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

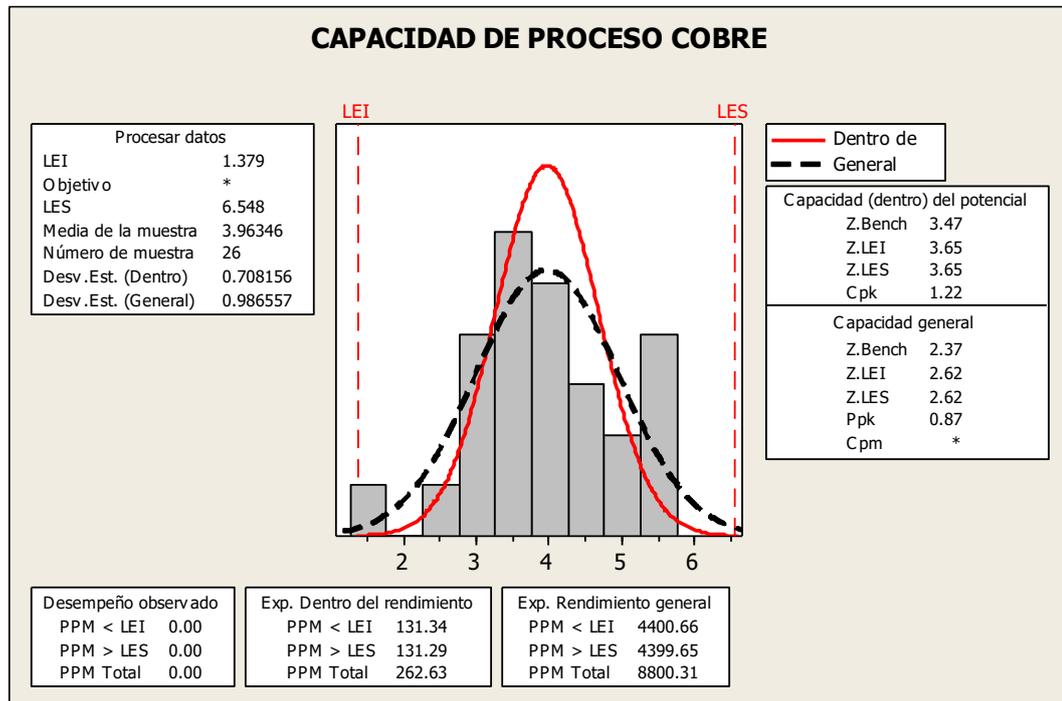


Figura 131. Análisis de capacidad en el desgaste de cobre

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 6.088
Límite de control inferior (LCI)	: 1.839
Límite de especificación superior (LES)	: 6.548
Límite de especificación inferior (LEI)	: 1.379
<b>Capacidad (dentro) del Potencial</b>	
Z.Bench	: 3.47
Z.LEI	: 3.65
Z.LES	: 3.65
Cpk	: 1.22
<b>Capacidad General</b>	
Z.Bench	: 2.37
Z.LEI	: 2.62
Z.LES	: 2.62
Ppk	: 0.87

## Desgaste de Aluminio (Al)

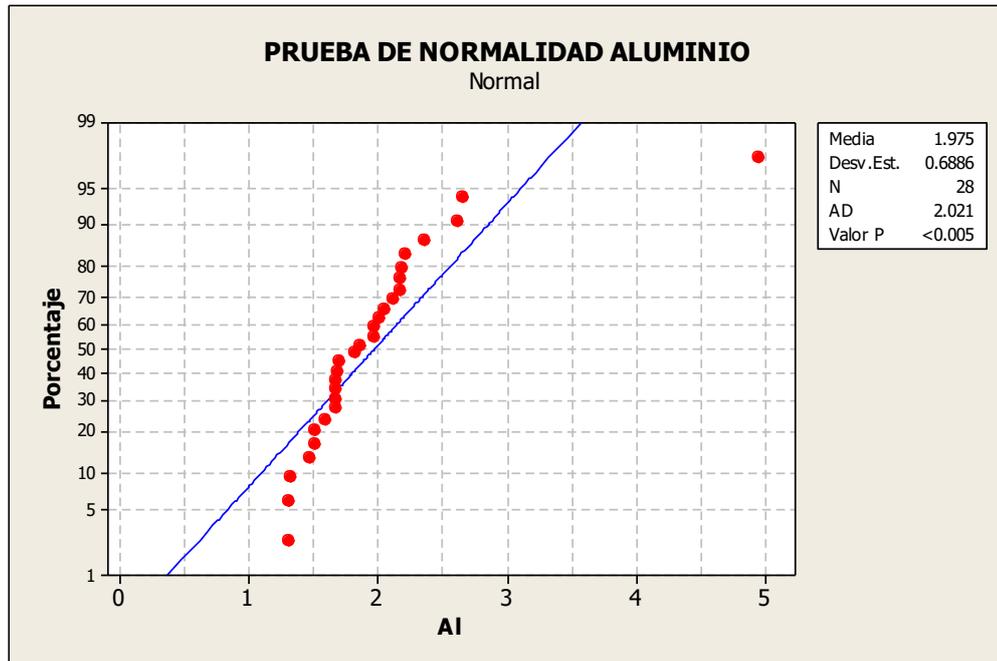


Figura 132. Prueba de normalidad del desgaste de aluminio

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 132* nos da el valor de  $0.05 > P > 0.005$ , nos indica que nuestros datos no siguen una distribución normal.

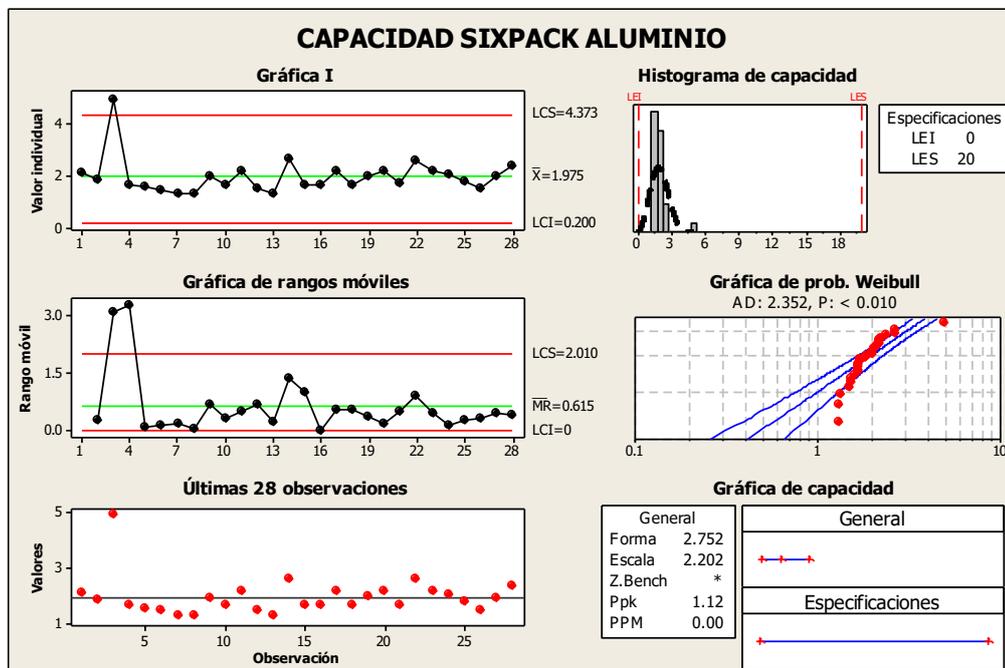


Figura 133. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de aluminio

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 133* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 03, fuera de control

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en los puntos 02 y 03, fuera de control

Gráfica de Valores : Observación de valores en el punto 03

P : 0.005

El punto 03 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

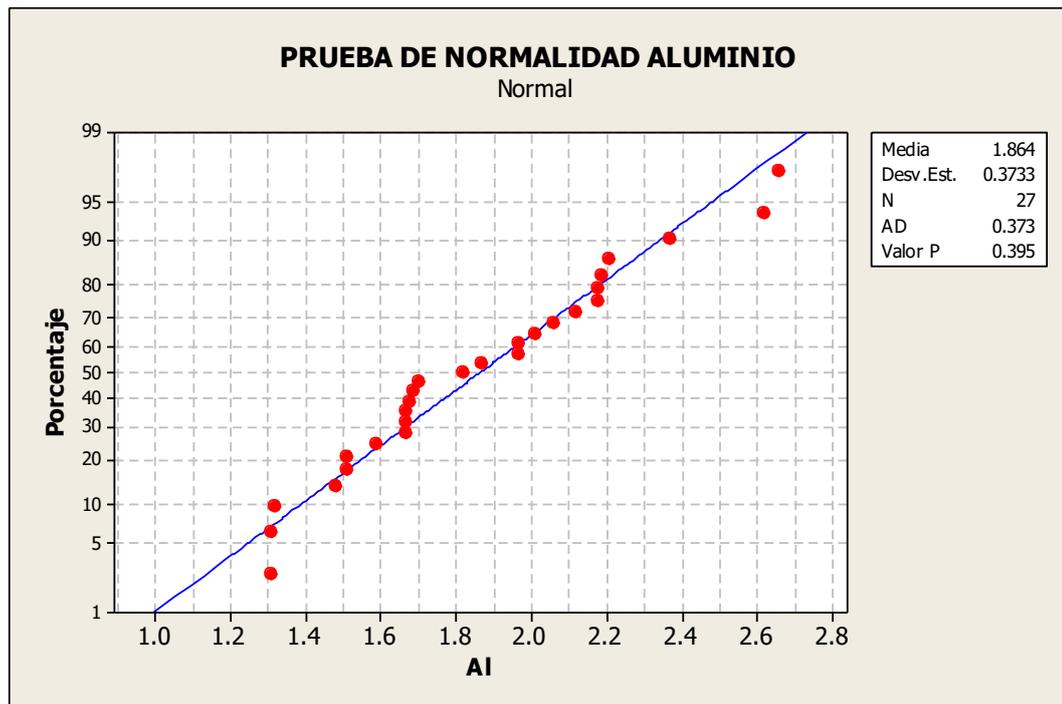


Figura 134. Prueba de normalidad del desgaste de aluminio

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 134* nos da el valor de  $0.395 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

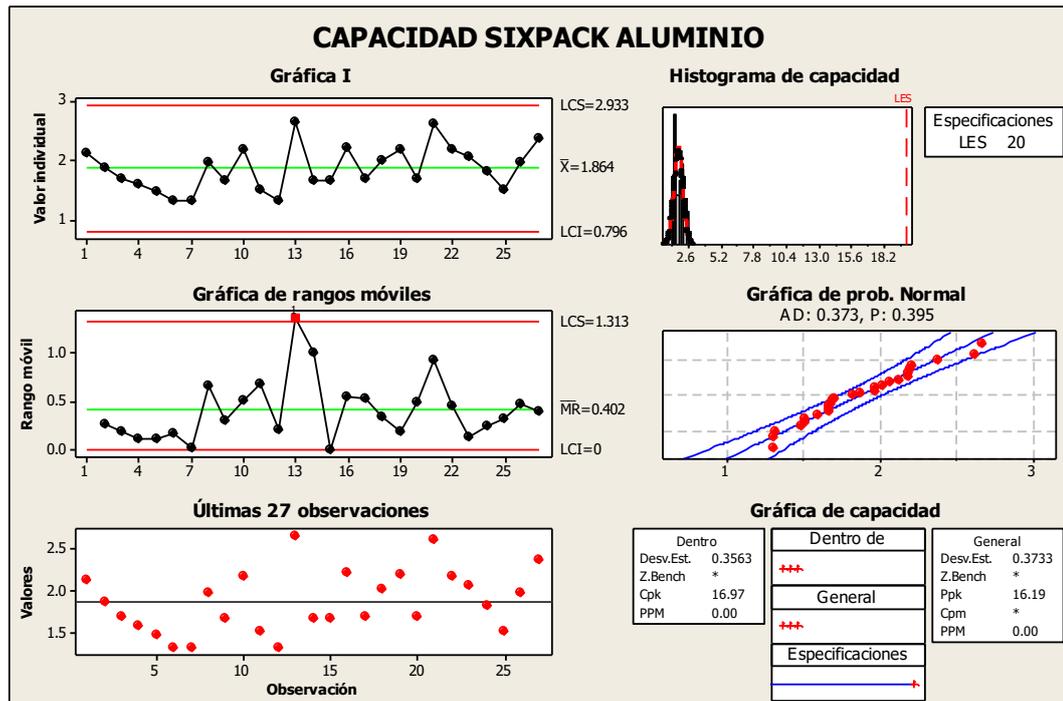


Figura 135. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de aluminio

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 135* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control.

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 13, fuera de control.

Gráfica de Valores : Observación de valor en el punto 13.

P : 0.395

El punto 13 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

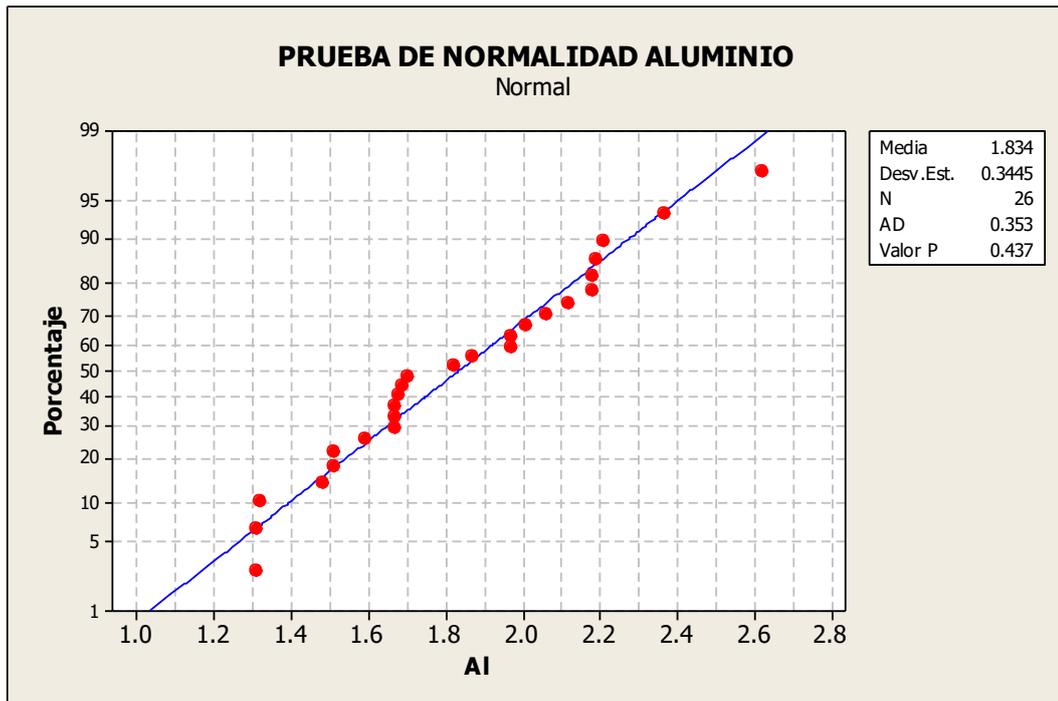


Figura 136. Prueba de normalidad del desgaste de aluminio

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 136* nos da el valor de  $0.437 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

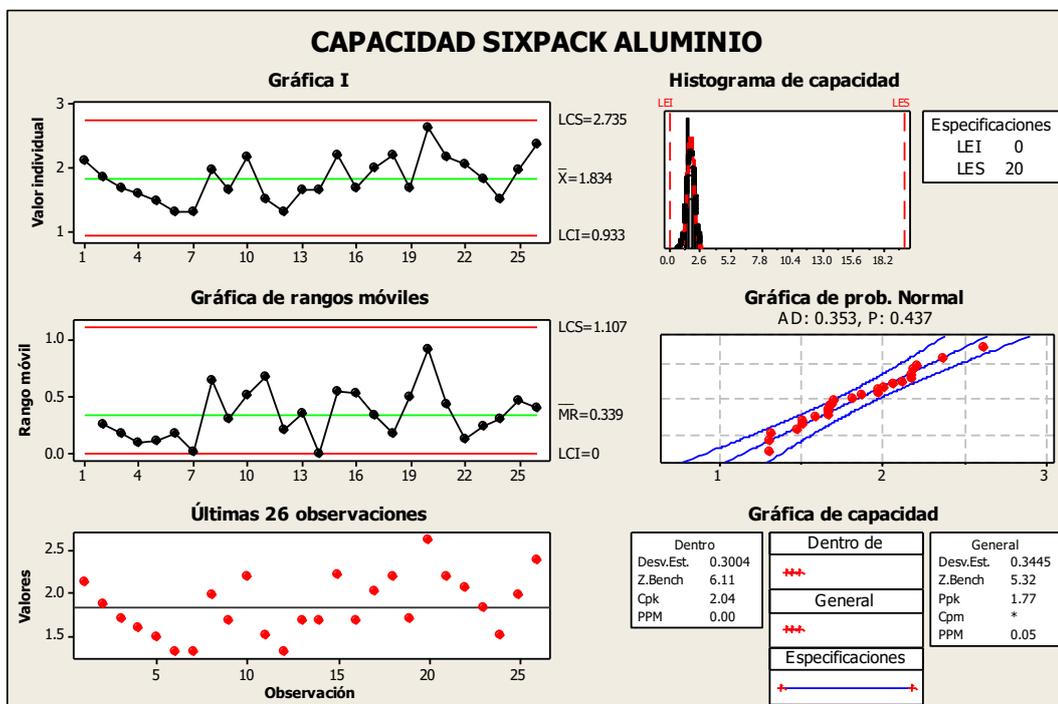


Figura 137. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de aluminio

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 137* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control.

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control.

Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control.

P : 0.437

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

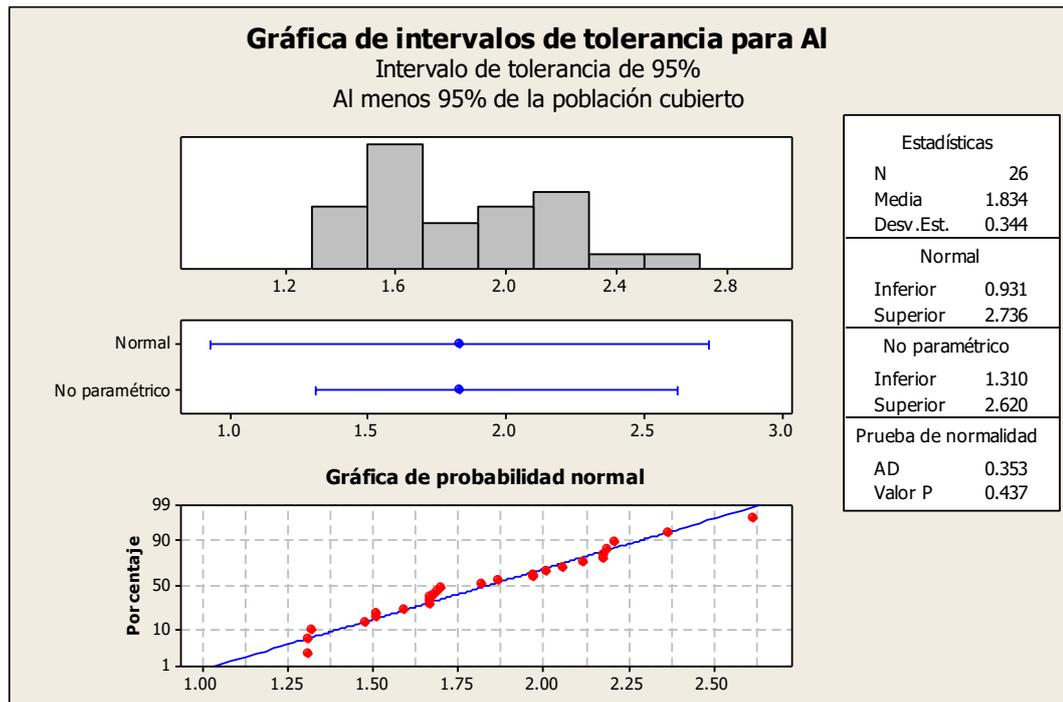


Figura 138. Intervalos de tolerancia para desgaste de aluminio

Fuente: Software Minitab 16

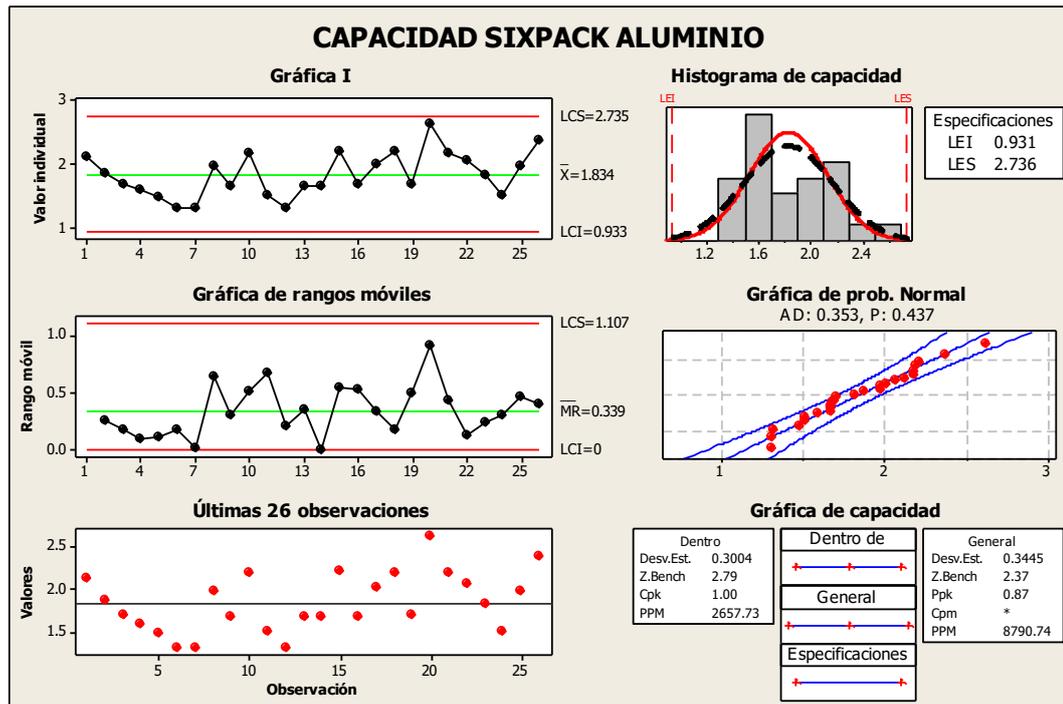


Figura 139. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de aluminio

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

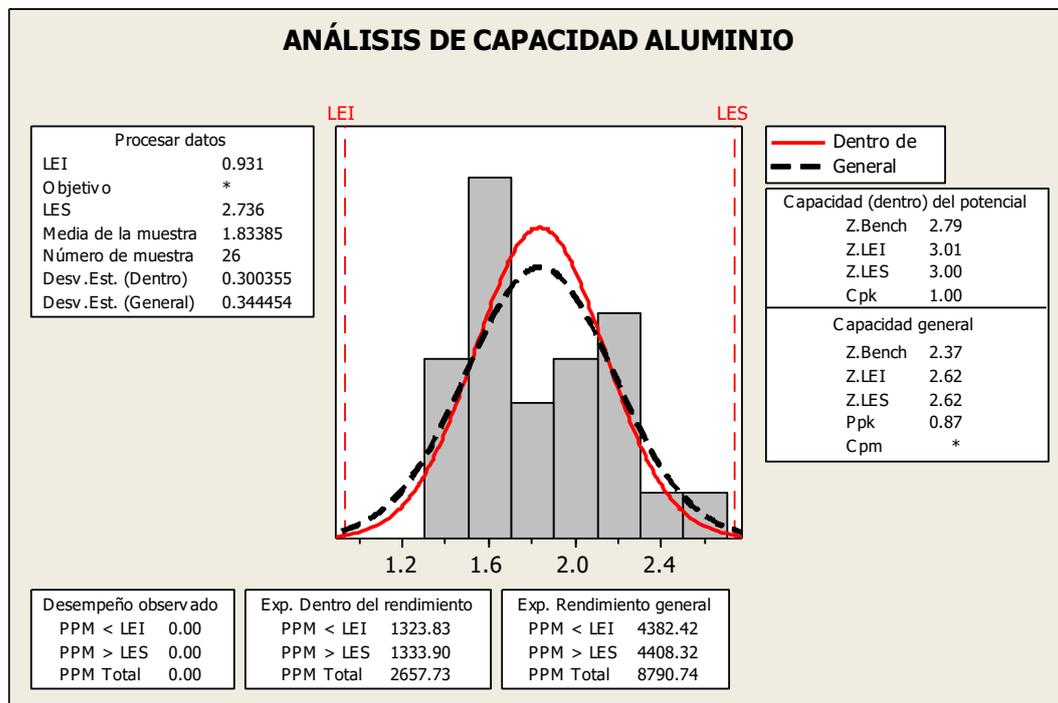


Figura 140. Análisis de capacidad en el desgaste de aluminio

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 2.735
Límite de control inferior (LCI)	: 0.933
Límite de especificación superior (LES)	: 2.736
Límite de especificación inferior (LEI)	: 0.931
Capacidad (dentro) del Potencial	
Z.Bench	: 2.79
Z.LEI	: 3.01
Z.LES	: 3.00
Cpk	: 1.0
Capacidad General	
Z.Bench	: 2.37
Z.LEI	: 2.62
Z.LES	: 2.62
Ppk	: 0.87

#### Desgaste de Cromo (Cr)

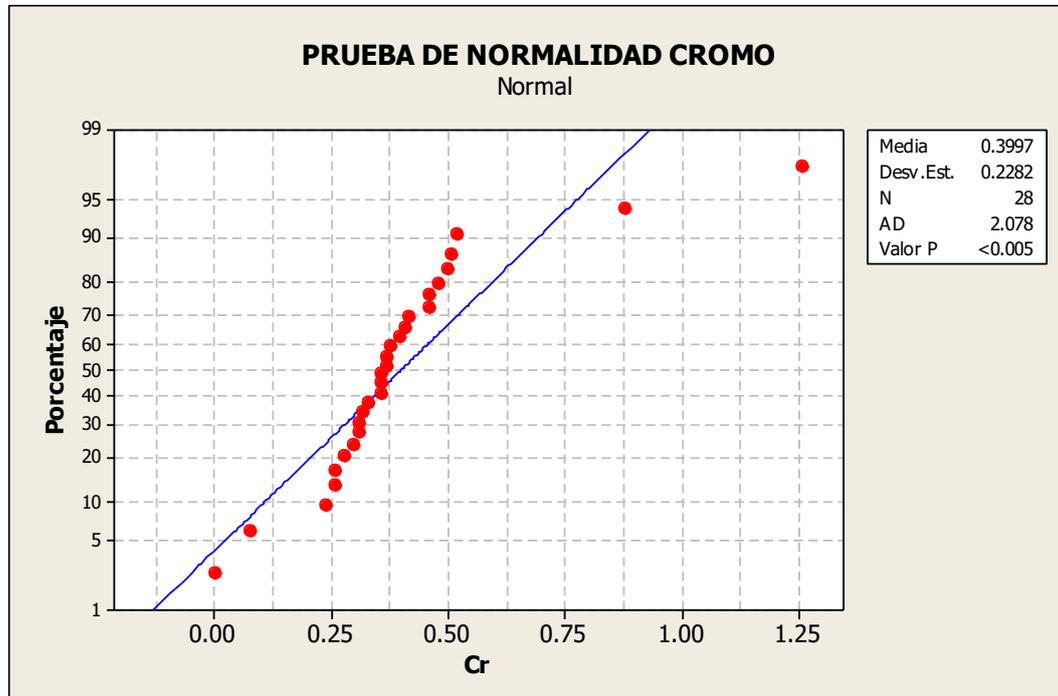


Figura 141. Prueba de normalidad del desgaste de cromo

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 141* nos da el valor de  $0.05 > P > 0.005$ , nos indica que nuestros datos no siguen una distribución normal.

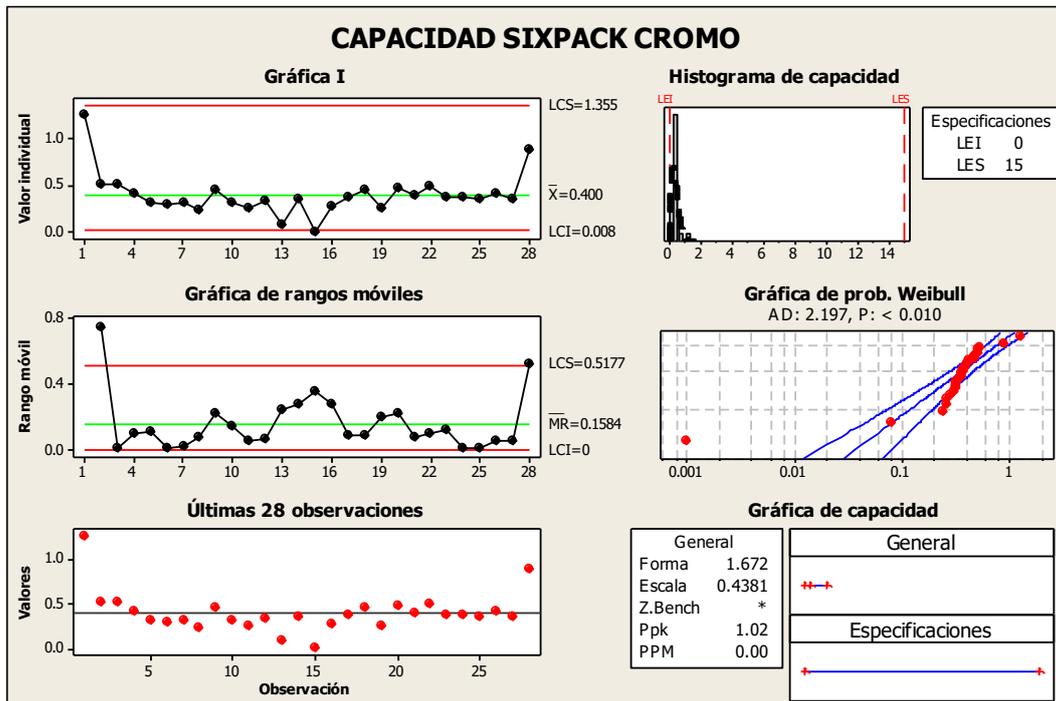


Figura 142. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cromo

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 142* se tiene las siguientes observaciones:

- Gráfica I : Observación en el punto 15, fuera de control
- Gráfica de Rangos Móviles : Observaciones en los puntos 01 y 28, fuera de control
- Gráfica de Valores : Observación de valores en los puntos 01 y 28
- P :  $< 0.005$

Los puntos 01, 15 y 28 serán asignados como causas asignables, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

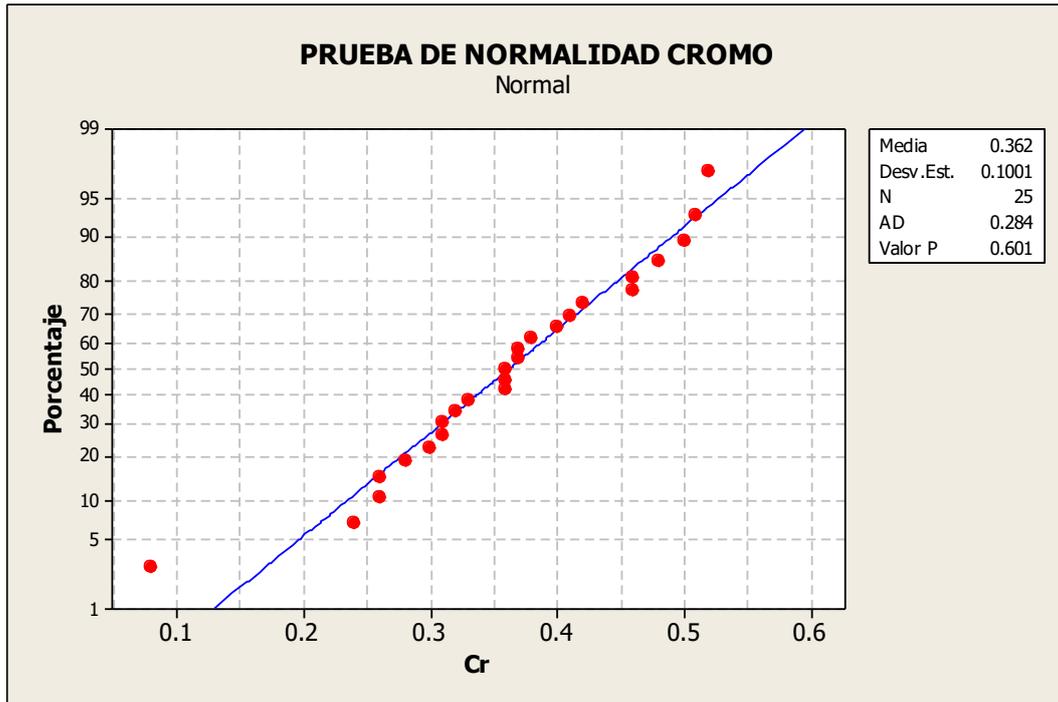


Figura 143. Prueba de normalidad del desgaste de cromo

Fuente: Software Minitab 16

De la Figura 143 nos da el valor de  $0.601 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

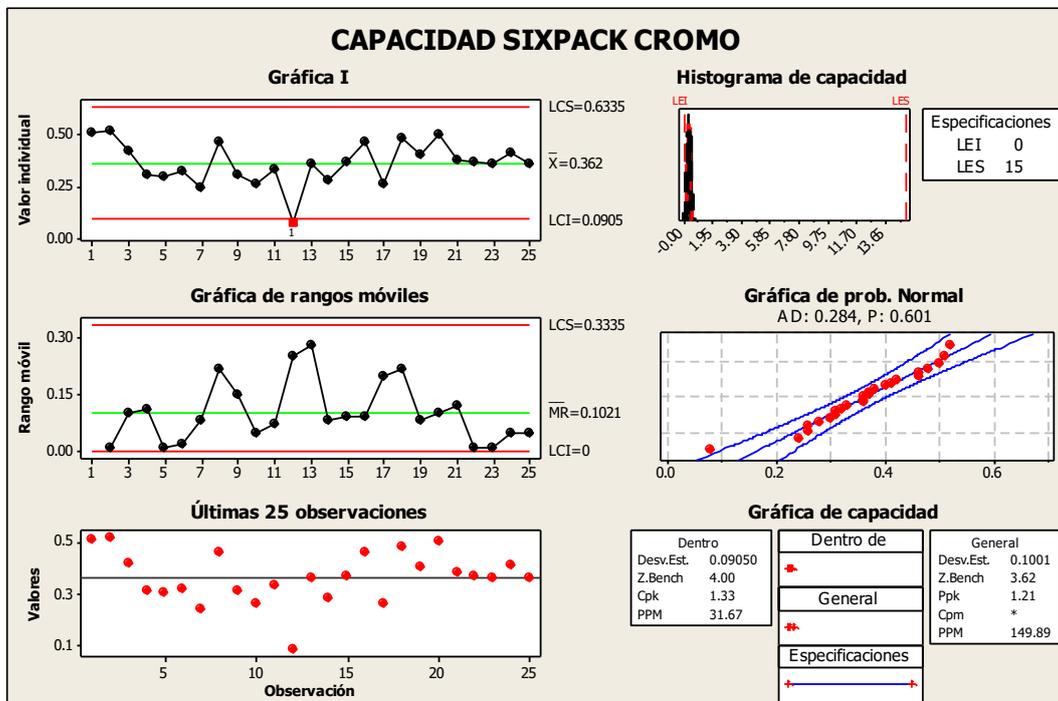


Figura 144. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cromo

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 144* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control.

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 12, fuera de control.

Gráfica de Valores : Observación de valor en el punto 12.

P : 0.601

El punto 12 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

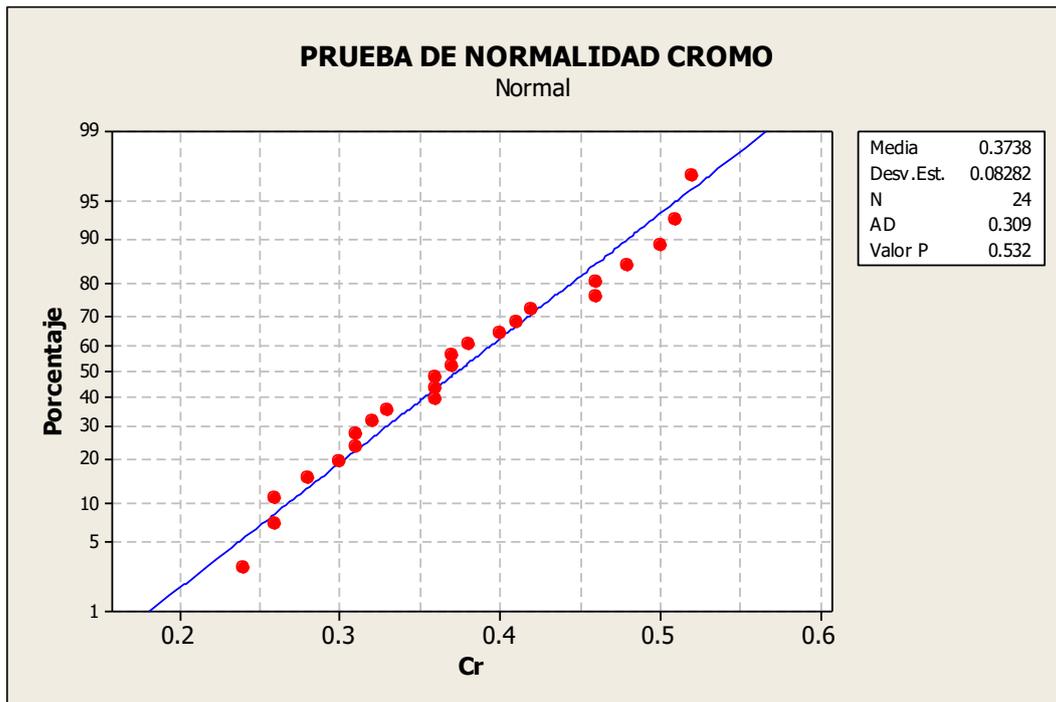


Figura 145. Prueba de normalidad del desgaste de cromo

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 145* nos da el valor de  $0.532 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

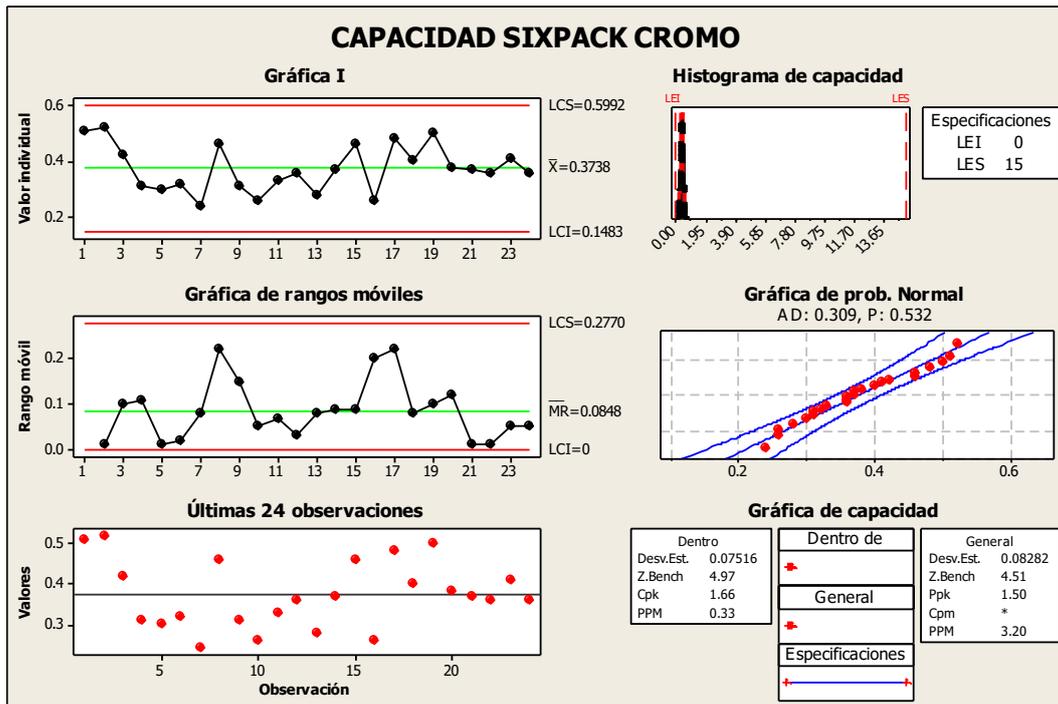


Figura 146. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cromo

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

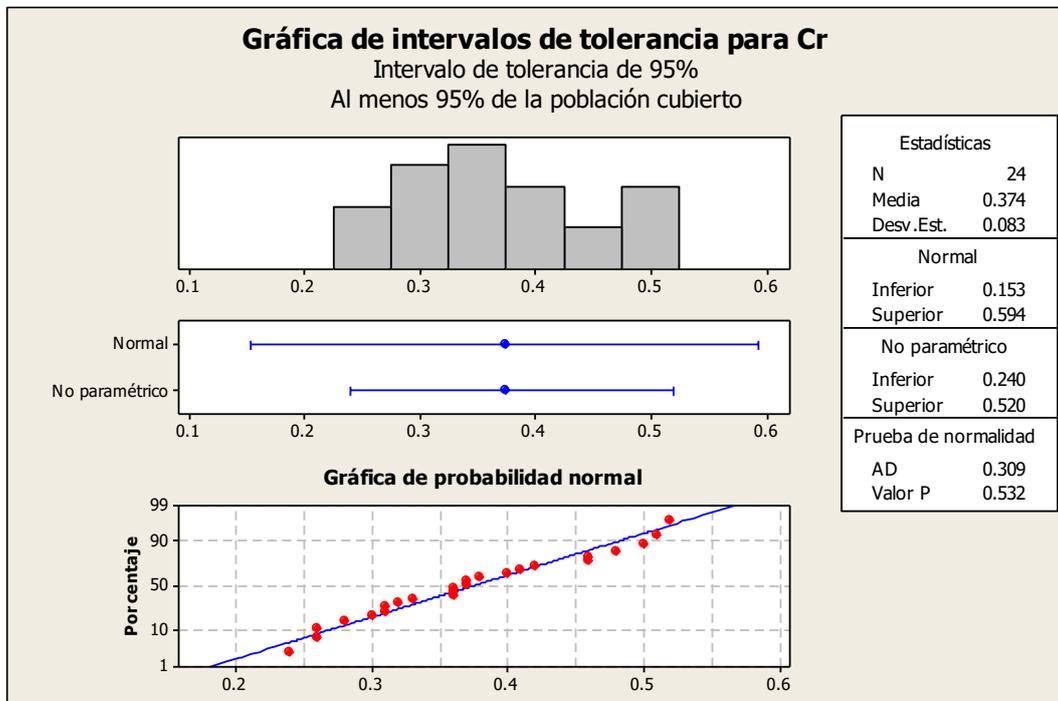


Figura 147. Intervalos de tolerancia para desgaste de cromo

Fuente: Software Minitab 16

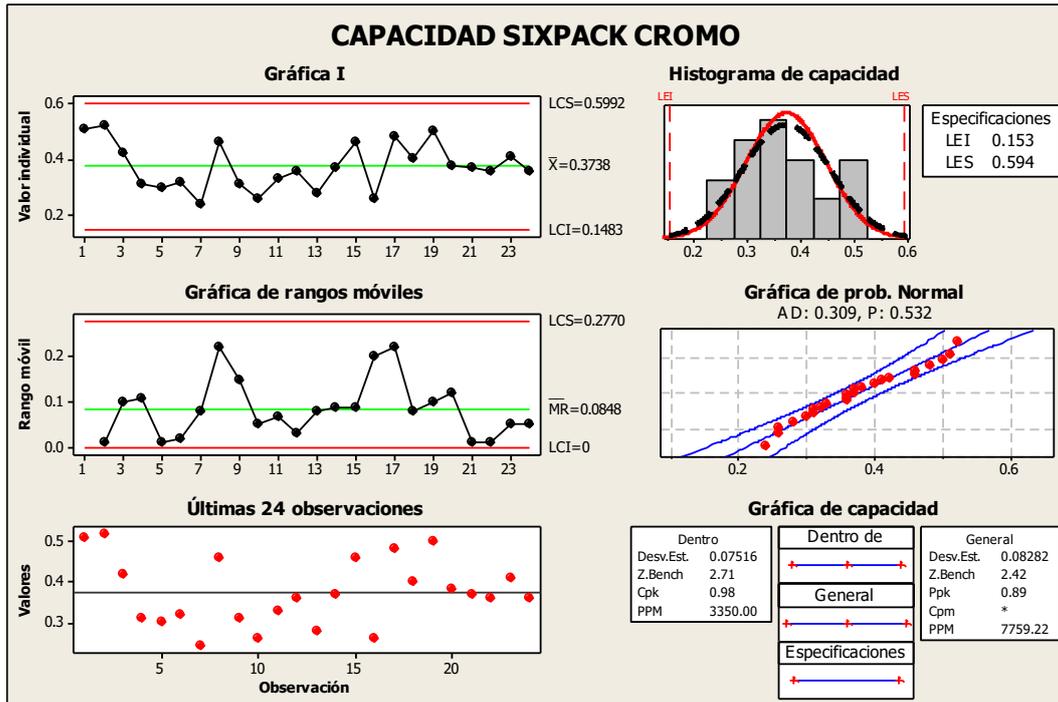


Figura 148. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de cromo

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado

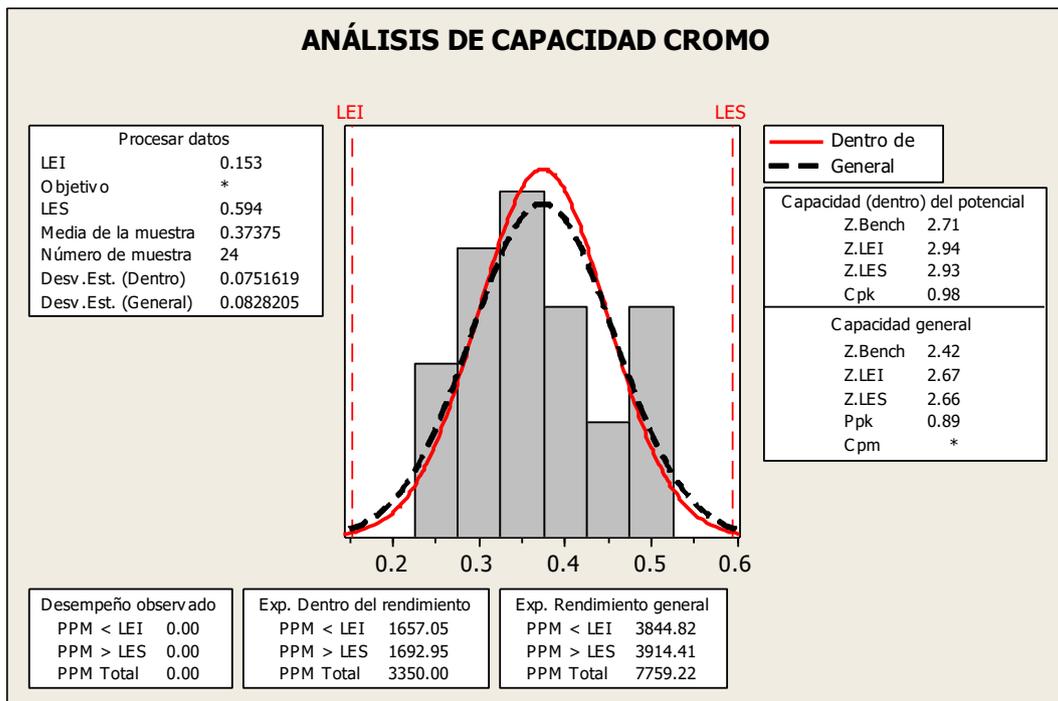


Figura 149. Análisis de capacidad en el desgaste de cromo

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 0.5992
Límite de control inferior (LCI)	: 0.1483
Límite de especificación superior (LES)	: 0.594
Límite de especificación inferior (LEI)	: 0.153
Capacidad (dentro) del Potencial	
Z.Bench	: 2.71
Z.LEI	: 2.94
Z.LES	: 2.93
Cpk	: 0.98
Capacidad General	
Z.Bench	: 2.42
Z.LEI	: 2.67
Z.LES	: 2.66
Ppk	: 0.89

### Desgaste de Plomo (Pb)

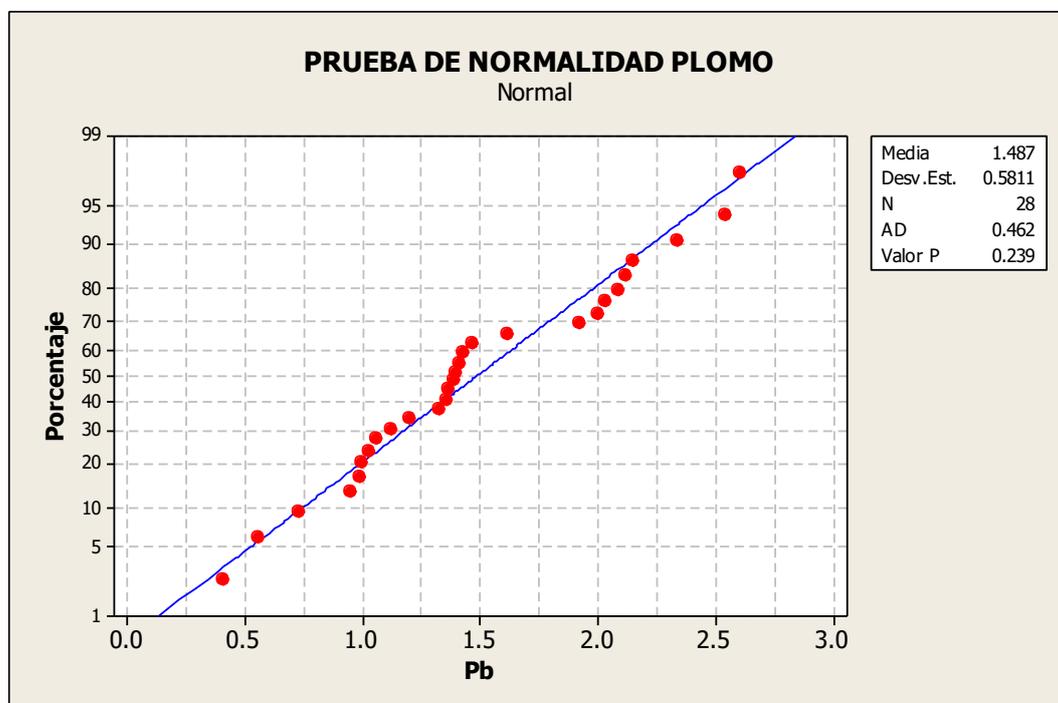


Figura 150. Prueba de normalidad del desgaste de plomo

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 150* nos da el valor de  $0.239 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

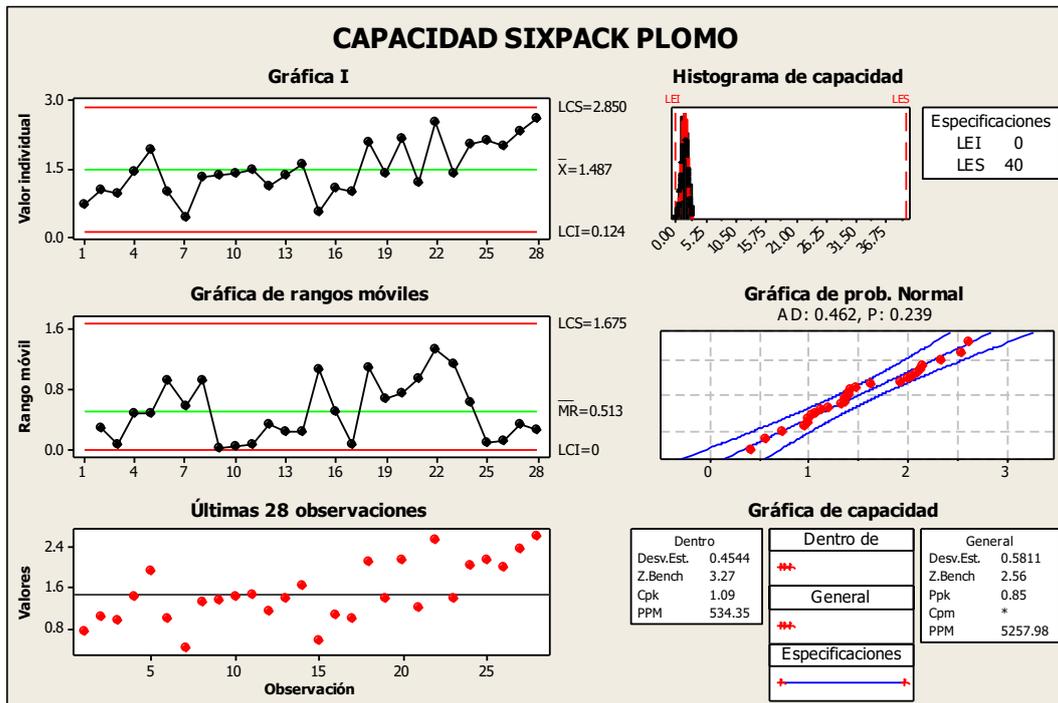


Figura 151. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de plomo

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la Figura 151 se tiene las siguientes observaciones:

- Gráfica I : Datos dentro de los límites de control
- Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control
- Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control
- P : 0.239

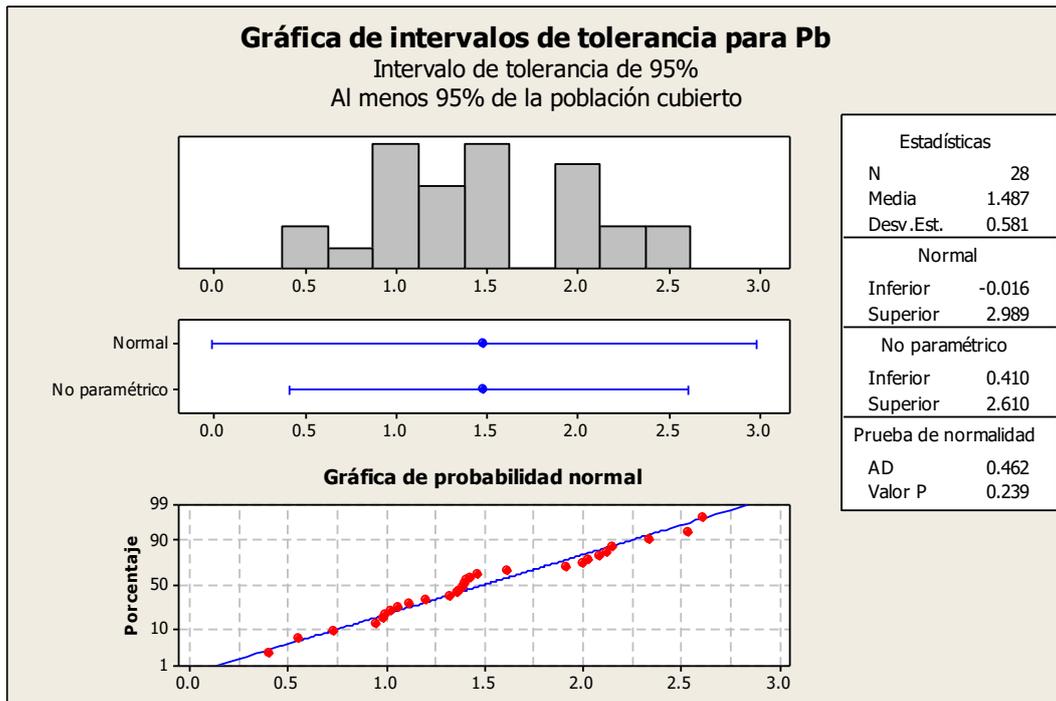


Figura 152. Intervalos de tolerancia para desgaste de plomo

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

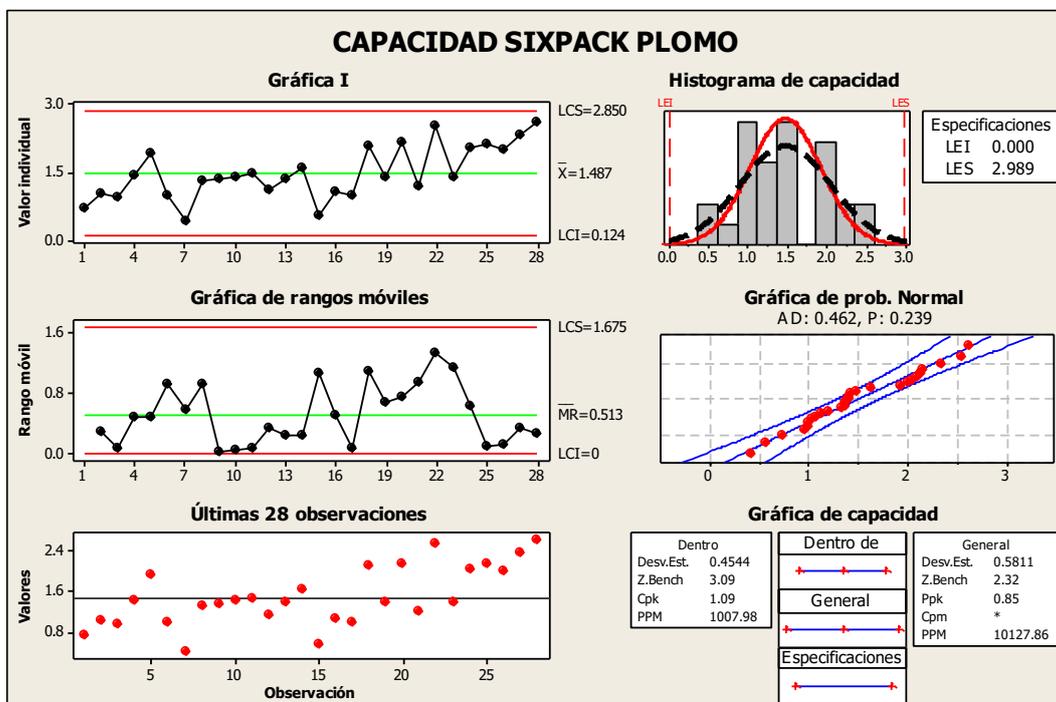


Figura 153. Capacidad sixpack de proceso del desgaste de plomo

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

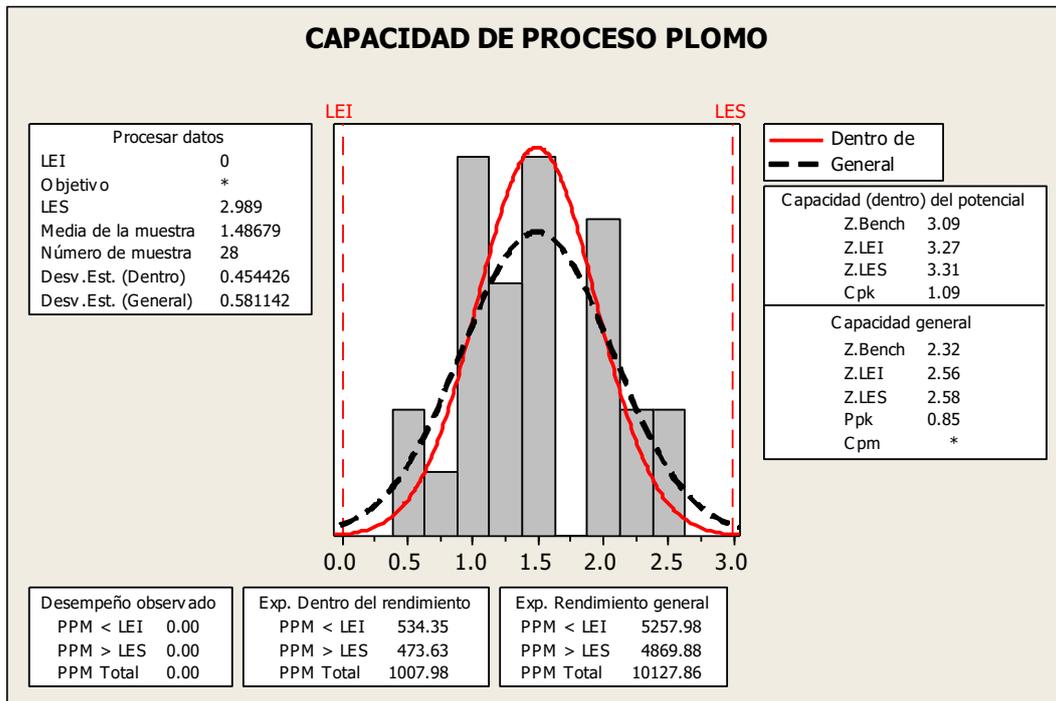


Figura 154. Análisis de capacidad en el desgaste de plomo

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 2.850
Límite de control inferior (LCI)	: 0.124
Límite de especificación superior (LES)	: 2.989
Límite de especificación inferior (LEI)	: 0
<b>Capacidad (dentro) del Potencial</b>	
Z.Bench	: 3.09
Z.LEI	: 3.27
Z.LES	: 3.31
Cpk	: 1.09
<b>Capacidad General</b>	
Z.Bench	: 2.32
Z.LEI	: 2.56
Z.LES	: 2.58
Ppk	: 0.85

### Contaminación por Silicio (Si)

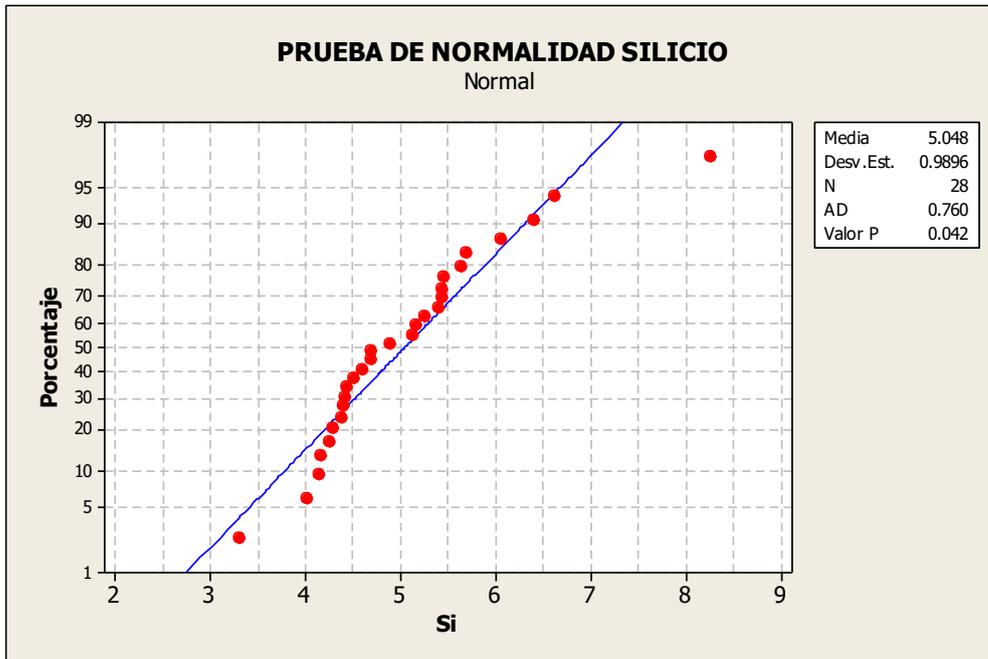


Figura 155. Prueba de normalidad de contaminación con silicio

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 155* nos da el valor de  $0.05 > P > 0.042$ , nos indica que nuestros datos no siguen una distribución normal.

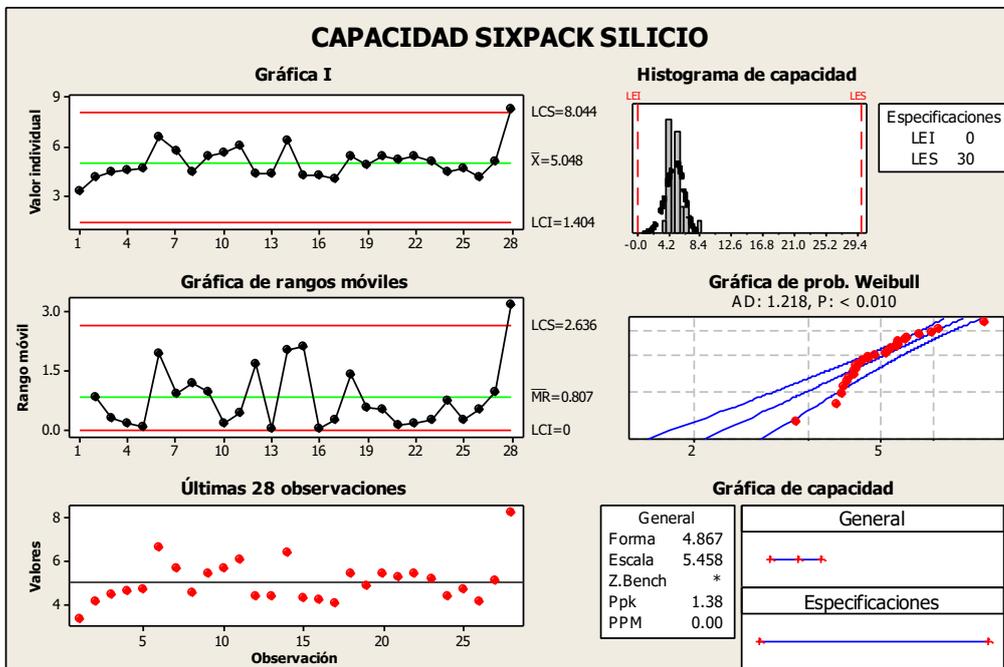


Figura 156. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con silicio

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 156* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 28, fuera de control.

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en el punto 28, fuera de control.

Gráfica de Valores : Observación de valores en el punto 28.

P : 0.042

El punto 28 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

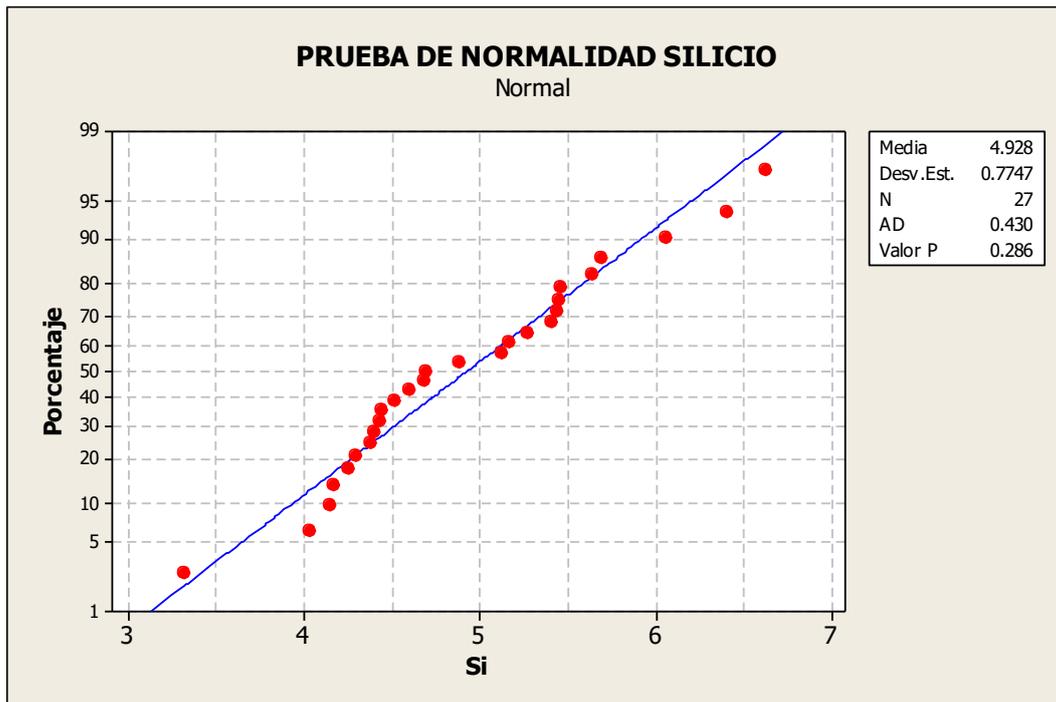


Figura 157. Prueba de normalidad de contaminación con silicio

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 157* nos da el valor de  $0.286 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

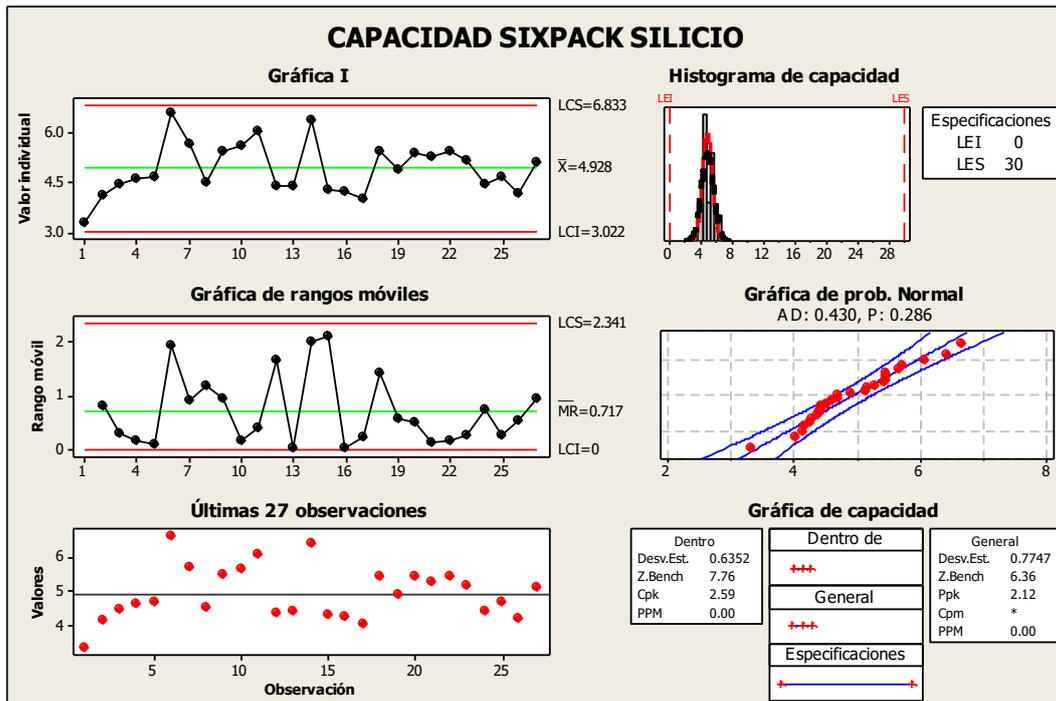


Figura 158. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con silicio

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 158* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control

Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control

P : 0.286

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.



El histograma de capacidad está centrado.

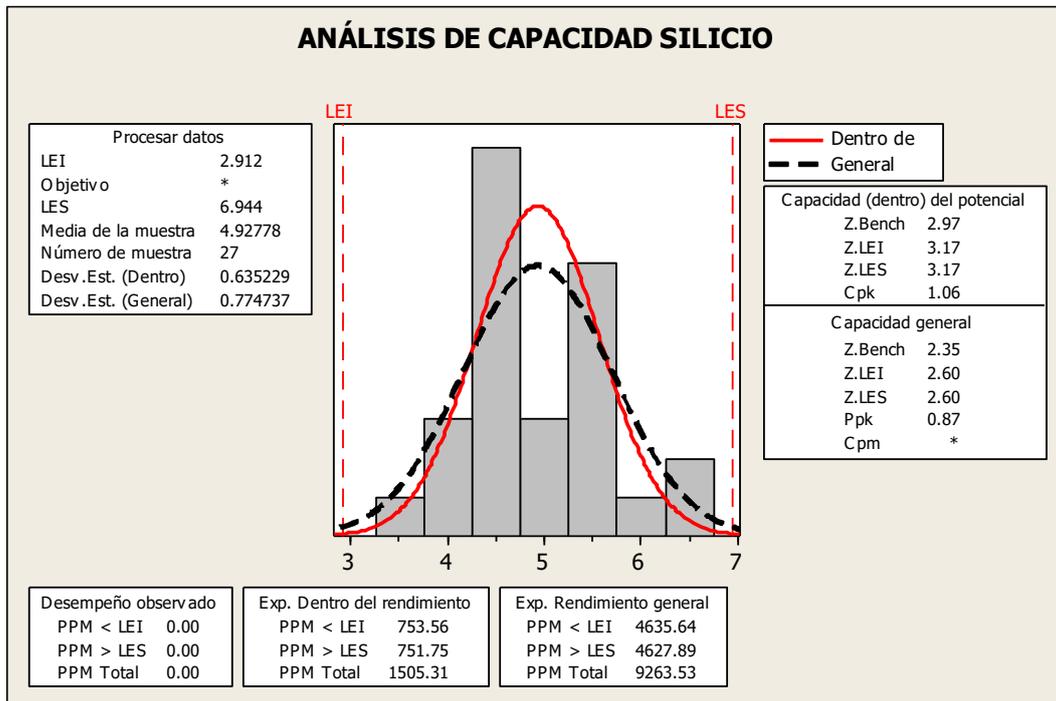


Figura 161. Análisis de capacidad en contaminación con silicio

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 6.833
Límite de control inferior (LCI)	: 3.022
Límite de especificación superior (LES)	: 6.944
Límite de especificación inferior (LEI)	: 2.912
<b>Capacidad (dentro) del Potencial</b>	
Z.Bench	: 2.97
Z.LEI	: 3.17
Z.LES	: 3.17
Cpk	: 1.06
<b>Capacidad General</b>	
Z.Bench	: 2.35
Z.LEI	: 2.60
Z.LES	: 2.60
Ppk	: 0.87

### Contaminación por Sodio (Na)

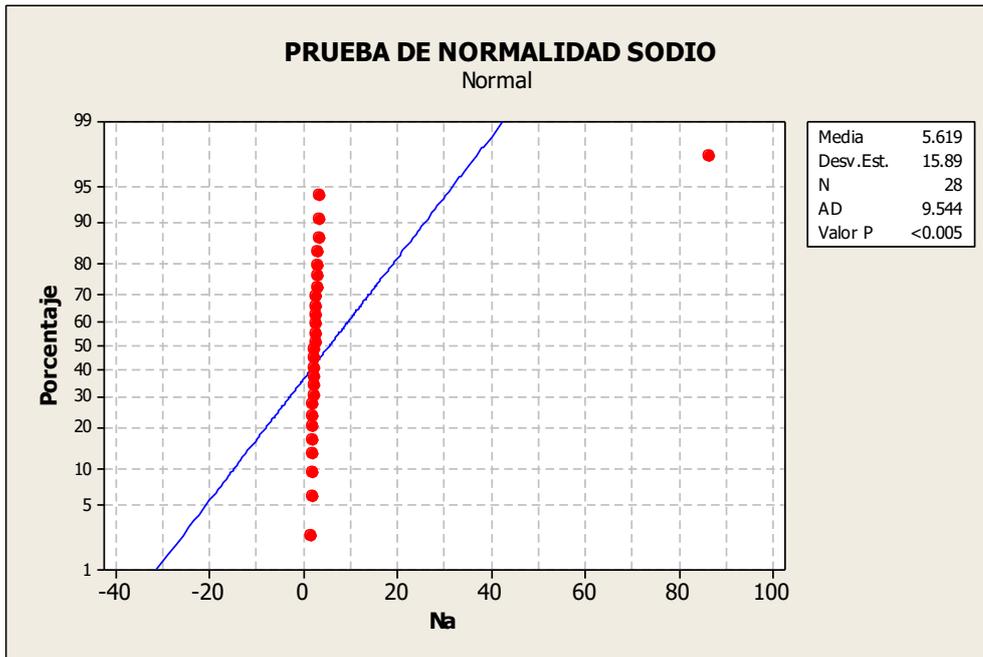


Figura 162. Prueba de normalidad de contaminación con sodio

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 162* nos da el valor de  $0.05 > P > 0.005$ , nos indica que nuestros datos no siguen una distribución normal.

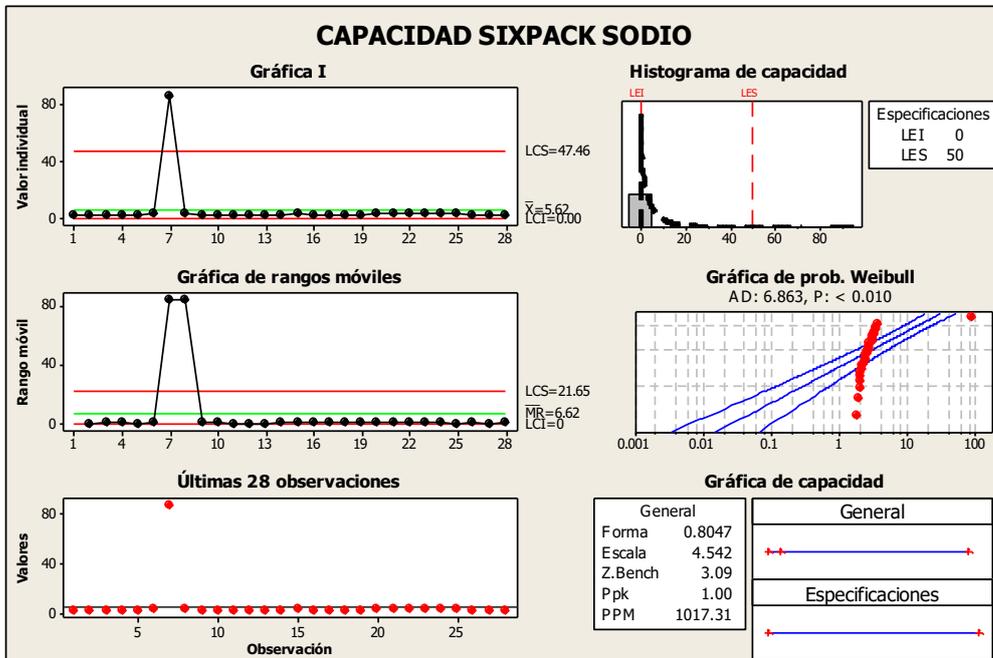


Figura 163. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con sodio

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 163* se tiene las siguientes observaciones:

Gráfica I : Observación en el punto 07, fuera de control.

Gráfica de Rangos Móviles : Observación en los puntos 07 y 08, fuera de control.

Gráfica de Valores : Observación de valor en el punto 07.

P :  $<0.005$

El punto 07 será asignado como causa asignable, se realizará el ajuste de acuerdo a nuevas especificaciones.

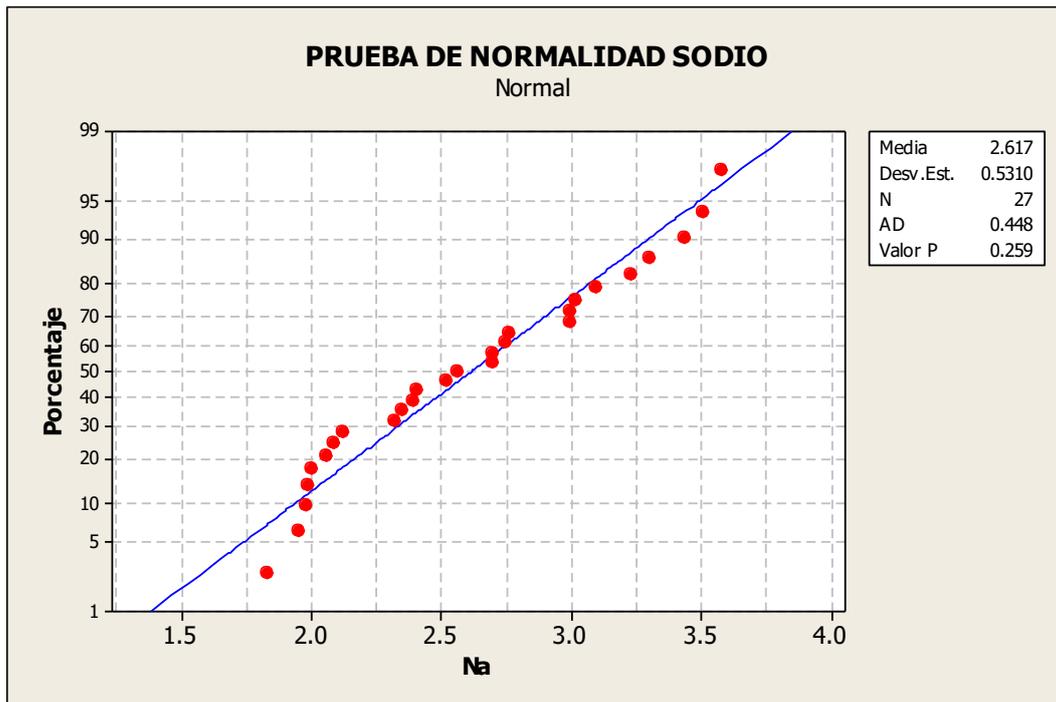


Figura 164. Prueba de normalidad de contaminación con sodio

Fuente: Software Minitab 16

De la *Figura 164* nos da el valor de  $0.259 > P > 0.05$ , nos indica que nuestros datos siguen una distribución normal.

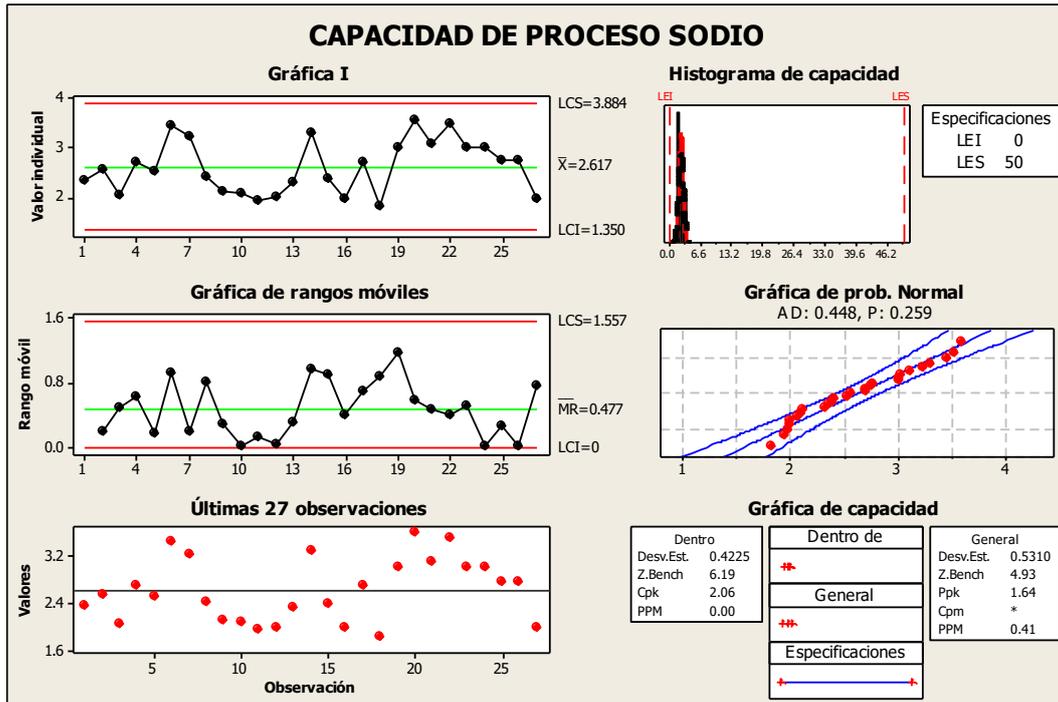


Figura 165. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con sodio

Fuente: Software Minitab 16

De acuerdo a la *Figura 165* se tiene las siguientes observaciones:

- Gráfica I : Datos dentro de los límites de control
- Gráfica de Rangos Móviles : Datos dentro de los límites de control
- Gráfica de Valores : Datos dentro de los límites de control
- P : 0.259

El histograma de capacidad no está centrado debido a que hay un gran sesgo en los límites de especificación obtenidos.

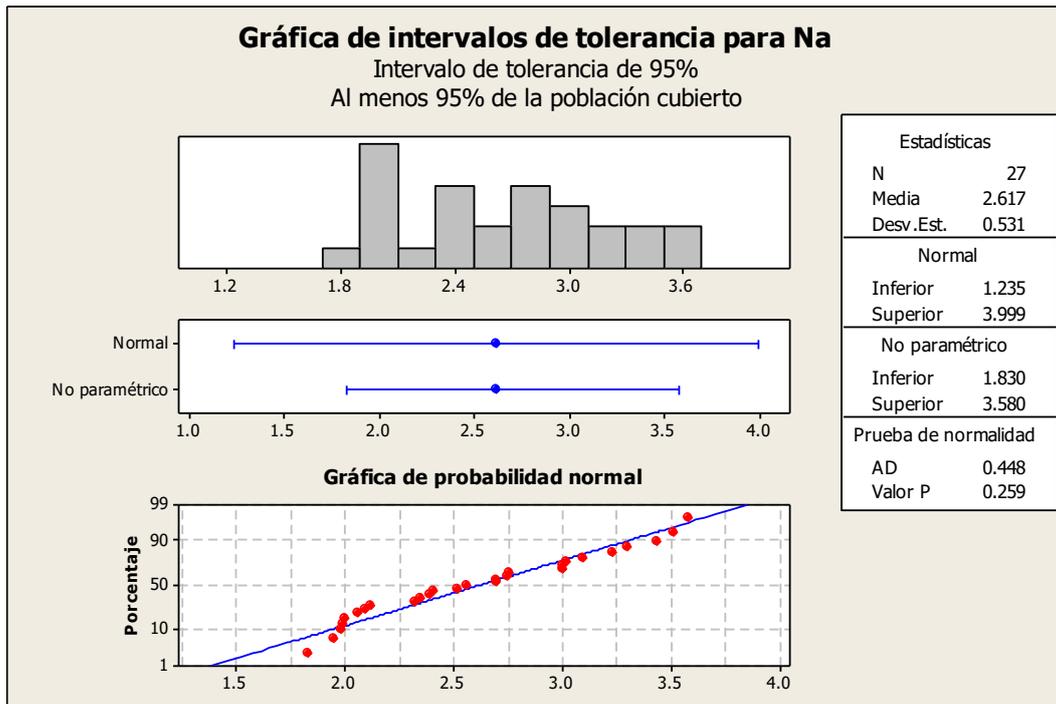


Figura 166. Intervalos de tolerancia para contaminación con sodio

Fuente: Software Minitab 16

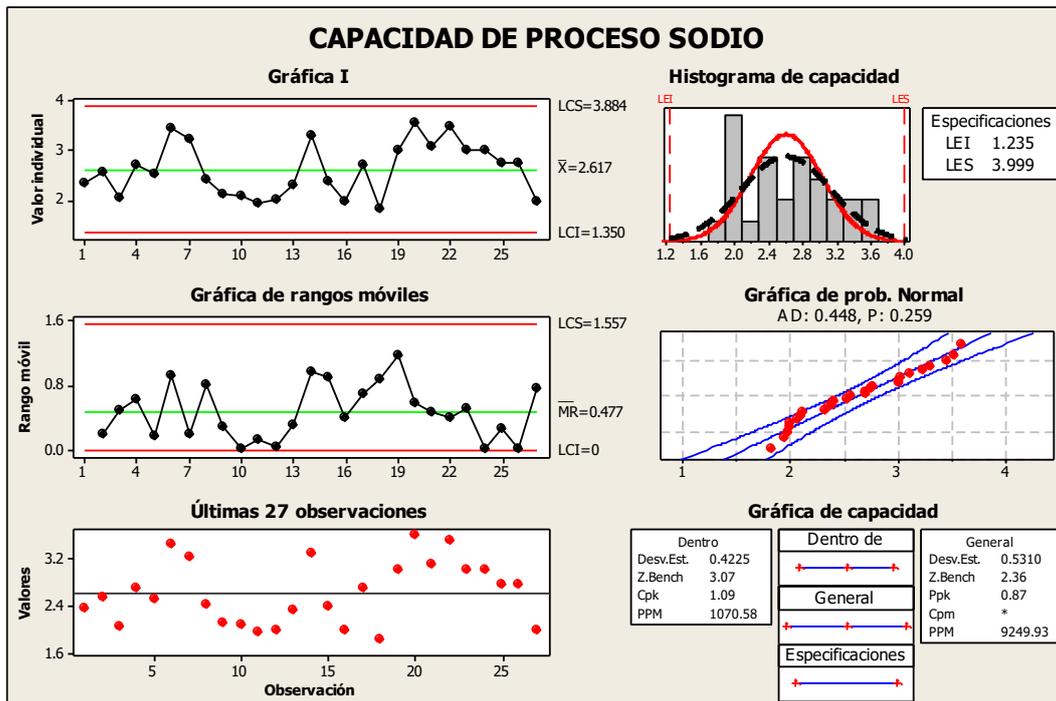


Figura 167. Capacidad sixpack de proceso de contaminación con sodio

Fuente: Software Minitab 16

El histograma de capacidad está centrado.

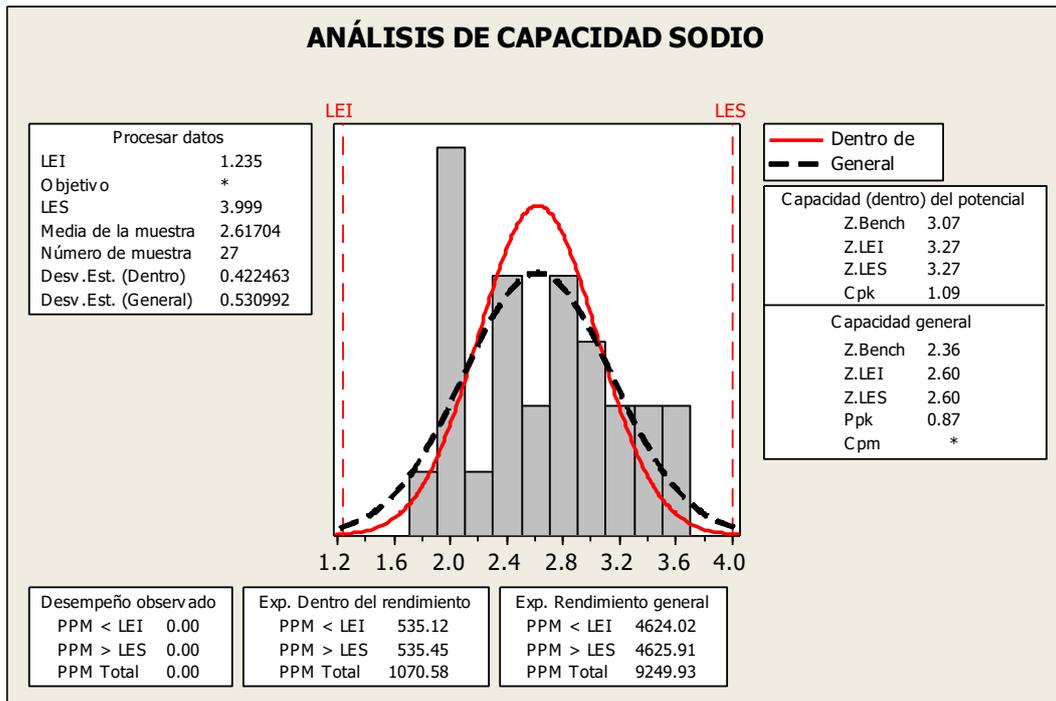


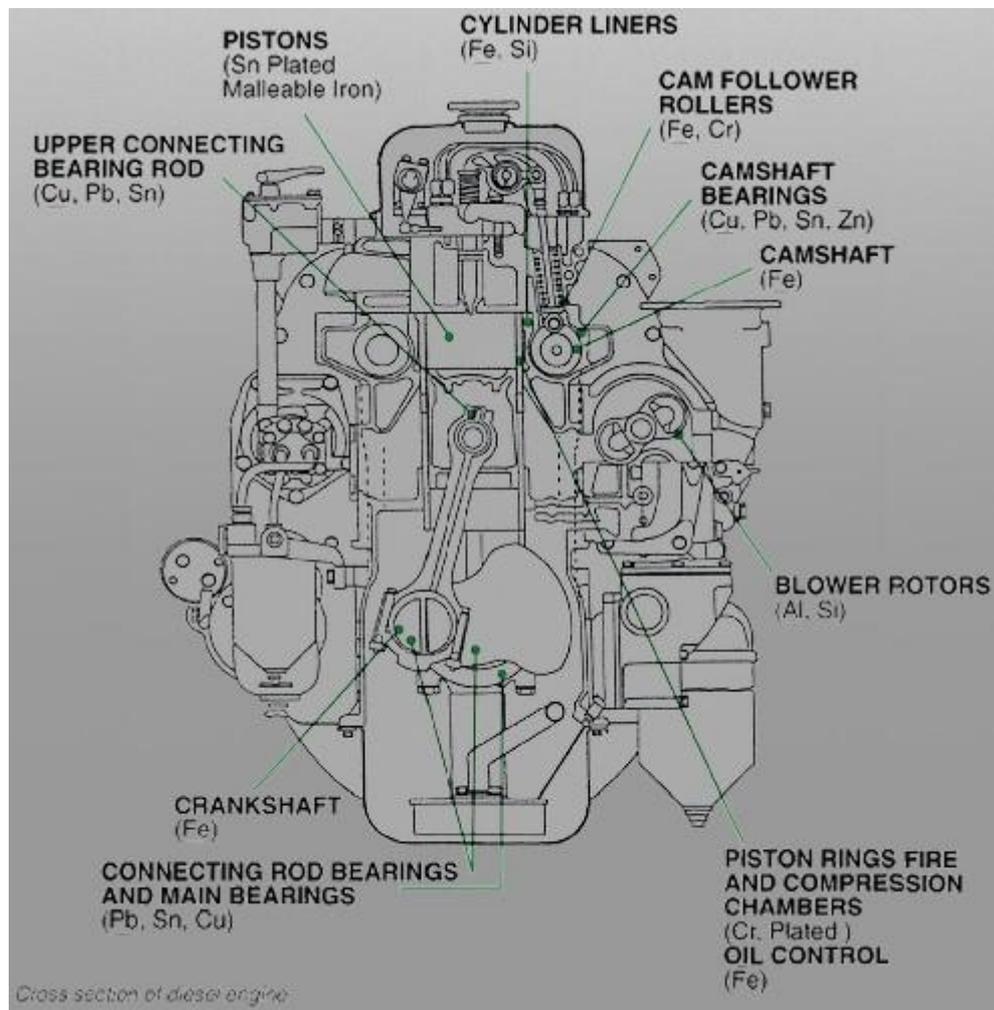
Figura 168. Análisis de capacidad de contaminación con sodio

Fuente: Software Minitab 16

Límite de control superior (LCS)	: 3.884
Límite de control inferior (LCI)	: 1.350
Límite de especificación superior (LES)	: 3.999
Límite de especificación inferior (LEI)	: 1.235
<b>Capacidad (dentro) del Potencial</b>	
Z.Bench	: 3.07
Z.LEI	: 3.27
Z.LES	: 3.27
Cpk	: 1.09
<b>Capacidad General</b>	
Z.Bench	: 2.36
Z.LEI	: 2.60
Z.LES	: 2.60
Ppk	: 0.87

## ANEXO 16

### 16.1 Componentes Metálicos en un Motor Diesel



Anexo 16.1. FICHA DE METALES DE DESGASTE CASTROL LABCHECK