

**DETECCION DE FALLAS EN UN RECIPIENTE SOMETIDO A PRESION
IMPLEMENTANDO LA TECNOLOGIA DE EMISIONES ACUSTICAS**

SERGIO ALEXANDER PEÑALOZA PEÑA

CARLOS ANDRES GALVIS GELVIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS**

INGENIERIA MECANICA

BUCARAMANGA

2013

**DETECCION DE FALLAS EN UN RECIPIENTE SOMETIDO A PRESION
IMPLEMENTANDO LA TECNOLOGIA DE EMISIONES ACUSTICAS**

SERGIO ALEXANDER PEÑALOZA PEÑA

CARLOS ANDRES GALVIS GELVIS

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

ING. JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A DIOS por su infinito amor, a mi familia, en especial a mi hermosa madre Sonia Gelvis Ruiz, por entregar su vida en pro de mis sueños. A mi hermano Fabián Enrique González por su magnífica amistad, y a la luz de mis ojos, Ana Milena García Valbuena, quien con su existencia cambió la esencia de mi corazón y le dio verdadero sentido a mi vida.

CARLOS ANDRES GALVIS GELVIS

DEDICATORIA

A DIOS por la vida, a mi familia por su apoyo, y a mis compañeros.

SERGIO ALEXANDER PEÑALOZA PEÑA

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	29
1. INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	31
1.1. INSPECCIÓN VISUAL	32
1.2. ULTRASONIDO	33
1.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	34
1.4. LÍQUIDOS PENETRANTES	35
1.5. RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	36
1.6. EMISIONES ACÚSTICAS	37
1.6.1. Aplicaciones	37
1.6.2. Ventajas y desventajas	40
1.7. IMPERFECCIONES VERSUS MÉTODO DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO	41
1.8. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS - IMPACTO A NIVEL LOCAL	41
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS EMISIONES ACUSTICAS	44
2.1. Historia y desarrollo	44
2.2. Principio de AET	44
2.3. Cadena estructural de AET	45
2.3.1. Fuentes de AE	45
2.3.1.1. Cambios microestructurales	46
2.3.1.2. Actividad de materiales incrustados	46
2.3.1.3. Grietas	46

2.3.1.4.	Ruido	47
2.3.1.5.	Actividad de la fuente de AE tras la carga estructural.	48
2.3.2.	Propagación de la onda	49
2.3.2.1.	Atenuación	50
2.3.2.2.	Velocidad de la onda	53
2.3.3.	El sensor	55
2.3.3.1.	Principio de captación de la AE	55
2.3.3.2.	Sensibilidad del sensor	56
2.3.3.3.	Tipos de sensores.	57
2.3.4.	Acondicionamiento Electrónico	58
2.3.4.1.	Concepto de Hit.	59
2.3.4.2.	Características de la señal.	60
2.3.4.3.	Arquitectura instrumental	61
2.3.5.	Técnicas de localización de la falla	62
2.3.5.1.	Técnica de localización lineal.	63
2.3.5.2.	Técnica de ubicación planar.	64
2.3.5.3.	Técnicas de ubicación zonal	65
2.3.6.	Visualización de datos	66
2.3.6.1.	Visualización de la ubicación	67
2.3.6.2.	Visualización de la actividad	69
2.3.6.3.	Visualización de la intensidad	71
2.3.6.4.	Visualización de la calidad	73
2.3.6.5.	Visualización de las formas de onda.	74
2.3.7.	Evaluación de los resultados del AET.	74

2.3.7.1.	Implicaciones del efecto <i>Kaiser</i> y el efecto <i>Felicity</i> .	75
2.3.7.2.	Aglomeración de eventos y tendencias de los parámetros de AE	75
3.	NORMATIVIDAD	77
3.1.	ESTANDARES DE AET EN PROCESOS INDUSTRIALES	77
3.1.1.	Monitoreo de AE durante procesos de soldadura continua	77
3.1.2.	AET de pequeñas piezas	78
3.1.3.	AET en estructuras durante una estimulación controlada	79
3.2.	ESTANDARES USADOS PARA LA INSPECCION DE CILINDROS DE GLP EN EL PRESENTE PROYECTO.	80
3.2.1.	Inspección de recipientes metálicos durante pruebas de presión usando AE	80
3.2.1.1.	Requerimientos del procedimiento	81
3.2.1.2.	Ubicación del sensor	82
3.2.1.3.	Examen previo a las mediciones y revisión de desempeño del sistema	83
3.2.1.4.	Procedimiento para la examinación	84
3.2.1.5.	Evaluación de datos	87
3.2.1.6.	Reporte de resultados	87
3.2.2.	Guía estándar para el montaje del sensor piezoeléctrico	89
3.2.2.1.	Preparación de la estructura	89
3.2.2.2.	Criterios para la selección de la sustancia acoplante	90
3.2.2.3.	Sistema de fijación	90
3.2.3.	Determinación de la reproductibilidad de la respuesta acústica del sensor	91
3.2.3.1.	Bastidor o bloque de pruebas	92

3.2.3.2.	Fuente de las señales	95
3.2.3.3.	Equipo de medición y grabación	96
3.2.4.	Verificación del desempeño del sistema de medición de AE	97
4.	DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES PARA EL ENSAYO	98
4.1.	SISTEMA MECANICO	98
4.1.1.	Descripción del sistema mecánico de presurización	98
4.1.1.1.	Zona de bombeo.	99
4.1.1.2.	Soporte de tuberías	99
4.1.1.3.	Cilindro a presión	101
4.1.2.	Descripción de los componentes del sistema mecánico	102
4.1.2.1.	Tuberías	102
4.1.2.2.	Codos	103
4.1.2.3.	Tees	104
4.1.2.4.	Buje de reducción	105
4.1.2.5.	Válvulas	105
4.1.2.6.	Mangueras	107
4.1.2.7.	Manómetro	110
4.1.2.8.	Estructura	111
4.1.2.9.	Tapas	111
4.1.2.10.	Ruedas	112
4.1.2.11.	Bomba hidráulica manual	112
4.1.2.12.	Cilindro de GLP.	113
4.2.	SISTEMA ELECTRÓNICO	114
4.2.1.	Diagrama de montaje del sistema electrónico.	114

4.2.2.	Características técnicas normalizadas de los elementos electrónicos	115
4.2.2.1.	Características normalizadas-acoplante	115
4.2.2.2.	Características normalizadas-Sensor	115
4.2.2.3.	Características normalizadas-Bus de señal	116
4.2.2.4.	Características normalizadas-Preamplificador	116
4.2.2.5.	Características normalizadas-Bus de datos	117
4.2.2.6.	Características normalizadas-Procesador de señales	117
4.2.3.	Características base del sistema electrónico extraídas de las normas	117
4.2.4.	Descripción de los componentes electrónicos adquirido para el ensayo.	118
4.2.4.1.	Nodo de Emisiones Acústicas	119
4.2.4.2.	Sensor	121
4.2.4.3.	Bus de señal-Bus de datos	122
4.2.4.4.	Transductor de presión	124
4.2.4.5.	Circuito de recepción de señal de presión	125
4.3.	Software AE Win Lite	130
4.3.1.	Iniciando con AEwin	131
4.3.2.	Configuración para la adquisición	133
4.3.2.1.	Standard channel setup	133
4.3.2.2.	Advance Channel setup	134
4.3.2.3.	Data set/parametrics	137
4.3.2.4.	Parametric setup	139
4.3.3.	Adquisición de datos	140
4.3.3.1.	Acquire	140

4.3.3.2.	Replay	141
4.3.3.3.	Corrida del ensayo	142
4.3.4.	Graficacion en AEwin	143
4.3.5.	Menú de utilidades	147
4.3.5.1.	Statistics	147
4.3.5.2.	Link separate data files	149
4.3.5.3.	Data file filter	150
5.	ENSAYO	152
5.1.	METODOLOGIA PARA EL ENSAYO	152
5.1.1.	Procedimiento	152
5.1.2.	Escenarios de ensayo	153
5.1.3.	Configuración del software	156
5.2.	DESARROLLO DE LA METODOLOGIA-RECIPIENTE FALLAS EXTERNAS	157
5.2.1.	Montaje del sistema recipiente 1	157
5.2.2.	Verificación de la respuesta acústica del sensor y desempeño del sistema recipiente 1	158
5.2.3.	Determinación del ruido de fondo recipiente 1	158
5.2.4.	Secuencias de presurización recipiente 1	162
5.2.5.	Reporte y análisis de resultados recipiente 1	165
5.2.5.1.	Resultados escenario 1	165
5.2.5.2.	Resultados escenario 2	169
5.2.5.3.	Resultados escenario 3	171
5.2.5.4.	Resultados escenario 4	174
5.2.5.5.	Resultados escenario 5	177

5.2.6. Análisis global de resultados recipiente 1	182
5.3. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA-RECIPIENTE FALLAS INTERNAS	187
5.3.1. Montaje del sistema recipiente 2	187
5.3.2. Verificación de la respuesta acústica del sensor y desempeño del sistema recipiente 2	188
5.3.3. Determinación del ruido de fondo recipiente 2	188
5.3.4. Secuencia de presurización recipiente 2	189
5.3.5. Reporte y análisis de resultados recipiente 2	191
5.3.5.1. Resultados escenario 6	191
5.3.5.2. Resultados escenario 7	195
5.3.5.3. Resultados escenario 8	197
5.3.5.4. Resultados escenario 9	199
5.3.5.5. Resultados escenario 10	201
5.3.5.6. Análisis global de resultados recipiente 2	205
6. CONCLUSIONES	208
7. OPORTUNIDADES DE INVESTIGACION Y DESARROLLO CON EL USO DE AE PARA LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	210
7.1. LOCALIZACIÓN DE FALLAS	210
7.2. ESTUDIO DE FENÓMENOS DE AGRIETAMIENTO EN MEDIOS CORROSIVOS	211
7.3. EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE TRABAJO EN UNA TUBERÍA	212
7.4. INSPECCIÓN DE FONDO DE TANQUES EN SERVICIO	212
7.5. MONITOREO DE ENFRIAMIENTO O ESTUDIO DE FUENTES TÉRMICAS	213
7.6. CARACTERIZACIÓN DEL TIPO DE FALLA	214

7.7. ENSAYOS A TRACCIÓN Y COMPRESIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN	215
7.8. INSPECCIÓN DE PUENTES	215
RECOMENDACIONES	217
BIBLIOGRAFÍA	218
ANEXOS	220

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Especificación de la tubería del sistema hidráulico	103
Tabla 2. Especificación del codo.	104
Tabla 3. Especificación de la Tee.	104
Tabla 4. Características de la válvula de bola instalada	106
Tabla 5. Especificación de la manguera de alta presión	108
Tabla 6. Características principales de la manguera de baja presión	108
Tabla 7. Descripción de los componentes de unión de las mangueras	109
Tabla 8. Características de la bomba hidráulica	113
Tabla 9. Especificación del cilindro de GLP.	114
Tabla 10. Tipos de acoplante	115
Tabla 11. Requerimientos del sensor.	115
Tabla 12. Características del cable especificadas	116
Tabla 13. Requerimientos del preamplificador	116
Tabla 14. Características del de señal del preamplificador al procesador.	117
Tabla 15. Requerimientos del procesador	117
Tabla 16. Requerimientos técnicos de los componentes electrónicos.	118
Tabla 17. Escenarios de ensayo recipiente 1	154
Tabla 18. Escenarios de ensayo recipiente 2	155
Tabla 19. Verificación de desempeño del recipiente 1.	158
Tabla 20. Estadísticas ruido de fondo.	161
Tabla 21. Estadísticas del AET en el escenario 1.	168
Tabla 22. Estadísticas del AET en el escenario2.	171
Tabla 23. Estadísticas del AET en el escenario 3.	173
Tabla 24. Estadísticas del AET del escenario 4.	176
Tabla 25. Verificación de desempeño recipiente 2.	188

Tabla 26. Estadísticas de AET en el escenario 6.	194
Tabla 27. Estadísticas de AET en el escenario 7.	196
Tabla 28. Estadísticas de AET en el escenario 8.	199
Tabla 29. Estadísticas de AET en el escenario 9.	200
Tabla 30. Estadísticas de AET en el escenario 10.	204

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ensayos de naturaleza no destructiva.	32
Figura 2. Inspección y fallas detectadas usando AE.	40
Figura 3. Imperfecciones versus método de ensayo no destructivo.	43
Figura 4. Esquema del AET.	45
Figura 5. Explicación gráfica del efecto <i>Kaiser</i> y <i>Felicity</i> .	49
Figura 6. Atenuación de la amplitud con la distancia.	51
Figura 7. Disposición del lápiz HSU y el asiento Nielsen.	53
Figura 8. Movimiento de lámina según el modo de onda.	54
Figura 9. Sensor de AE.	55
Figura 10. Certificado de calibración de sensor.	56
Figura 11. Acondicionamiento electrónico de la señal.	58
Figura 12. Definición de los parámetros de la señal AE.	59
Figura 13. Principio de la técnica de localización lineal.	63
Figura 14. Ubicación planar de la fuente de AE.	64
Figura 15. Localización por zonas de la fuente AE.	66
Figura 16. Histograma de eventos vs la posición para la localización lineal.	67
Figura 17. Gráfica de ubicación planar de la fuente de AE.	68
Figura 18. Gráfica de Localización zonal.	69
Figura 19. Gráfico de actividad, energía vs tiempo.	69
Figura 20. Visualización de la actividad acumulada.	70
Figura 21. Energía acumulada y presión del ensayo en función del tiempo.	71
Figura 22. Distribución diferencial de la amplitud.	72
Figura 23. Distribución acumulada de la amplitud.	72

Figura 24. Diagramas de dispersión de los eventos y sus características.	73
Figura 25. Formas de onda en el dominio del tiempo y la frecuencia.	74
Figura 26. Configuración con sensor unido a la estructura del cabezote soldador.	78
Figura 27. Representación de la actividad acústica de 3 fuentes.	80
Figura 28. Ubicación de los sensores.	82
Figura 29. Secuencia de presurización para recipientes nuevos.	85
Figura 30. Secuencia de presurización para recipientes en servicio.	86
Figura 31. Criterios de evaluación posterior al ensayo.	88
Figura 32. Detalles geométricos del bastidor <i>conical block</i> .	93
Figura 33. Bastidor <i>gas jet test block</i> .	94
Figura 34. Bastidor <i>Acrylic polymer rod</i> .	94
Figura 35. Asiento <i>Nielsen</i> .	95
Figura 36. Factores que afectan el desempeño del sistema AE.	97
Figura 37. Subdivisión del sistema mecánico de presurización.	99
Figura 38. Elementos de la zona de bombeo.	100
Figura 39. Soporte de la línea hidráulica.	100
Figura 40. Desnivel en tubería para garantizar la curva del sistema.	101
Figura 41. Cilindro de GLP, conexiones y accesorios.	101
Figura 42. Tubo de la línea hidráulica.	103
Figura 43. Codo implementado en línea hidráulica.	103
Figura 44. Tee implementada para la instalación de manómetro.	104
Figura 45. Buje de reducción de cabeza hexagonal de $\frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{4}$ ".	105
Figura 46. Válvula de bola instalada en la línea hidráulica.	106
Figura 47. Válvula antiretorno.	107
Figura 48. Disposición de las mangueras de alta y baja presión en la línea hidráulica.	107

Figura 49. Elementos de unión de la manguera de baja presión.	109
Figura 50. Elementos de fijación de la manguera de retorno a tanque.	110
Figura 51. Manómetros de la línea hidráulica.	110
Figura 52. Estructura de soporte de la línea hidráulica.	111
Figura 53. Tapas de la estructura.	111
Figura 54. Ruedas del soporte de tubería.	112
Figura 55. Bomba hidráulica manual.	112
Figura 56. Cilindro de GLP usado en el AET.	113
Figura 57. Esquema del sistema de detección, procesamiento y visualización de AE.	114
Figura 58. Nodo de adquisición de datos.	119
Figura 59. Conexiones laterales nodo de AE.	119
Figura 60. Conexiones laterales, comunicación pc y otros módulos.	120
Figura 61. Sensor de AE.	121
Figura 62. Acoplador magnético.	122
Figura 63. Bus de datos.	122
Figura 64. Conexión USB, transmisión de datos entre el nodo de AE y el ordenador.	123
Figura 65. Conexión DB9, entrada paramétrica de presión.	123
Figura 66. Transductor de presión.	124
Figura 67. Conector eléctrico Hirschmann.	125
Figura 68. Dispositivo de acondicionamiento de la señal de presión.	125
Figura 69. Fuente de tensión dual de 12Vdc.	126
Figura 70. Conexión 2 hilos del instrumento de presión.	127
Figura 71. Circuito de aislamiento y amplificación.	128
Figura 72. Pinout amplificador operacional LM324.	129
Figura 73. Circuito de aislamiento y amplificación.	129

Figura 74. Diagrama de conexión lateral.	130
Figura 75. Diagrama de conexión del Transmisor de Presión PT124B-210.	130
Figura 76. Interfaz de inicialización de AE Win Lite.	131
Figura 77. Cuadro de dialogo “Hardware setup”.	133
Figura 78. Ventana de Advance Channel Setup.	135
Figura 79. Correcto ajuste del PDT.	135
Figura 80. Heat Definition Time.	136
Figura 81. Hit lockout Time.	137
Figura 82 Valores de PDT, HDT y HLT de propósito general.	137
Figura 83. Pestaña de configuración Data Set/ Parametrics.	138
Figura 84. Pestaña Parametric Setup.	139
Figura 85. Cuadro de dialogo Data storage.	140
Figura 86. Cuadros de dialogo de la opción Replay.	141
Figura 87. Icono de adquisición de la barra de herramientas.	143
Figura 88. Distribucion del área de grafico de AEwin.	144
Figura 89. Cuadro de dialogo Graph Setup.	144
Figura 90. Tipos de graficas usadas en AEwin.	146
Figura 91. Menú de utilidades de AEwin.	147
Figura 92. Ventana de selección del archivo de entrada para las estadísticas.	148
Figura 93. Ventana de resultados de la herramienta statistics.	148
Figura 94. Ventana de selección y ordenamiento de los archivos a unir.	149
Figura 95. Cuadro de dialogo de configuración de filtros.	150
Figura 96. Grupo de filtrado .	151
Figura 97. Opciones adicionales en la interfaz de definición del filtro.	151
Figura 98. Procedimiento general del AET en este proyecto.	152

Figura 99. Falla recipiente 1.	154
Figura 100. Falla recipiente 2.	155
Figura 101. Configuración de canal de AE.	156
Figura 102. Configuración de tiempos de definición de señal.	156
Figura 103. Configuración y activación de parámetros a adquirir.	156
Figura 104. Configuración de entradas paramétricas.	157
Figura 105. Montaje del sistema, recipiente con fallas externas.	157
Figura 106. Tiempo de detección de ruido de fondo.	159
Figura 107. Duración y amplitud característica del ruido de fondo.	160
Figura 108. Energía característica del ruido de fondo.	160
Figura 109. Forma de onda ruido de fondo y AE.	161
Figura 110. Secuencia de presurización escenario 1.	162
Figura 111. Secuencia de presurización escenario 2.	163
Figura 112. Secuencia de presurización escenario 3.	163
Figura 113. Secuencia de presurización escenario 4.	164
Figura 114. Secuencia de presurización escenario 5.	164
Figura 115. Presión-energía Vs Tiempo, escenario 1.	165
Figura 116. Energía Vs tiempo, escenario 1.	166
Figura 117. Energía y hits acumulados Vs Tiempo, escenario 1.	167
Figura 118. Presión y amplitud Vs Tiempo, escenario 1.	167
Figura 119. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 1.	168
Figura 120. Energía y hits acumulados Vs Tiempo, escenario 2.	169
Figura 121. Presion-energia Vs Tiempo, escenario 2.	170
Figura 122. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 2.	170
Figura 123. Hits-energía acumulados Vs tiempo, escenario 3.	172

Figura 124. Presión-Amplitud Vs Tiempo, escenario 3.	172
Figura 125. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 3.	173
Figura 126. Presion-Energia Vs Tiempo, escenario 4.	174
Figura 127. Energía y hits acumulados Vs tiempo, escenario 4.	175
Figura 128. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 4.	176
Figura 129. Presion-Energia Vs Tiempo, escenario 5.	178
Figura 130. Energía y hits acumulados Vs tiempo, escenario 5.	178
Figura 131. Energía Vs tiempo, Escenario 5.	179
Figura 132. Actividad acumulativa escenario “a”.	180
Figura 133. Actividad acumulativa escenario “b”.	181
Figura 134. Falla de la superficie exterior del cilindro de GLP.	181
Figura 135. Comparación parámetros AE escenarios 4,5,a y b.	182
Figura 136. Actividad energética en todos los escenarios de falla del recipiente 1.	183
Figura 137. Historial de actividad acústica del cilindro 1.	185
Figura 138. Energía, hits y cuentas acumuladas en cada escenario del cilindro 1.	186
Figura 139. Montaje del sistema, recipiente con fallas internas.	187
Figura 140. Secuencia de presurización escenario 6.	189
Figura 141. Secuencia de presurización escenario 7.	189
Figura 142. Secuencia de presurización escenario 8.	190
Figura 143. Secuencia de presurización escenario 9.	190
Figura 144. Secuencia de presurización escenario 10.	191
Figura 145. Presión-Energía Vs Tiempo, escenario 6.	192
Figura 146. Energía y hits acumulados Vs Tiempo, escenario 6.	192
Figura 147. Hits acumulados Vs Presión, escenario 6.	193
Figura 148. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 6.	194

Figura 149. Presión-Energía Vs Tiempo, escenario 7.	195
Figura 150. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 7.	196
Figura 151. Energía y hits acumulados Vs tiempo, escenario 8.	197
Figura 152. Presión-Energía Vs tiempo, escenario 8.	198
Figura 153. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 8.	198
Figura 154. Presión-Energía Vs tiempo, escenario 9.	199
Figura 155. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 9.	200
Figura 156. Hits-energía acumulados vs tiempo, escenario 10.	201
Figura 157. Presión-Energía Vs tiempo, escenario 10.	202
Figura 158. Energía Vs Tiempo, escenario 10.	203
Figura 159. Distribución de Hits Vs amplitud, escenario 10.	203
Figura 160. Hits acumulados Vs Presión, escenario 10.	204
Figura 161. Actividad energética en todos los escenarios de falla del cilindro 2.	206
Figura 162. Historial de actividad acústica del cilindro 2.	207
Figura 163. Historial de actividad acústica del cilindro.	207
Figura 164. Localización de falla en esfera de GLP.	210
Figura 165. Corrosión bajo tensión tras-granular.	211
Figura 166. Corrosión intergranular.	211
Figura 167. Inspección de tubería.	212
Figura 168. Detección de fallas en tubería bajo superficie.	212
Figura 169. Tanques atmosféricos de almacenamiento.	213
Figura 170. Inspección de soldadura en tubería.	214
Figura 171. Diferentes tipos de corrosión.	214
Figura 172. Ensayo a tensión de probetas de hormigón.	215
Figura 173. Inspección de puentes.	216

LISTAD DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Código ASME sección V artículo 12.	220
Anexo B. Certificados de calidad	229
Anexo C. Planos de montaje del sistema mecánico de presurización.	237
Anexo D. Certificado de calibración del sensor WSA.	245
Anexo E. Guía de instalación del software AE Win lite.	246
Anexo F. Artículo del proyecto	250

RESUMEN

TITULO: DETECCIÓN DE FALLAS EN UN RECIPIENTE SOMETIDO A PRESIÓN IMPLEMENTANDO LA TECNOLOGÍA DE EMISIONES ACÚSTICAS*

AUTORES: CARLOS ANDRES GALVIS GELVIS

SERGIO ALEXANDER PEÑALOZA PEÑA**

PALABRAS CLAVES: Emisiones acústicas, cilindro de GLP, integridad estructural.

DESCRIPCION

A nivel nacional, para evaluar la condición estructural del cilindro se realizan pruebas hidrostáticas, bajo estándares propios, tal como la NTC 522-1, sin embargo en países líderes en innovación se ha reemplazado dicha técnica de inspección, por la tecnología de emisiones acústicas (AE), ya que brinda mejores beneficios económicos, así como mayor información sobre la integridad del material, y finalmente porque reduce la contaminación en el mismo tras la inspección, pues la presurización del cilindro se hace con nitrógeno o con la sustancia que actualmente contiene.

La implementación de esta tecnología se realiza de mejor manera siguiendo las pautas establecidas en diferentes entes internacionales como la ASME y la ASTM, es así que se han desarrollado múltiples investigaciones para el monitoreo de recipientes a presión en todas las escalas de la industria global, lográndose evaluar la integridad estructural de cilindros, fabricados en acero, así como cilindros con materiales compuestos, y esferas de almacenamiento de gas vitales en refinerías. En el presente trabajo se ha implementado la técnica de AE durante un a prueba hidráulica de presión, con el fin de monitorear la actividad acústica que ofrecen dos cilindros de GLP, los cuales se someten a 5 escenarios de falla, que se diferencian principalmente por ir incrementando la severidad del daño en dichos recipientes.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de ingeniería Mecánica. Director Ing. Jabid Eduardo Quiroga

ABSTRACT

TITULO: PRESSURE VESSEL'S FAILURE DETECTION USING ACOUSTIC EMISSION TECHNOLOGY*

AUTHORS: CARLOS ANDRES GALVIS GELVIS

SERGIO ALEXANDER PEÑALOZA PEÑA**

KEY WORDS: Emisiones acústicas, cilindro de GLP, integridad estructural.

DESCRIPTION

At local level, to evaluate the structural health condition of a vessel, some hydrostatics testing have to be done, these tests are made guided from standards as NTC 522-1, however in several innovation leaders countries, hydrostatic tests have been replaced by the technology of Acoustic Emission (AE), because of its higher economic benefits, besides its possible to get more information about the material integrity, and finally after implementing this technique no contamination is expected, because the pressurization of the cylinders can be done using gases as nitrogen or the same substance that fills in during service the vessel.

The implementation of this technology gets its best performance when using the international standards available, as provided by either ASME or ASTM, thus several research about monitoring the structural integrity of vessels, have been developed in multiples scales of industry, i.e. inspection of cylinders made of steel, with composite materials, different kind of reactors, and spheres in many refineries. The present job involves the implementation of acoustic emission testing during a hydraulic pressure proof, in order to monitor the acoustic activity that two (2) LPG cylinders offer. These cylinders are inspected in five different failure sceneries; each one particularly is defined by the severity of the failure imposed to the cylinders.

* Degree work

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering, Directress: Engineer Jabid Eduardo Quiroga.

INTRODUCCION

La integridad estructural de recipientes sometidos a presión, es asunto de interés para investigadores de múltiples disciplinas, los cuales buscan conservar el buen estado de los activos en la industria, realizando como parte de un plan de mantenimiento, inspecciones que se adecuan a los daños, y detectando en el momento oportuno, defectos que puedan comprometer el correcto funcionamiento de los equipos.

A través de la historia, se han desarrollado técnicas que permiten identificar daños en estructuras como esferas y grandes cilindros de GLP, reactores, tanques y tuberías, por tal motivo, con el fin de contextualizar las ideas, se hace una descripción breve de los ensayos no destructivos más usados en la industria actual en Colombia, incorporando a esta lista la detección de fallas mediante el uso de la tecnología de emisiones acústicas, y de esta manera, introducir conceptos teóricos sobre dicha tecnología que se usaran más adelante durante todo el desarrollo del libro.

Se toma como patrón de referencia para la examinación de dos cilindros de GLP la norma ASME, *Boiler and Pressure Vessel Code*, y apoyándose en otras guías como las ASTM E-976 y 2374, se especifican pasos claves en el procedimiento que ayudan al correcto desenlace de la prueba, así como también, se extrae información importante para la correcta selección y adquisición, de un equipo de detección de actividad microsísmica y el montaje idóneo de un banco para la realización del ensayo.

Para la prueba son planteados diez escenarios, cinco de ellos para observar el comportamiento de un tanque al ir aumentando la severidad de una falla impuesta en su exterior, y los otros cinco, simulando daños en el interior de un segundo recipiente. Adicionalmente, se cuantifican los valores asociados a cada uno de los

escenarios para posteriormente hacer un tratamiento gráfico de los mismos y obtener una interpretación amplia del fenómeno de estudio.

La implementación de la técnica de emisiones acústicas permitió detectar los cambios impuestos sobre la estructura de los recipientes bajo prueba observándose patrones que caracterizaban la actividad. Fueron estudiados fenómenos como el efecto *Kaiser* y *Felicity* y se concluyó que la evolución de la actividad microsísmica durante los diferentes escenarios de falla tanto para el cilindro con daños internos como para el recipiente con defectos externos, determina la integridad estructural del mismo, es así como se hace posible, la detección temprana de presencia de fallas que comprometen seriamente la integridad estructural del recipiente.

Finalmente se plantean algunos casos de estudio que proporcionan oportunidades de investigación de la tecnología como aporte tangible al desarrollo de la industria colombiana.

1. INTRODUCCION A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos, NDT¹, tienen como propósito detectar imperfecciones o discontinuidades, superficiales o internas, en materiales, soldaduras, partes y componentes, sin alterar de forma permanente propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de estos.

Los ensayos son realizados bajo procedimientos escritos, que atienden a los requisitos de las principales normas o códigos tales como la ASME², ASTM³, entre otras.

Los inspectores son calificados por la ASNT⁴, según los requisitos de la práctica recomendada.

Algunos NDT se organizan a continuación:

Pruebas No Destructivas Superficiales

- ✓ VT-Inspección visual
- ✓ PT-Líquidos penetrantes
- ✓ MT-Partículas magnéticas
- ✓ ET-Electromagnetismo

Pruebas No Destructivas Volumétricas

- ✓ RT-Radiografía industrial
- ✓ UT-Ultrasonido
- ✓ LT-Fugas
- ✓ *AE-Emisiones acústicas*

¹ NDT: *Nondestructive testing.*

² ASME: *American Society of Mechanical Engineers.*

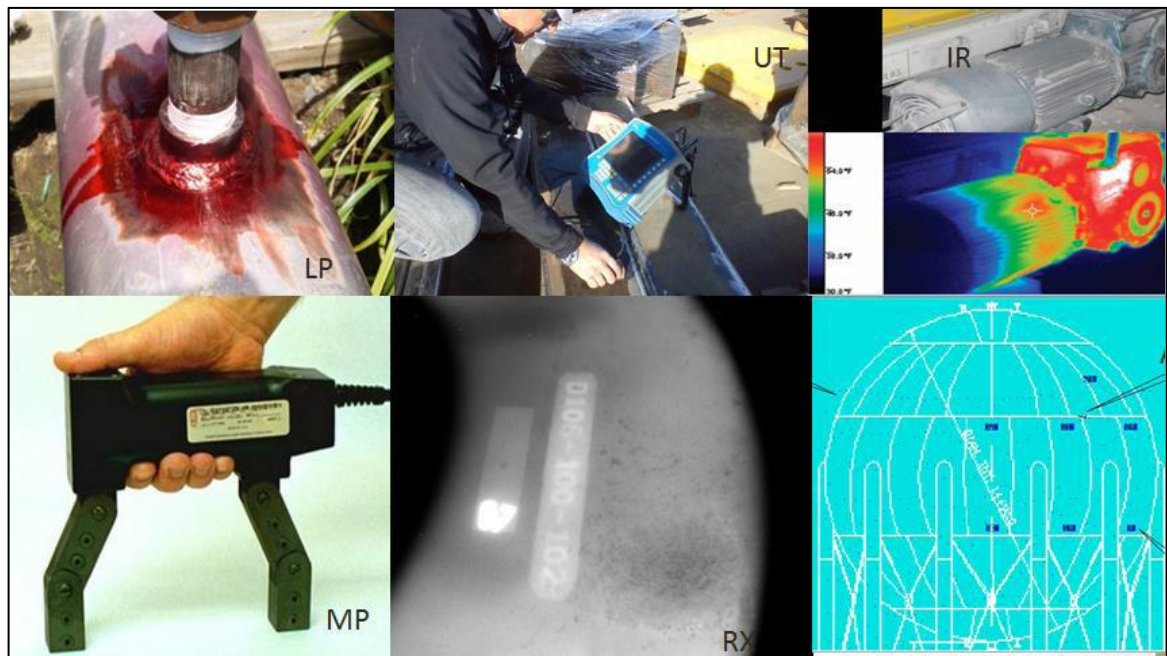
³ ASTM: *American society for Testing and Materials.*

⁴ ASNT: *American Society for Non-destructive Testing*

Otros ensayos no destructivos son:

- ✓ Análisis de aceite
- ✓ Análisis de vibraciones
- ✓ Análisis de ruido
- ✓ Inspección de soldaduras
- ✓ Termografía
- ✓ Ensayos de integridad en pilotes
- ✓ Impedancia mecánica en cimentaciones profundas

Figura 1. Ensayos de naturaleza no destructiva.



Fuente: <http://ingerad.com.co/services3.php>, modificado por los autores.

1.1. INSPECCION VISUAL

Este procedimiento se realiza a todos los niveles industriales, es indispensable la agudeza visual de un inspector, experiencia y sólidos conocimientos técnicos que permitan analizar y emitir recomendaciones confiables.

Aplicaciones

La inspección visual es aplicable en la amplia gama de equipos dinámicos y estáticos (operación y fuera de servicio) que requieren el análisis preliminar e interpretación previa, antes de recurrir a otro método de ensayo no destructivo. Además de utilizar como herramienta básica el sentido de la vista, se complementa con otros sentidos humanos como el tacto, olfato y oído, apoyándose muchas veces en equipos e instrumentos de magnificación, iluminación y medición.

Ventajas

- ✓ Amplio alcance
- ✓ Todo puede ser inspeccionado
- ✓ Bajo costo
- ✓ Equipos sencillos

Desventajas

- ✓ Es necesario el acceso al punto de inspección
- ✓ La inspección es superficial
- ✓

1.2. ULTRASONIDO

Ondas sonoras de alta frecuencia entre 0.5 y 25 [MHz] se introducen en el material para detectar discontinuidades superficiales e internas, esta técnica es basada en las propiedades de propagación reflexión y refracción de las ondas ultrasónicas.

Aplicaciones

Se usa para detectar discontinuidades en los materiales y medir espesores. Detectar el avance de corrosión y determinar propiedades físicas como el modulo elástico e inclusiones en el material son otras actividades realizadas con esta técnica.

Ventajas

- ✓ Permite detectar discontinuidades profundas en el material
- ✓ Rapidez
- ✓ Portabilidad de equipos
- ✓ Alta sensibilidad
- ✓ Solo se requiere acceso a una de las superficies

Desventajas

- ✓ Alto conocimiento técnico para determinar el tamaño de las discontinuidades
- ✓ Difícil de aplicar en superficies rugosas, irregulares, pequeñas y con poco espesor
- ✓ La sensibilidad del instrumento de medición disminuye al aumentar el espesor

1.3. PARTICULAS MAGNETICAS

Consiste en la aplicación de partículas magnéticas (usualmente limadura de hierro) en la superficie de una pieza que ha sido magnetizada. Una discontinuidad en la superficie o cercana a ella, distorsionará las líneas magnéticas de fuerza haciendo que se produzca una fuga del campo magnético que va a atraer las partículas de hierro aplicadas sobre él de manera proporcional a su concentración, indicando de esta manera una falla o discontinuidad.

Aplicaciones

se puede utilizar para todo tipo de metales ferrosos, tales como acero al carbón, acero de baja aleación y hierro fundido, piezas forjadas, cordones de soldadura, ganchos, engranajes de grúa, etc. El uso principal de la prueba de partículas magnéticas se focaliza en soldaduras y zonas afectadas por acción del calor y presiones localizadas.

Ventajas

- ✓ Se pueden inspeccionar piezas en serie
- ✓ Más económica que la inspección por líquidos penetrantes
- ✓ Portabilidad, adaptabilidad del equipo a la situación
- ✓ Indica localización, tamaño y forma de las discontinuidades

Desventajas

- ✓ Solo es aplicable en materiales ferromagnéticos
- ✓ No es efectivo en el análisis interno de piezas
- ✓ Alcance de 6 mm de profundidad en el material
- ✓ Las características de la superficie pueden reducir la efectividad del método
- ✓ Es un método local y no global para piezas grandes

1.4. LIQUIDOS PENETRANTES

Se basa en el fenómeno de absorción de un líquido por efecto de la acción capilar en discontinuidades tales como fisuras, solapes, grietas y porosidades. Permite detectar discontinuidades que afloran a la superficie de materiales sólidos no porosos.

Aplicaciones

Inspección de piezas aeronáuticas, vajillas de uso doméstico, materiales metálicos, cerámicos, vidriados, plásticos, porcelanas, recubrimientos electroquímicos, laminados, material de fundición, forjados y soldaduras, entre otros.

Ventajas

- ✓ Económico
- ✓ Una vez aplicados los químicos, tintes y reveladores la inspección es visual
- ✓ Resultados inmediatos

Desventajas

- ✓ La pieza a inspeccionar debe tener una temperatura dentro de un rango determinado
- ✓ La superficie no puede ser porosa ni absorbente
- ✓ Solo sirve para detectar discontinuidades superficiales

1.5. RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Es un método de inspección que sirve para detectar defectos internos en los materiales de piezas metálicas de fundición, forjas, partes maquinadas, recipientes a presión, estructuras de puentes, edificios, industria de hidrocarburos y petroquímica e industria alimenticia. El principio de esta técnica consiste en que cuando la energía de los rayos X o gamma atraviesa una pieza, sufre una atenuación que es proporcional al espesor, densidad y estructura del material inspeccionado, con esto se produce una imagen que es analizada por personal capacitado en esta técnica.

Aplicaciones

Medición de espesores en procesos de alta temperatura, determinación de densidades en procesos de producción continua, nivel de fluidos, control de calidad de productos soldados, fundiciones, forja, detección de defectos internos microscópicos tales como grietas, socavados, falta de fusión, entre otros.

Ventajas

- ✓ Puede usarse en muchos materiales
- ✓ Revela discontinuidades estructurales y errores de ensamble
- ✓ Es fácil identificar el tipo de discontinuidad que se detecta
- ✓ Es un excelente medio de registro de inspección

Desventajas

- ✓ Las piezas de inspección deben tener acceso por dos lados
- ✓ No detecta discontinuidades de tipo laminar
- ✓ Requiere el cumplimiento de estrictas normas de seguridad
- ✓ Requiere personal altamente calificado
- ✓ Requiere de un arreglo para la prueba y equipos especializados

1.6. EMISIONES ACUSTICAS

Son un método de inspección no destructivo, poco invasivo que se usa actualmente en diversas industrias como la energética y la petroquímica, con el objetivo de detectar y localizar fallas estructurales, discontinuidades, micro fisuras, erosión y corrosión en componentes mecánicos y materiales de las más variadas piezas.

Se basa en el estudio de un fenómeno que genera ondas elásticas transitorias por la liberación rápida de energía a partir de fuentes localizadas en un material, estas fuentes podrían ser fallas, micro grietas o imperfecciones relacionadas con la corrosión entre otros problemas de la industria.

La emisión acústica se basa en la detección y conversión de ondas elásticas de alta frecuencia en señales eléctricas, esto se logra con el acoplamiento de transductores piezoeléctricos en la superficie de la estructura bajo prueba y sometida a carga, estas señales son procesadas por un equipo electrónico adecuado y evaluadas por personal especializado.

1.6.1. Aplicaciones

Las emisiones acústicas son un procedimiento para detectar fallas en materiales, sus aplicaciones son variadas y aun son caso de estudio, entre ellas podemos encontrar; evaluación de estructuras, pruebas de carga, estudios de corrosión, pruebas de materiales avanzados, control de calidad de producción, detección de

fallas incipientes por fatiga en componentes estructurales de aeronaves , control de agrietamiento de soldaduras durante el proceso de enfriamiento, estudio del comportamiento de los materiales a alta temperatura, monitoreo de tuberías, prueba de vagones cisterna, aplicaciones médicas y componentes electrónicos entre otros usos.

Originalmente fue concebida como NDT para examinar recipientes sometidos a presión, pero con el tiempo se ha convertido en una tecnología mucho más amplia.

Ahora se aplica a todos los tipos de control de procesos, así como para sus propósitos originales de detección de fallas e integridad estructural. La tecnología se utiliza para proteger contra fallas catastróficas. En el lado de control de procesos, AE se utiliza para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la detección de fugas, diagnostico predictivo, impactos de partículas, descargas eléctricas y una variedad de procesos tipo fricción, mas aplicaciones se describen a continuación:

En el comportamiento de los materiales (metales, cerámicas, compuestos, rocas, hormigón):

- ✓ La propagación de grietas
- ✓ Fatiga
- ✓ Corrosión, corrosión bajo tensión
- ✓ Deformación por fluencia lenta
- ✓ Fractura de fibra, de laminación

En ensayos no destructivos durante los procesos de fabricación:

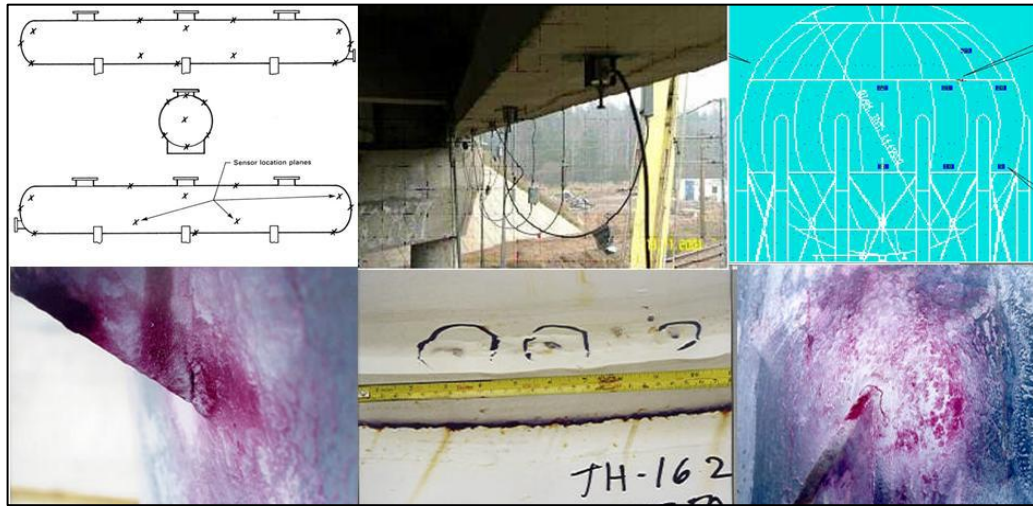
- ✓ Material de procesamiento
- ✓ Fase de transformación de metales y aleaciones (transformación martensítica)

- ✓ Detección de defectos tales como poros, grietas de temple, inclusiones, etc.
- ✓ Fabricación
- ✓ Deformación procesos; laminación, forja, extrusión
- ✓ Soldadura y soldadura fuerte, detección (inclusiones, grietas, falta de penetración)
- ✓ TIG, MIG, punto, haz de electrones, etc.
- ✓ Monitoreo de soldadura para el control de procesos

En estructuras de vigilancia

- ✓ El monitoreo continuo (estructuras metálicas, minas, etc.)
- ✓ Las pruebas periódicas (recipientes a presión, tuberías, puentes, cables)
- ✓ Detección parte suelta
- ✓ Detección de Fugas
- ✓ En las inspecciones de campo
- ✓ Evaluación de la integridad estructural
- ✓ Prueba de tanques [ambiente, caliente o criogénico, metálicos y fibra de vidrio, esferas]
- ✓ Pruebas de suelo de tanque
- ✓ Componentes inspección Nuclear (válvulas, vigas de elevación, líneas de vapor)
- ✓ Detección de la corrosión
- ✓ Pruebas de líneas de tubería
- ✓ Tanque cisterna
- ✓ Remolques de tubos y cilindros de gas de alta presión
- ✓ Reactores y prueba de tuberías de alta energía
- ✓ Evaluación de envejecimiento en aviones
- ✓ Ensayo de materiales Avanzados (composites, cerámicas)
- ✓ control de calidad de producción
- ✓ pruebas a bloques de motor

Figura 2. Inspección y fallas detectadas usando AE



Fuente: pndmx.comze.com/articulos/AE_soldadura_2001.pdf, modificada por los autores.

1.6.2. Ventajas y desventajas

Ventajas

- ✓ Evaluación de tipo global, Detecta evolución de la falla , Detección temprana
- ✓ Versatilidad, portabilidad
- ✓ Monitoreo continuo, Monitoreo en tiempo real
- ✓ Sensibilidad a cualquier material
- ✓ Monitoreo en condiciones de funcionamiento o parada de planta
- ✓ Los defectos hacen su propia señal
- ✓ Detecta problemas relacionados con fatiga
- ✓ Bajo costo, Localización de la falla
- ✓ aplicaciones de Inteligencia Artificial (AI) y Sistemas expertos para evaluar la condición de los sistemas metálicos sometidos a presión.

Desventajas

- ✓ Requiere personal capacitado
- ✓ El ruido de fondo puede alterar la prueba

1.7. IMPERFECCIONES VERSUS METODO DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO

La figura 3 muestra imperfecciones comunes capaces de ser detectadas por métodos de ensayos no destructivos, debe ser usada como una guía general solamente y no como un requisito para aplicar una determinada técnica.

1.8. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS - IMPACTO A NIVEL LOCAL

El empleo de la tecnología de detección de discontinuidades mediante AE en la ingeniería, radica de la necesidad de pruebas no destructivas como las anteriormente mencionadas a materiales, en elementos, maquinas, estructuras y recipientes en procesos productivos llevados a cabo a nivel local en la industria energética, alimenticia y manufacturera. La importancia de detectar discontinuidades se debe a la oportunidad de descubrir fallas en materiales, lo que da posibilidad de ejecutar acciones para evitar la pérdida de activos indispensables en la producción.

El crecimiento científico producto de la inversión en investigación, la innovación y la implementación de nuevas tecnologías producto de las anteriores premisas, determina en buena medida la economía de un país, por esta razón, nuevas técnicas fruto del dinamismo global deben ser adoptadas y sometidas a estudio para su aplicación a nivel local, contribuyendo de esta manera en el desarrollo continuo de programas de mantenimiento especializados en industrias como la energética y la petroquímica que son de gran importancia para la economía de nuestra región santandereana.

Santander camina hacia el mantenimiento predictivo de sus procesos ya que con esta filosofía y su implementación se permite proteger la integridad mecánica de

los activos de muchas empresas reduciendo elevados costos de mantenimientos correctivos y tiempos muertos en procesos productivos muy costosos, lo que convierte a la tecnología de detección de fallas mediante emisiones acústicas en una solución, en una oportunidad, en una herramienta necesaria para la realización y renovación de actividades que brinden el beneficio industrial necesario y de esta manera fomentar la creación de empresas y desarrollo de nuevas prácticas que enriquezcan las bases intelectuales con las que se trabaja y se construye mas país desde nuestra región.

Figura 3. Imperfecciones versus método de ensayo no destructivo

IMPERFECTION VS TYPE OF NDE METHOD									
	Surface [Note (1)]		Sub-surf. [Note (2)]		Volumetric [Note (3)]				UTT
	VT	PT	MT	ET	RT	UTA	UTS	AE	
Service-Induced Imperfections									
Abrasive Wear (Localized)	●	○	○	...	●	○	○	...	○
Baffle Wear (Heat Exchangers)	●	○
Corrosion-Assisted Fatigue Cracks	○	○	●	...	○	●	...	●	...
Corrosion -Crevice	●	○
-General / Uniform	○	○	...	○	...	●
-Pitting	●	●	○	...	●	○	○	○	○
-Selective	●	●	○	○
Creep (Primary) [Note (4)]
Erosion	●	●	○	○	...	○
Fatigue Cracks	○	●	●	○	○	●	...	●	...
Fretting (Heat Exchanger Tubing)	○	○	○
Hot Cracking	...	○	○	...	○	○	...	○	...
Hydrogen-Induced Cracking	...	○	○	...	○	○	...	○	...
Intergranular Stress-Corrosion Cracks	○
Stress-Corrosion Cracks (Transgranular)	○	○	●	○	○	○	...	○	...
Welding Imperfections									
Burn Through	●	●	○	○
Cracks	○	●	●	○	○	●	○	●	...
Excessive/Inadequate Reinforcement	●	●	○	○	...	○
Inclusions (Slag/Tungsten)	○	○	○	○	○	○	...
Incomplete Fusion	○	...	○	○	○	●	○	○	...
Incomplete Penetration	○	●	●	○	●	●	○	○	...
Misalignment	●	●	○
Overlap	○	●	●	○	...	○
Porosity	●	○	○	...	●	○	○	○	...
Root Concavity	●	●	○	○	○	○
Undercut	●	○	○	○	●	○	○	○	...
Product Form Imperfections									
Bursts (Forgings)	○	●	●	○	○	○	○	●	...
Cold Shuts (Castings)	○	●	●	○	●	○	○	○	...
Cracks (All Product Forms)	○	●	●	○	○	○	○	○	...
Hot Tear (Castings)	○	●	●	○	○	○	○	○	...
Inclusions (All Product Forms)	○	○	●	○	○	○	...
Lamination (Plate, Pipe)	○	○	○	○	○	○	●
Laps (Forgings)	○	●	●	○	○	...	○	○	...
Porosity (Castings)	●	●	○	...	●	○	○	○	...
Seams (Bar, Pipe)	○	●	●	○	○	○	○	○	...
Legend: AE – Acoustic Emission UTA – Ultrasonic Angle Beam ET – Electromagnetic (Eddy Current) UTS – Ultrasonic Straight Beam MT – Magnetic Particle UTT – Ultrasonic Thickness Measurement PT – Liquid Penetrant VT – Visual RT – Radiography ● – All or most standard techniques will detect this imperfection under all or most conditions. ○ – One or more standard technique(s) will detect this imperfection under certain conditions. ○ – Special techniques, conditions, and/or personnel qualifications are required to detect this imperfection.									
GENERAL NOTE: Table A-11 lists imperfections and NDE methods that are capable of detecting them. It must be kept in mind that this table is very general in nature. Many factors influence the detectability of imperfections. This table assumes that only qualified personnel are performing nondestructive examinations and good conditions exist to permit examination (good access, surface conditions, cleanliness, etc.).									
NOTES: (1) Methods capable of detecting imperfections that are open to the surface only. (2) Methods capable of detecting imperfections that are either open to the surface or slightly subsurface. (3) Methods capable of detecting imperfections that may be located anywhere within the examined volume. (4) Various NDE methods are capable of detecting tertiary (3rd stage) creep and some, particularly using special techniques, are capable of detecting secondary (2nd stage) creep. There are various descriptions/definitions for the stages of creep and a particular description/definition will not be applicable to all materials and product forms.									

Fuente: ASME sección V.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS DE LAS EMISIONES ACUSTICAS

2.1. HISTORIA Y DESARROLLO.

La palabra acústica se deriva del griego “*akoustikos*” que se refiere a oír. Varios textos en el siglo XIX mencionaron que algunos materiales como el hierro, cadmio y el zinc “hablaban” en diferentes escenarios de utilización. Por ejemplo Albert Portevin y Francois Le Chatelier observaron emisiones acústicas (AE) en una aleación de AL-Cu-MN (aluminio-cobre-manganeso) que se encontraba bajo tensión. Los siguientes 20 años trajeron verificaciones sobre el tema tras los trabajos desarrollados por Robert Anderson⁵, sin embargo, el gran acontecimiento ocurrió en los 50’s tras la realización de la tesis de PhD del señor Joseph *Kaiser*, titulada “Resultados y conclusiones de medidas de sonidos en materiales metálicos bajo esfuerzos de tensión”. En efecto, posterior al estudio de *Kaiser*, Bradbord Schofield inició el primer programa de investigación en los Estados Unidos para buscar aplicaciones de AE en ingeniería de materiales. Es por esto que la investigación de *Kaiser* es reconocida generalmente como el punto de inicio de los ensayos con emisiones acústicas o AET⁶.

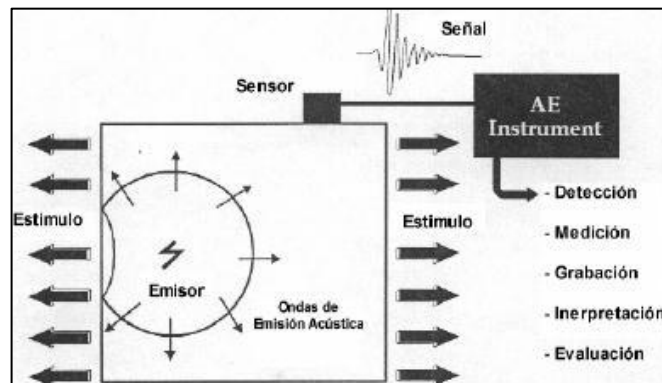
2.2. PRINCIPIO DEL AET

Al ser estimulados los componentes a inspeccionar se conduce a que sus discontinuidades liberen energía, que viaja en forma de ondas elásticas de alta frecuencia conocidas como AE. Posteriormente, los sensores (transductores) que se encuentran en contacto con el material captan la señal acústica convirtiéndola en una señal de voltaje, la cual es amplificada electrónicamente, y almacenada en una base de datos por una tarjeta electrónica, para un posterior análisis. El esquema del AET se muestra en la figura 4

⁵ Ensayo de tensión de una aleación de aluminio bajo su punto fluencia por Robert Anderson.

⁶ AET: *Acoustic Emission Testing*

Figura 4. Esquema del AET



Fuente: http://www.tecnologiatotal.net/Paper_EA.pdf.

2.3. CADENA ESTRUCTURAL DEL AET

La cadena la cual representa la estructura del AET está compuesta por seis eslabones principales, los cuales se referencian a continuación:

- La Fuente AE.
- La propagación de la onda.
- El sensor
- El acondicionamiento electrónico.
- Técnicas de localización de la falla
- La visualización de los datos.
- Interpretación de la información.

2.3.1. Fuentes de AE

Se define como el origen físico de uno más eventos de AE. Siendo un evento un cambio local en el material que da vida a la emisión. Se distinguen tres clases de fuentes AE y el ruido que se puede interpretar de la misma manera.

2.3.1.1. Cambios micro estructurales

El proceso de AE comienza con el esfuerzo, en respuesta a este, la microestructura del material cambia de forma; primero ocurre la deformación elástica, y si el esfuerzo supera el límite de fluencia, el material se deforma plásticamente lo cual involucra un cambio permanente en la posición relativa de los átomos de la estructura del material, profundizando, ocurre el deslizamiento de los planos atómicos (uno sobre otro), a través de irregularidades conocidas como dislocaciones, finalmente, tal acomodamiento micro estructural libera energía la cual se asocia a una AE.

2.3.1.2. Actividad de materiales incrustados

Existen inclusiones no metálicas entre la estructura granulométrica, tal como el sulfuro de manganeso formado durante el rolado de las láminas metálicas, o como las inclusiones de escoria que se obtienen al soldar, también la adhesión de productos no metálicos altamente corrosivos a la superficie del elemento al ponerse en contacto con el ambiente; Los componentes mencionados son menos dúctiles y resistentes que el material metálico base, como resultado se rompen más fácil y de manera espontánea cuando el material es sometido a tensión, liberando energía y convirtiéndose en una fuente de AE.

2.3.1.3. Grietas

Cuando se agrieta un material, aparece la fuente principal de AE. Es decir, la aparición de una grieta crea una nueva superficie, lo cual es considerado la mayor amenaza a la integridad estructural y reconocida como la fuente de emisiones con mayor amplitud (lo cual facilita su detección). Al someter a tensión un material que posee una grieta, dicha imperfección va a tender a separar las superficies que la conforman, liberando la energía almacenada en el campo elástico de esfuerzos que se crean a partir de la carga estructural. De tal manera que, dicha energía

viajará a través del material como una onda *elástica*, de gran variedad de frecuencias, desde muy bajas hasta el orden de los 1000kHz.

Complementariamente, se enuncia que la cantidad de energía liberada con una AE, y la amplitud de la onda resultante dependen del tamaño y la velocidad del evento que las generó, por consiguiente, se considera teóricamente que la amplitud de la AE es proporcional al área de la nueva superficie creada, así mismo es proporcional a la velocidad de la ruptura (agrietamiento). Es decir, Un evento casi instantáneo (discreto) producirá una señal⁷ más grande que uno lento.

2.3.1.4. Ruido

Ruido en AET significa una señal indeseable. Los tipos principales de fuentes de ruido acústico, son la fricción y el impacto, que resultan de diversas causas ambientales. Las fuentes por fricción son alimentadas por el movimiento de componentes entre sí por ejemplo tornillos sueltos; por otro lado las fuentes de ruido por impacto incluyen la lluvia, el polvo y partículas suspendidas en el aire que chocan el elemento a inspeccionar, finalmente dependiendo al contexto se identifican fuentes de ruido asociadas a vibraciones mecánicas.

Es posible eliminar el ruido de tres maneras:

- ✓ Seleccionando una apropiada estrategia de ensayo y configurando la instrumentación.
- ✓ Identificar y manualmente eliminar las fuentes de ruidos perceptibles.
- ✓ Reconociendo y removiendo las indicaciones de ruidos, filtrado tras la adquisición de la señal.

⁷ Señal corresponde al mensaje eléctrico proveniente del elemento transductor y que es enviado al equipo de acondicionamiento electrónico.

2.3.1.5. Actividad de la fuente AE tras la carga estructural

Las AE ocurren en locaciones donde el esfuerzo puntual es lo suficientemente fuerte como para causar nuevas deformaciones permanentes; esto a menudo ocurre en los concentradores de esfuerzo, por ejemplo, soldaduras, cambios de sección y discontinuidades estructurales en general.

Cuando un material se deforma y emite energía, la deformación tiende a aliviar el gran esfuerzo localizado, es decir, la carga tiende a transferirse a otra parte de la estructura, esto trae un efecto estabilizante, sin embargo, si la estructura se libera de la carga y luego es cargada nuevamente al mismo nivel previo, las regiones que en primera instancia se deformaron tenderán a ser estables la segunda vez. No obstante, cuando se presentan defectos significativos estos tienden a emitir antes de la carga máxima previa. Por lo tanto, se desprenden dos conceptos asociados a la respuesta del material tras la carga estructural, y son conocidos ampliamente como el efecto *Kaiser* y el efecto *Felicity*.

✓ Efecto *Kaiser*

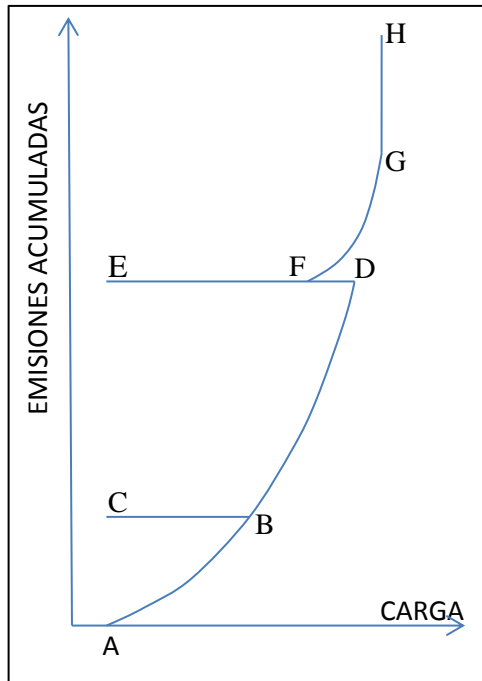
Se define como el fenómeno de generación de AE hasta que la carga impuesta en el material supere la carga máxima previa a la cual fue sometido. Este concepto, se puede observar en la figura 5, donde en la medida que se aumenta inicialmente la carga (segmento AB), se acumulan eventos de AE, luego al retirar la carga y aplicarla nuevamente (segmento BCB), los eventos de AE no ocurren de nuevo, en otras palabras, se mantiene constante el número de eventos, hasta que la carga impuesta en el material es incrementada nuevamente (segmento BD).

✓ Efecto *Felicity*

Ahora bien, tomando como referencia la figura 5, al repetir la disminución de carga (segmento DE), e iniciar su aumento se observa según el segmento EF que aparecen nuevas AE en un punto previo (F) a la carga máxima previa (D), este

efecto es conocido como el efecto *Felicity* y puede cuantificarse usando la proporción entre la carga donde aparecen nuevamente las AE y la carga máxima aplicada.

Figura 5. Explicación gráfica del efecto *Kaiser* y *Felicity*



Fuente. NDT Handbook, modificado por los autores.

El conocimiento de los efectos *Kaiser* y *Felicity*, pueden ser utilizados para determinar la gravedad de los daños estructurales del elemento a analizar. Es así que, defectos insignificantes tienden a mostrar el efecto *Kaiser*, mientras que fallas estructuralmente significativas tienden a mostrar el Efecto *Felicity*.

2.3.2. Propagación de la onda

La propagación puede asemejarse al escenario de arrojar una piedra a un estanque. Las ondulaciones salen y se esparcen desde la fuente hasta alcanzar las orillas, reflejándose en un patrón complicado, y finalmente reduciéndose. En efecto, si un cuerpo flotara en las inmediaciones de la orilla este saltaría de arriba

a abajo, durante varios segundos, siguiendo un ritmo complicado. Así mismo este principio aplica a la propagación de las ondas AE, el corto pulso de la fuente es únicamente el comienzo del proceso AET; la diferencia principal entre las oscilaciones del ejemplo y las ondas de la AE, en una estructura, es que el proceso AE ocurre muchas veces, y más rápido. Típicamente, el movimiento de una fuente de AE es del orden de los μs ($1 * 10^{-6} s$), la onda se propaga hasta el sensor en periodo del orden de los milisegundos ($1 * 10^{-3} s$), y finalmente el movimiento se acaba al transcurrir un tiempo de centésimas de segundo ($1 * 10^{-2} s$).

Dos aspectos importantes en el proceso de propagación de la onda son la atenuación y la velocidad de la onda, los cuales se describen a continuación.

2.3.2.1. Atenuación

En la medida que la onda acústica viaja a través de la estructura, su amplitud disminuye, esto es conocido como atenuación. Universalmente, Para lograr cuantificar este fenómeno se utiliza la escala en decibeles como unidad de medida de la amplitud de la señal, gracias a que es de carácter logarítmica, condesando todo el extenso rango de las amplitudes de las AE. Técnicamente, se representa como dB_{AE} y se define como la medida logarítmica de la amplitud de la AE, referenciada a $1 \mu V$. Ahora bien, la atenuación en estructuras se debe a múltiples factores, entre los cuales se destacan, la distribución geométrica, la dispersión en los límites estructurales, y la absorción.

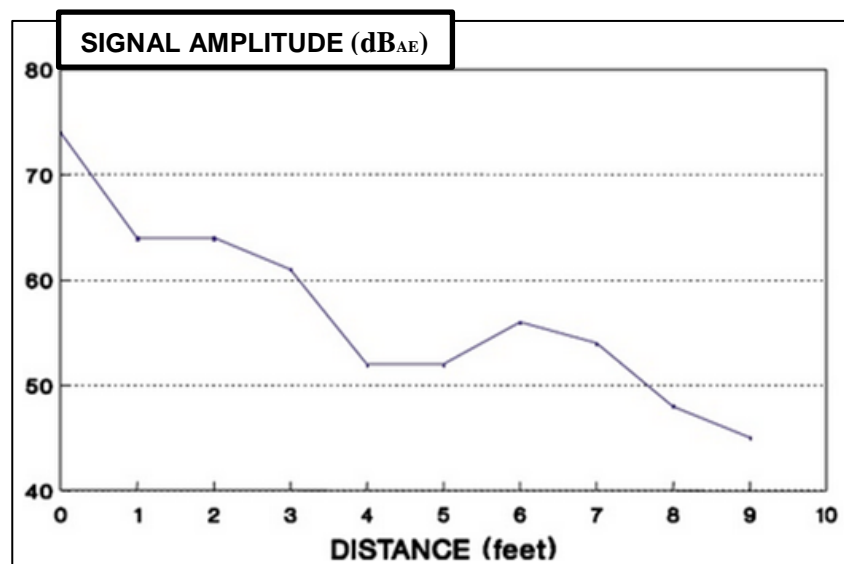
✓ Distribución geométrica

La distribución geométrica impacta en la atenuación de la onda, en términos de los límites geométricos del elemento a inspeccionar, ya que estos juegan un papel importante en la conservación de la magnitud de la amplitud, porque obliga a la onda de esfuerzo a confinarse entre estos. Por ejemplo, en una barra esbelta, la onda es canalizada y no logra difuminarse, así que la atenuación es relativamente

baja, y la onda logra viajar grandes distancias. Por el contrario, en estructuras de concreto de gran volumen la onda tiene la facilidad de esparcirse en 3 dimensiones sin restricción alguna, logrando mayor atenuación.

Adicionalmente, este mecanismo de atenuación presenta una reducción de amplitud mayor a cortas distancias. Para ejemplificar, se observa en la figura 6 que la curva cae rápidamente perdiendo un 30% de su amplitud en los primeros 4 pies, sin embargo en los 4 pies siguientes se reduce la amplitud únicamente en un 8%. Así que para cortas distancias, de unas tantas pulgadas el fenómeno en cuestión es el que más contribuye a la atenuación de la onda.

Figura 6. Atenuación de la amplitud con la distancia



Fuente: NDT Handbook.

✓ **Dispersión en límites estructurales**

La segunda mayor causa de atenuación de la onda de AE es la dispersión en los límites estructurales y discontinuidades geométricas, en otros términos el fenómeno de reflexión ondular. De hecho, siempre que una onda encuentra una discontinuidad, algo de su energía es reflejada. De tal manera que, en estructuras

con geometrías complejas donde podrían haber cambios en dirección, conexiones, concentradores de esfuerzo y otros tipos de límites, a lo largo de la ruta que comunica el sensor y la fuente AE, se pueden producir efectos considerables en la reducción de la amplitud de la onda de AE.

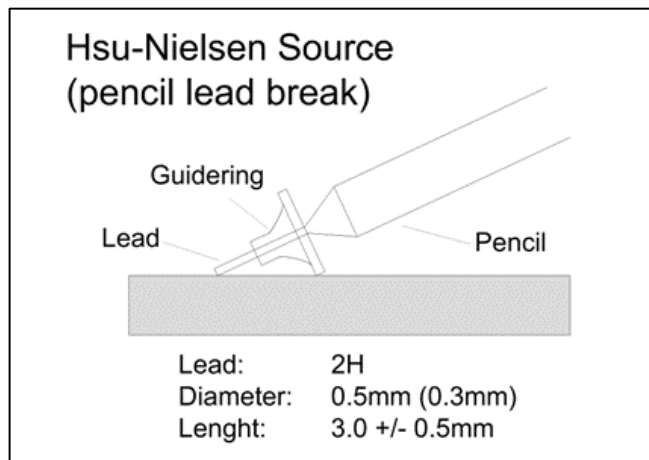
✓ **Absorción**

Finalmente la tercera causa de atenuación es la absorción, aquí las energías cinéticas y elásticas de la onda son absorbidas y convertidas en calor por el material a través del cual viaja. Dicha absorción está fuertemente relacionada con el tipo material, por ejemplo el acero absorbe muy poco a frecuencias usadas en el AET. Por el contrario, los materiales no metálicos en general, y la pintura en particular, tienden a absorber más energía que el acero; La absorción es mayor a frecuencias más altas debido a longitudes de onda más cortas. Adicionalmente, la relación reducción-amplitud/distancia por absorción se mantiene constante diferente al mecanismo por distribución geométrica, es decir, si se reducen 6 dB después de haber viajado 1 pie, al viajar 2 pies habrá una reducción de 12 dB, por lo tanto este mecanismo de atenuación es significativo cuando la fuente de AE está a grandes distancias del sensor.

✓ **Medición de la atenuación**

Para caracterizar el fenómeno de atenuación en una estructura se simula una fuente de AE; la más utilizada es la ruptura de una mina de lápiz presionada contra el elemento a inspeccionar. El lápiz HSU (nombrado igual que el desarrollador de la técnica) y el asiento Nielsen son elementos convenientes y económicos, muy valiosos en AET. En efecto, la ruptura de la mina crea un impulso localizado de corta duración, que es similar a una fuente natural de AE tal como una grieta. En la figura 7 se observa el lápiz HSU montado sobre el asiento Nielsen del cual sobresale la mina de la prueba, por otro lado, para conocer a fondo las dimensiones de estos elementos más adelante se tratara la norma.

Figura 7. Disposición del lápiz HSU y el asiento Nielsen.



Fuente: <http://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=474>

Por otro lado, el procedimiento usual para crear una curva de atenuación como el de la figura 6, se basa en la ruptura de la mina del lápiz HSU (varias veces) sobre el elemento de interés, a diferentes distancias del sensor, captando la amplitud de la AE tras cada ruptura, posteriormente se trazan en una gráfica amplitud contra distancia. De esta manera, es posible aterrizar el fenómeno de atenuación de la AE para diferentes materiales. Finalmente, la atenuación tiene grandes implicaciones en pruebas de monitoreo global donde se quiere desarrollar la inspección de toda una estructura, ya que permite, establecer el espaciamiento máximo entre el conjunto de sensores, de tal manera que no se deje de inspeccionar área alguna de la estructura.

2.3.2.2. Velocidad de la Onda

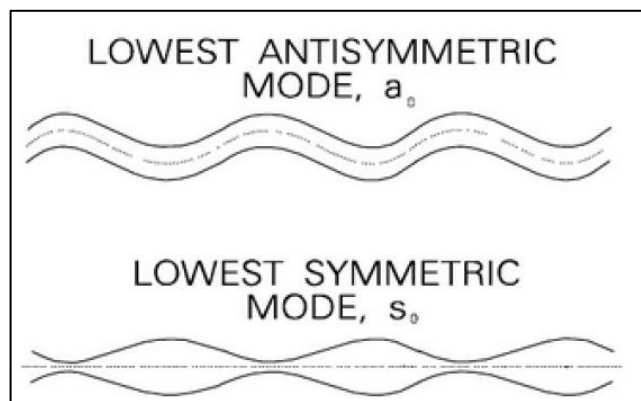
La velocidad de propagación de la onda se describe en términos de las ondas de Lamb, denominado de esta manera en honor a Horace Lamb⁸, En efecto, dicha teoría asocia la propagación de la onda con dos modos de vibración, los cuales se

⁸ Físico Inglés que en 1920's desarrollo la teoría matemática de la propagación de las ondas sinusoidales en platos finitos.

definen como patrones de movimiento oscilatorio que pueden propagarse de manera estable, manteniendo su forma en la medida que viajan.

Específicamente, en láminas Lamb identificó dos familias de modos de onda, s_o y a_o , desarrollando ecuaciones que describían sus velocidades de propagación. En la primera familia (s_o), el movimiento del plato es simétrico respecto a su plano medio, en cambio en la segunda familia a_o el movimiento es asimétrico. Además, El modo s_o es comúnmente conocido como el modo “extensional”, donde la lámina se comprime y estira alternadamente en la dirección del movimiento de la onda, complementariamente, el modo a_o se conoce como el modo “flexionante”, el cual permite que las dos caras de la lámina se muevan en la misma dirección. La figura 8 permite visualizar el movimiento de la lámina con los respectivos modos de onda de Lamb.

Figura 8. Movimiento de lámina según el modo de onda



Fuente: NDT Handbook.

De manera práctica, se observó que en un plato con espesor menor a $\frac{1}{4}$ " que maneja frecuencias de 300-500 kHz, el modo de onda a_o viajaba entre 3000 m/s y 3300 m/s, y el modo s_o viajaba con velocidad menor a 3000 m/s, de tal manera que el modo a_o alcanzaba el sensor un poco antes que el s_o . En adición, el modo a_o es usualmente más importante porque permite generar una amplitud mayor que el modo s_o . Como consecuencia, cuando se sintonizan los equipos de AET para

ubicar fallas en estructuras, se adopta como buena práctica usar el valor de velocidad de $120000 \left[\frac{in}{s} \right]$.

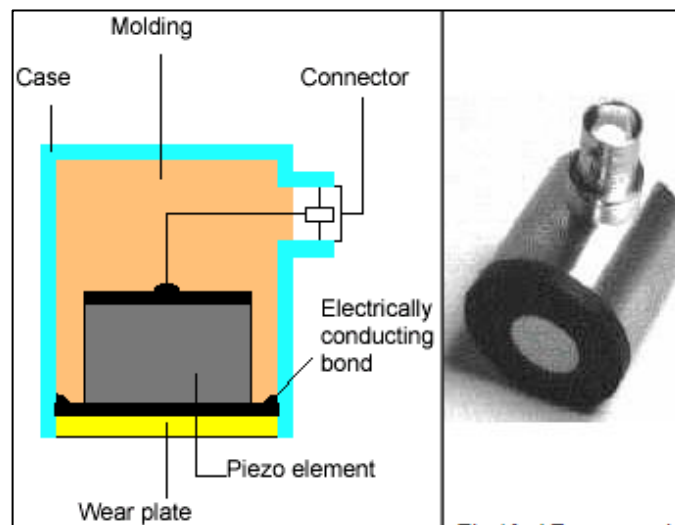
2.3.3. El sensor

Tras el arribo de la onda acústica a la superficie del material inspeccionado, es necesario, recoger la información que esta transporta, para tal fin se encuentra el sensor de AE.

2.3.3.1. Principio de captación de la AE

Este componente de la cadena del AET, tiene como corazón un cristal piezo-eléctrico, el cual genera un voltaje eléctrico tras ser deformado (elásticamente). En otros términos, Cuando el cristal piezo-eléctrico es presionado por un impulso momentáneo, dicho cristal vibra como una campana generando un voltaje oscilante a la misma frecuencia del movimiento impulsor. En adición, el elemento vibratorio tiene una respuesta lineal, es decir si el movimiento de entrada es duplicado, el voltaje de salida también lo será.

Figura 9. Sensor de AE.

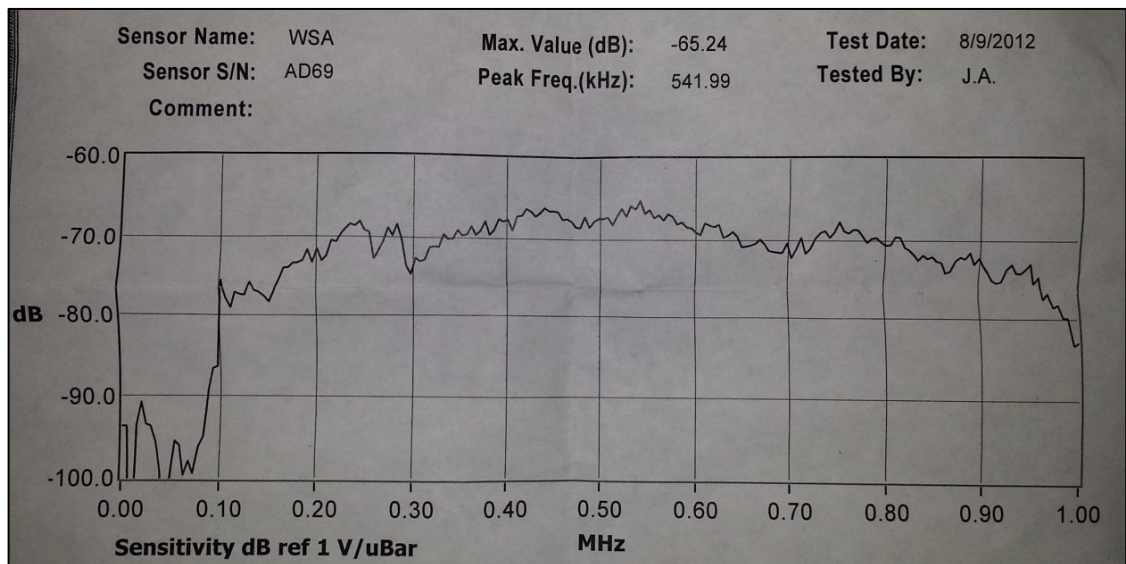


Fuente: <http://www.ndt.net/article/v07n09/05/05.htm>

2.3.3.2. Sensibilidad del sensor

La sensibilidad del sensor se entiende como la proporción entre la amplitud del voltaje de salida y la amplitud del movimiento de entrada. Se ha establecido que esta sensibilidad depende fuertemente de la frecuencia del movimiento y en consecuencia, la sensibilidad del elemento de medición es lo más grande posible en la frecuencia de resonancia. Para visualizar el comportamiento de los sensores se han establecido de manera genérica las curvas de calibración de los sensores, las cuales muestran la variación de la sensibilidad con la frecuencia. Como ejemplo se muestra en la figura 10 la curva de calibración del sensor tipo “alpha” usado en el desarrollo de este proyecto.

Figura 10. Certificado de calibración de sensor



Fuente: Mistras Group. Inc, modificada por los autores.

Generalmente, como se observa en la figura anterior, las curvas de calibración asocian la sensibilidad con el eje Y, escalándolo en dB relativo a nivel de referencia establecido, tal como $1 \left[V * \frac{m}{s} \right]$. La ecuación que gobierna este comportamiento logaritmo de la sensibilidad se escribe a continuación:

$$dB = 20 * \log\left(\frac{S}{S_{ref}}\right)$$

Dónde:

$$S \rightarrow \text{Sensibilidad: } \left[V * \frac{m}{s}\right]$$

$$S_{ref} \rightarrow \text{Nivel de referencia } \left[V * \frac{m}{s}\right]$$

Una característica notable de los sensores de AE es que responden al movimiento en cualquier dirección, a diferencia de los acelerómetros, los cuales se diseñan cuidadosamente para medir únicamente la componente paralela al eje de movimiento. Sin embargo, para garantizar la entrega de una señal fuerte, el sensor debe estar en excelente contacto acústico con la estructura bajo prueba, de tal manera que, se han desarrollado técnicas de unión y montaje que garanticen la correcta adhesión, así mismo, se han producido sustancias adhesivas, líquidos viscosos, o grasas que maximizan la transmisibilidad de la AE al sensor, y finalmente, aparecen diferentes elementos encargados de fijar mecánicamente el sensor, tal como el acoplador magnético.

2.3.3.3. Tipos de sensores

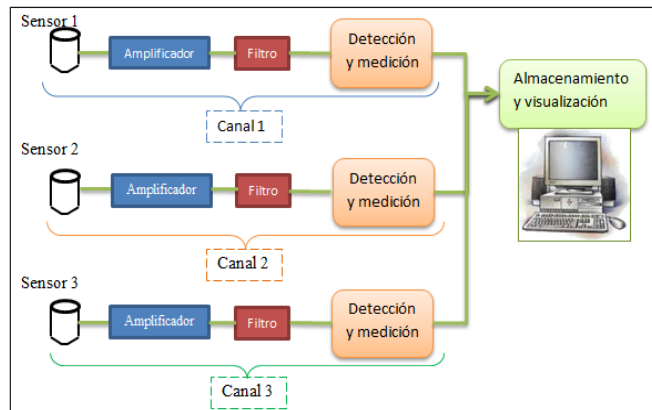
El elemento transductor determina el tipo de sensor, y se basa en la respuesta que tiene frente a la frecuencia excitatriz, de tal manera que los sensores pueden ser de banda ancha o resonantes. Los sensores de banda ancha ofrecen mayor exactitud en la representación del movimiento detectado, además tienen el potencial de entregar información extra, tras la implementación de técnicas de procesamiento de señal avanzadas, pero, desafortunadamente los mejores datos se encuentran ubicados en lo más bajo del espectro, justo donde los problemas de ruido se intensifican. Es por esto que en la mayoría de las aplicaciones los sensores resonantes son los preferidos, primeramente, porque son más económicos y en segundo lugar porque son más sensibles, además tienen la

ventaja de trabajar en un rango conocido de ancho de banda, el cual se selecciona para optimizar el desempeño en aplicaciones con alta atenuación y gran ruido de fondo.

2.3.4. Acondicionamiento electrónico

El proceso de acondicionamiento de la señal se esquematiza en la siguiente figura:

Figura 11. Acondicionamiento electrónico de la señal



Fuente: Autores.

En la figura anterior se esquematiza un sistema de acondicionamiento electrónico de tres canales, cada uno con sus etapas de amplificación, filtrado, detección y medición. En el proceso de *amplificación* se eleva el nivel de voltaje de la señal emitida por el sensor, para que sea óptima a los circuitos de medición. En seguida, en la etapa de *filtrado* se establece un rango de frecuencias que logran atenuar la entrada de ruido de fondo de baja frecuencia, limpiando la señal que ha sido amplificada. Póstumo a este pre acondicionamiento de señal, esta es enviada a un circuito para su detección, el cual posee un comparador electrónico que ejecuta su algoritmo, comparando la señal recibida con un umbral⁹ de voltaje definido por el

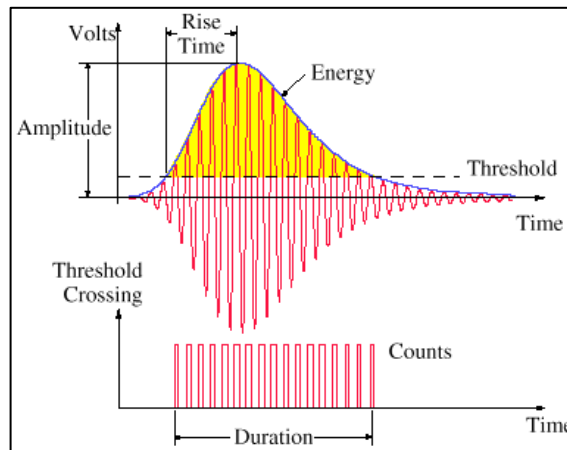
⁹ Umbral: nivel de voltaje en un comparador electrónico sobre el cual son reconocidas las señales de AE.

operador, en efecto, la primera vez que la señal de voltaje supera el umbral se inicia un Hit.

2.3.4.1. Concepto del Hit

El hit se define como la detección de una onda de esfuerzo por un sensor. Un solo evento AE puede causar que el sistema multicanal descrito en la figura anterior detecte múltiples hits. La iniciación del Hit es el punto de partida de la *medición* de la señal, figura 12. En la medida que la señal continua oscilando por arriba y por debajo del umbral, el comparador genera pulsos adicionales denominados cuentas¹⁰, mientras esto sucede los circuitos están midiendo activamente varias características claves de la señal. En el tiempo, la amplitud de las señales se reduce a un punto donde no hay más superaciones del umbral. Después de superarse el tiempo establecido para el hit, al no generarse más pulsos en el contador, el sistema determina que el *evento* ha terminado, concluyendo el proceso de medición. Finalmente, se resetea el circuito que midió el hit, se alista para captar uno nuevo y se almacena la información extraída, valiosa para el proceso de interpretación.

Figura12. Definición de los parámetros de la señal AE



Fuente: http://anonymousmonetarist.blogspot.com/2010_03_01_archive.html.

¹⁰ Cuentas: cada vez que la señal supera el umbral.

2.3.4.2. Características de la señal

Tras la medición del Hit se extraen ciertas características, las cuales están relacionadas con el umbral de detección como se muestra en la figura 12, sobresaliendo la amplitud, duración, tiempo de subida, la energía de la señal, y las cuentas mencionadas anteriormente; a continuación se describen cada una de ellas.

✓ **Amplitud**

Se refiere al voltaje más grande presente en la forma de onda de la señal y es medido en dB. Es un parámetro importante en el AET, porque determina la detectabilidad de la señal, es decir, que señales con amplitudes por debajo del umbral mínimo definido por el operador no serían detectadas.

✓ **Duración**

Es el tiempo desde la primera cruzada del umbral hasta el último cruce realizado, y es medido en μs . La relación entre duración y amplitud le cuenta al usuario acerca de la forma de la señal, facilitando la identificación del tipo de fuente AE.

✓ **Tiempo de subida**

Corresponde al intervalo de tiempo entre el primer cruce del umbral, y el momento en que se alcanza el pico de la señal (amplitud). Este parámetro está relacionado a la propagación de la onda entre la fuente de AE y el sensor. Por lo tanto, el tiempo de subida es usado para calificar la señal en términos de filtración del ruido.

✓ **Energía de la señal**

Es el área bajo la envolvente de la curva de la forma de onda, área amarilla de la figura 12. Esta es otra medida importante del tamaño de la señal y es la más utilizada para cuantificar la actividad AE, ya que se basa en la sumatoria de las energías de las señales individuales, produciendo un valor total (1 solo número)

que facilita la interpretación del fenómeno y el diagnóstico que realizan los ejecutores del ensayo.

✓ **Cuentas**

Corresponden a la cantidad de pulsos que emite el comparador, relacionados a la superación o cruce del umbral establecido. En consecuencia, un solo Hit podría proveer pocas cuentas o en muchos casos cientos de ellas, dependiendo del tamaño y la forma de la señal. Para los diseñadores electrónicos, esta es la medida más sencilla de realizar, y en los primeros años de desarrollo de esta tecnología, las cuentas fueron la manera más común de describir y reportar las cantidades AE. En la época de 1980 la energía reemplazó las cuentas, tornándose la medida preferida para el análisis de la actividad AE. Sin embargo, las cuentas siguen siendo útiles para la interpretación de datos, ya que al usarse en conjunto con la amplitud y la duración, es posible extraer información valiosa acerca de la forma de la señal.

2.3.4.3. Arquitectura instrumental

La arquitectura instrumental es la estructura de medición diseñada para extraer las características deseadas de las AE. La arquitectura más común es la basada en el Hit, la cual ha sido creada para la medición eficiente y el almacenamiento de este tipo de actividad. El proceso de medición inicia cuando una señal es detectada por los circuitos del umbral, seguidamente, un microprocesador almacena un archivo de datos el cual contiene el tiempo de la detección y los resultados de las mediciones hechas, después de esto, el circuito de medición es reseteado, listo para la aparición del siguiente hit o grupo de hits. Así que, la información entregada al computador, consiste en una serie de conjuntos de datos de hits, correspondiendo de manera aproximada un espacio de 30 Bytes de almacenamiento para cada conjunto de datos, de tal manera que un conjunto de datos corresponderá a la detección un evento de AE (crecimiento de una grieta), y varios conjuntos representan diversos eventos.

Adicionalmente, es posible almacenar datos ambientales como presión, temperatura, fuerza, desplazamiento, de manera continua y conjuntamente todas esas variables. La mayor ventaja de la arquitectura basada en hits es que entrega una muy detallada descripción de la emisión mientras usa económicamente el espacio para almacenar datos, adicionalmente, los datos pueden almacenarse por largos periodos para realizar análisis posteriores.

Por otro lado, dependiendo del objetivo se han diseñado sistemas de medición de AE con otras estructuras instrumentales, algunas sacrifican desempeño en favor de la portabilidad (trabajo de campo), y otros sacrifican versatilidad en favor de automatización. Por ejemplo, hay sistemas industriales especializados los cuales imprimen un conjunto predefinido de gráficas mostrando varios aspectos de los datos AE, pero no producen un almacenamiento permanente de cada Hit.

2.3.5. Técnicas de localización de la falla

La instrumentación en el AET puede incluir varios canales para la medición de la actividad estructural, de tal manera que un solo evento, AE puede ser detectado por varios canales, produciendo un hit en cada uno. Estos hits ocurrirían rápidamente, y típicamente todos caerían en un par de centésimas de segundo en la medida que el frente de onda, alcanza cada sensor. Así que, comparando los tiempos de arribo en los diferentes sensores, es posible encontrar la ubicación de la fuente AE, siendo esto el valor agregado del AET.

Se han desarrollado diversas técnicas para la ubicación de la falla, diferenciándose del número de sensores a utilizar, su disposición y los parámetros que estos miden. Dichas técnicas asumen que la onda de AE viaja a velocidad constante en el material, sin embargo, diversos efectos (reflexiones y múltiples modos de onda) podrían alterar la velocidad esperada y pueden afectar la precisión de la medición; las técnicas más comunes se describen a continuación.

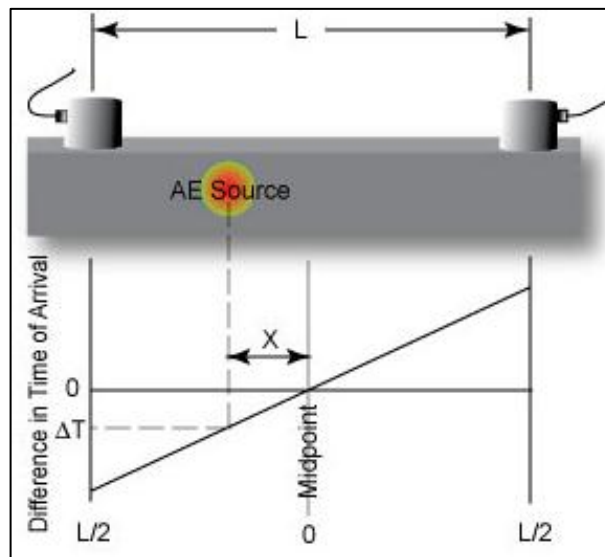
2.3.5.1. Técnica de localización lineal

El principio de la ubicación lineal esquematizado en la figura 13, utiliza dos sensores para la localización de la falla. En adición, enuncia que la diferencia del tiempo de llegada (*Difference in time of arrival*) ΔT , se relaciona con la posición de la fuente de AE. En efecto, cuando la fuente está en el punto medio (midpoint) la onda llega a ambos sensores simultáneamente y el $\Delta T = 0$, por el contrario, si la fuente está más cerca a uno de los sensores, el $\Delta T \neq 0$, en otros términos, entre más grande la separación de la fuente y el punto medio, mayor será el ΔT . La relación entre el ΔT y la distancia de la fuente al punto medio x , es lineal y se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Delta T = \frac{2 * x}{c}$$

Donde c es la velocidad del sonido en el material (mencionado anteriormente).

Figura 13. Principio de la técnica de localización lineal



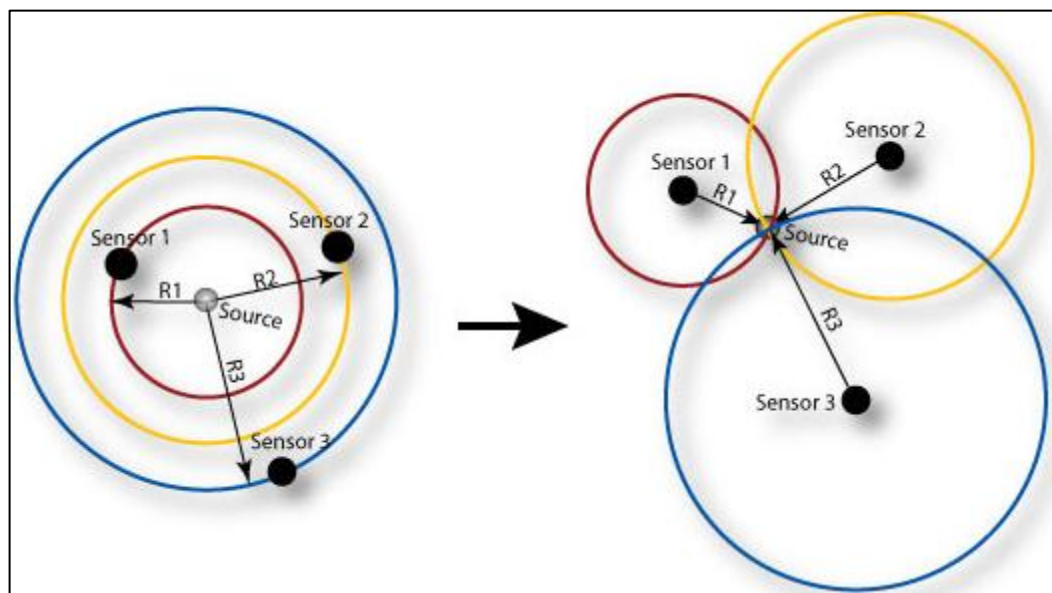
Fuente: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources>.

Sin embargo, si la fuente está por fuera de la línea que une los sensores, el ΔT tiene un valor constante de L/c , donde L es la distancia que separa los sensores, así que una fuente de AE entre los sensores puede ser localizada, pero no una fuente por fuera de la línea mencionada. Finalmente, esta técnica es usada a menudo para evaluar elementos de las estructuras de puentes.

2.3.5.2. Técnica de ubicación planar

Con tres sensores es posible determinar la posición de falla en dos coordenadas (X y Y), de una fuente ubicada en un plano; igual que con la localización lineal, la mejor precisión es lograda cuando la fuente de AE está por dentro del área que forma el arreglo sensorial como se observa en la figura 14.

Figura 14. Ubicación planar de la fuente de AE



Fuente: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources>.

Al salir la onda de la fuente esta alcanza el sensor más cercano, es decir el sensor 1, luego los sensores más lejanos 2 y 3. De tal manera que el primer Hit, en el

sensor 1, ocurre en el tiempo $\frac{r_1}{c}$. Donde r es la distancia de la fuente al sensor, y c es la velocidad de la onda, adicionalmente, los hits en el segundo y tercer sensor ocurren en tiempos $\frac{r_2}{c}$ y $\frac{r_3}{c}$, respectivamente. No obstante, es importante resaltar que la instrumentación no tiene conocimiento directo del tiempo del evento, únicamente, puede medir los tiempos de duración de cada hit, pero de las diferencias de tiempos entre estos hits, es posible calcular tanto la ubicación como la duración de dicho evento.

Igualmente que con la localización lineal, la mejor precisión para la técnica planar es conseguida cuando la fuente está por dentro del área que forma el arreglo sensorial, de hecho, con solo 3 sensores en un plano, las matemáticas para la ubicación de la fuente son ambiguas. En consecuencia, como solución a la eliminación de la ambigüedad se implementa un cuarto sensor que genera un ΔT más.

Como se mencionó anteriormente, la precisión en la ubicación de la fuente, está directamente afectada por la propagación de la onda, y aunque las aproximaciones convencionales asumen que la onda viaja directamente de la fuente al sensor, con una velocidad bien definida, en la práctica las reflexiones, los múltiples modos de onda, y otros efectos de propagación, pueden producir incertidumbre en la velocidad efectiva del frente de onda.

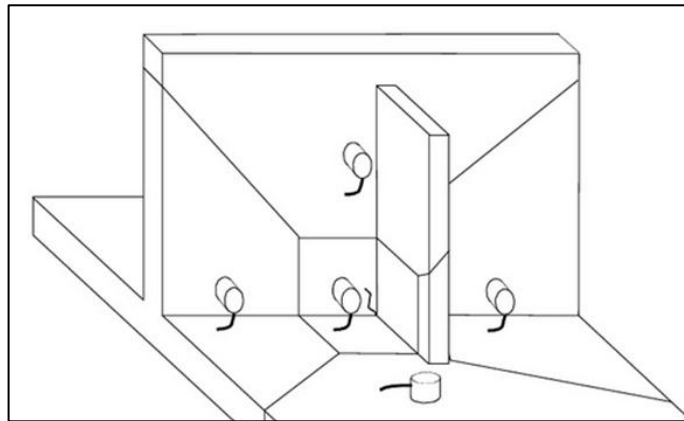
Las técnicas anteriormente descritas, requieren que el hit alcance los sensores del sistema de localización, en efecto, los eventos más pequeños que únicamente golpean un sensor son muchas veces ignorados, induciendo a errores de diagnóstico de integridad estructural, especialmente si se monitorea áreas de gran magnitud.

2.3.5.3. Técnica de ubicación zonal

Esta es una técnica que es útil implementarla en el AET de estructuras de grandes dimensiones, y en materiales anisotrópicos. La técnica se basa en la disposición

matricial de varios sensores para monitorear el área de interés, de tal manera que el área logra dividirse en zonas, cada una con un sensor en su centro (figura 15). En consecuencia, el primer sensor que sea excitado es el que se encuentra más cerca de la fuente, concluyéndose que esta última yace en algún lugar de la zona asignada al sensor.

Figura 15. Localización por zonas de la fuente AE



Fuente: NDT Handbook.

El valor práctico de esta técnica es que le permite al usuario eliminar la información del 2^{do} y 3^{er} hit de los datos entrantes, así que cada canal muestra únicamente la emisión que realmente se originó en su zona, esto recorta y limpia los datos. No obstante, puede extenderse a tener en cuenta el 2^{do} hit, y con el conocimiento del canal que recibió dicho evento, se reduce a un segmento menor la posible zona de ubicación de la fuente, aunque este concepto es raramente implementado.

2.3.6. Visualización de datos

Familiarizarse con los datos de las AE que pueden visualizarse, y aprender a interpretarlos es una parte importante del entrenamiento que un operador del AET debe realizar. En general los datos que logran presentarse, constan básicamente

de gráficas de datos numéricos, en vez de imágenes como lo hacen otros ensayos no destructivos.

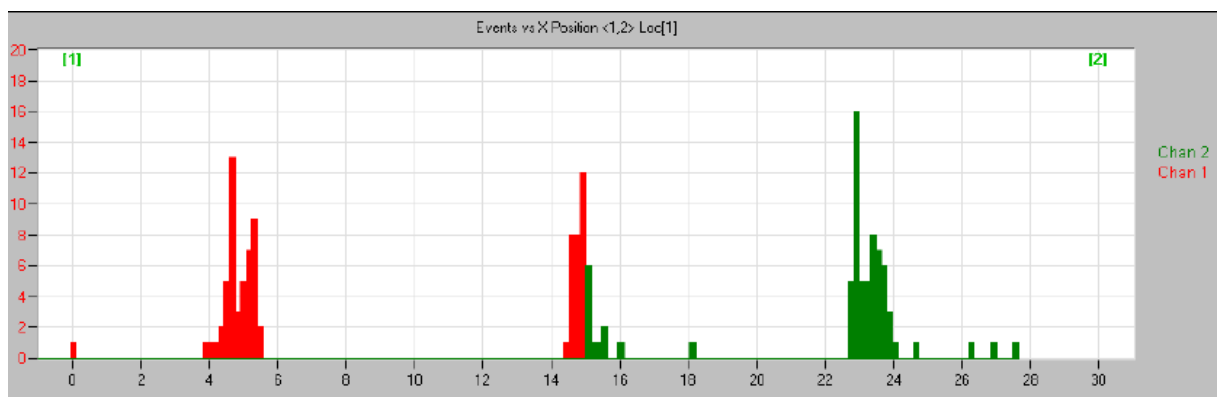
Se describen a continuación las categorías principales con las cuales es posible mostrar los datos obtenidos tras la inspección con AE.

2.3.6.1. Visualización de la ubicación

Aquí se presentan gráficas que muestran de donde viene la AE. Como se describió anteriormente la ubicación puede ser lineal, planar, y zonal, en consecuencia, se asocian graficas propias para cada tipo técnica de ubicación de la fuente de AE.

En primer lugar, cuando se implementa la técnica de localización lineal, la visualización de los datos se hace en un histograma como se ilustra en la figura 16, en el eje X se acoge la distancia entre los dos sensores, la cual se divide en varios segmentos (de 2 en 2), de tal manera que cada emisión medida es asignada a una división de dicho eje (ubicación de la fuente en el elemento bajo prueba). El número de eventos de cada fuente se indica por la altura de la barra en el histograma. Por lo tanto, el foco del inspector debe estar en las indicaciones con picos más altos.

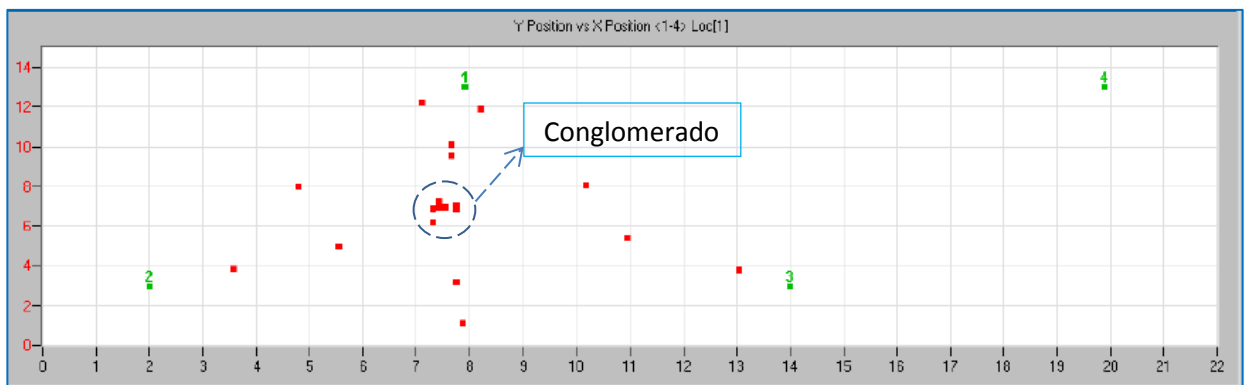
Figura 16. Histograma de eventos vs la posición para la localización lineal



Fuente: Manual de software AE Win.

En segundo lugar, para el análisis de datos tras la utilización de la técnica de localización planar, se utiliza un gráfico donde se muestra la posición de los sensores respecto a los ejes de desplazamiento X y Y, como ejemplo se tiene la figura 17, en la cual los sensores se identifican cada uno con un número en color verde, de tal manera que tras la detección, las fuentes de AE se ubican como un punto rojo en el plano, y si dicha fuente emite repetidamente los puntos forman un conglomerado, en efecto, dichos racimos de puntos deben ser el punto focal de análisis de los inspectores que realizan el ensayo.

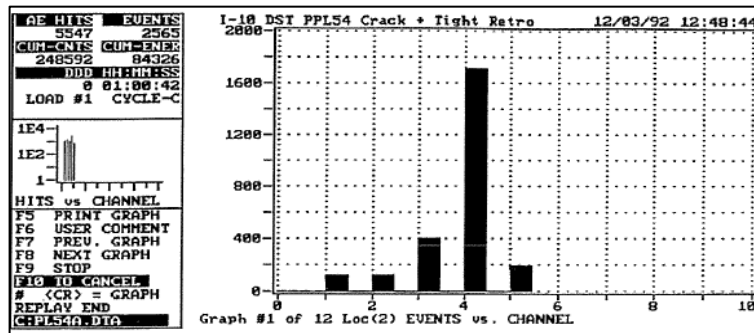
Figura 17. Gráfica de ubicación planar de la fuente de AE.



Fuente: Manual de software AE Win.

Como tercera herramienta, en el caso de visualización para la técnica de ubicación zonal, se repite el histograma que se mencionó, sin embargo en este gráfico (figura 18) se registran los eventos (eje Y) frente al canal (eje X) que los detectó primero, despreciando los hits de los sensores restantes. La altura de la barra para cada uno de los canales muestra el número de eventos detectados en cada uno de ellos, de tal manera que en el ejemplo en cuestión el canal 4 con 1700 eventos y el canal 3 con 400, representan las zonas con mayor actividad microestructural, luego esas zonas podrían ser revisadas posteriormente de manera minuciosa con otro NDT.

Figura18. Grafica de localización zonal



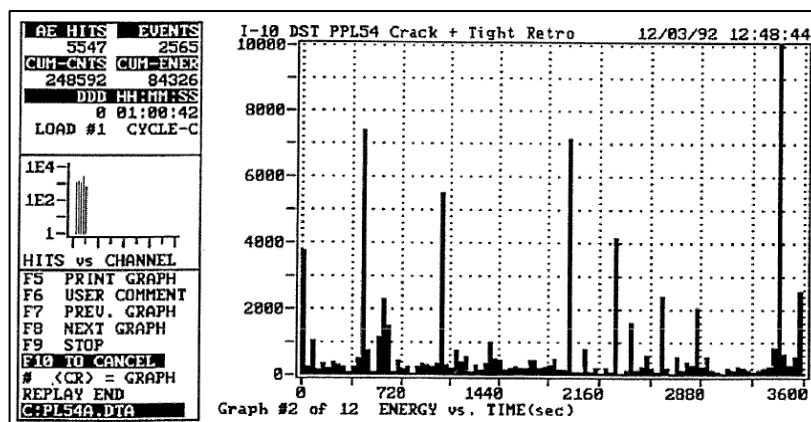
Fuente: NDT Handbook.

Otra forma de visualizar la figura anterior sería graficar la energía total para cada canal (en vez de eventos), dándole mayor importancia a las zonas que emiten mayor energía.

2.3.6.2. Visualización de la actividad

Este tipo de gráficas incluyen el tiempo de la prueba en el eje X, mostrando el momento de ocurrencia de la actividad, además en el eje Y se describe cuanta actividad hubo, proporcional a la altura de barra del histograma, por ejemplo hits detectados, eventos localizados, o energía total calculada (figura 19).

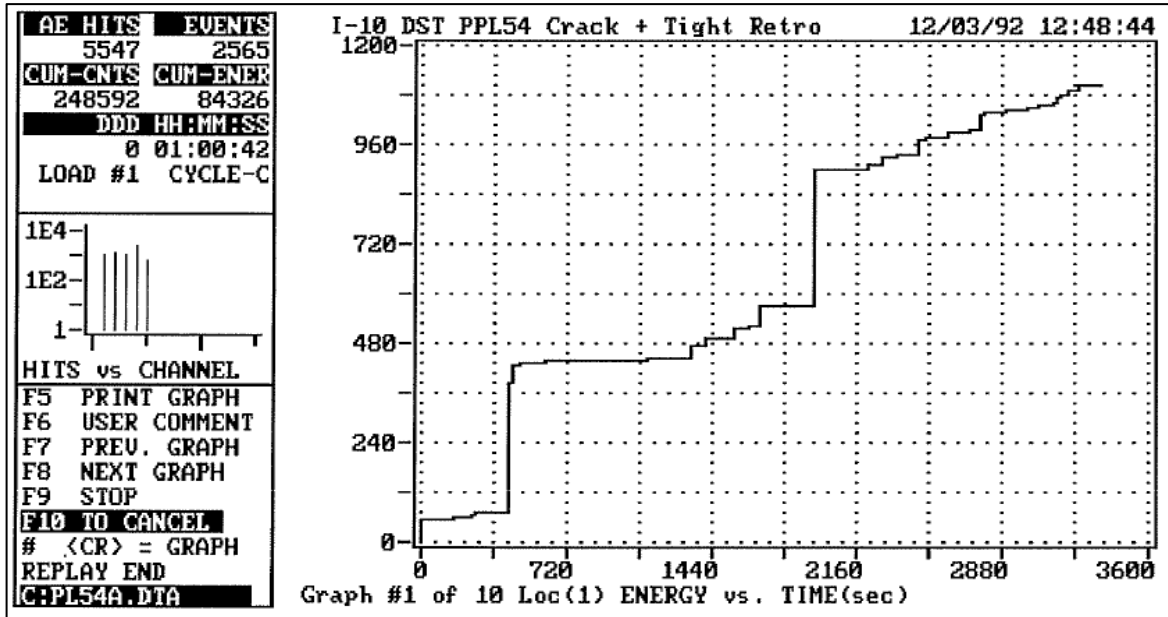
Figura19. Gráfico de actividad, energía vs tiempo.



Fuente: NDT handbook.

Otra manera de presentar la actividad, se logra trazando de continuamente la energía acumulada desde que se inició el ensayo. Esta gráfica (figura 20) es la mejor manera de medir la velocidad promedio de emisividad así como para ver la cantidad total de AE.

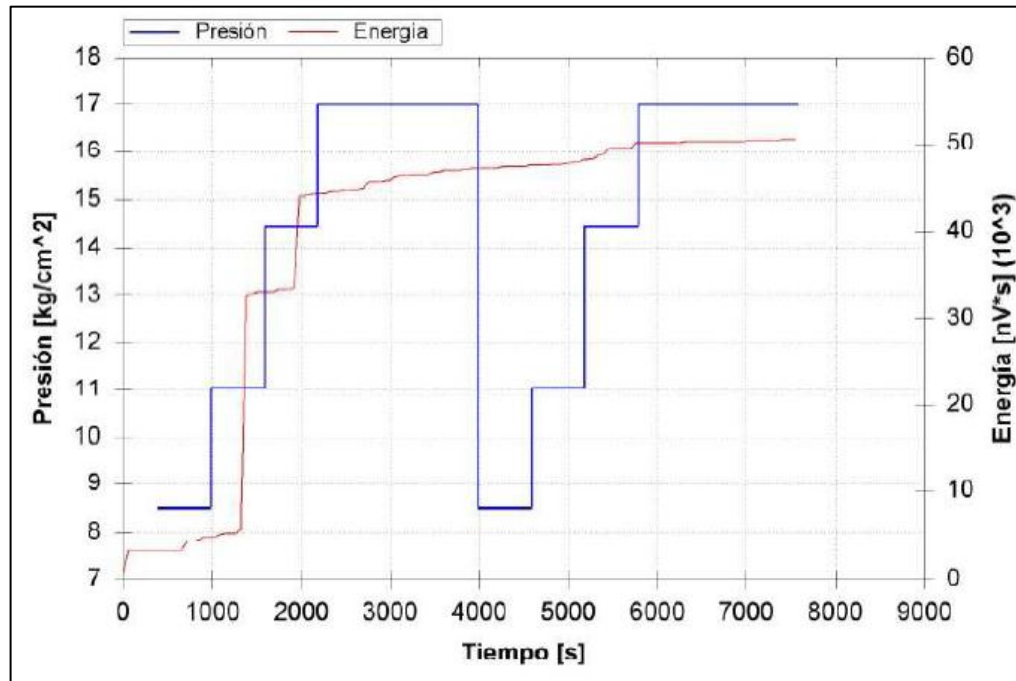
Figura 20. Visualización de la actividad acumulada.



Fuente: NDT handbook

Así mismo es posible integrar una variable externa en la visualización de los datos de actividad acumulada, como se muestra en la figura 21. En este diagrama se adiciona el valor de la presión en el eje Y, el cual se relaciona con la energía acumulada y el tiempo del ensayo, por ejemplo es posible extraer de la gráfica que al transcurrir 3000 [s] se mantenía un valor constante de presión de $17 \frac{Kg}{cm^2}$ (curva azul), y que la cantidad de energía medida iba en ascenso tomando como valor puntual $47 * 10^3 [nV * s]$. Esto con el fin de asociar el comportamiento a una falla que se ha caracterizado.

Figura 21. Energía acumulada y presión del ensayo en función del tiempo



Fuente: JUÁREZ, Ricardo E. y ORTEGA, Carlos M. Análisis del informe de resultados de ensayo de emisión acústica en base a lo establecido en el código ASME sección V artículo 12 2007.

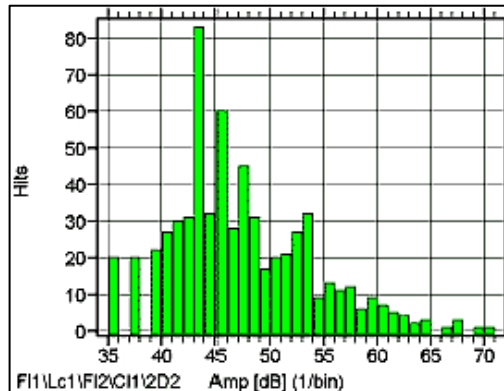
2.3.6.3. Visualización de la intensidad

En este grupo de gráficas es posible extraer información estadística acerca del tamaño de la señal detectada, ya que en muchos casos las señales más grandes suelen ser más importantes que las pequeñas, es así, que pocos eventos de gran tamaño podrían acumular mayor energía que un grupo mayoritario de eventos más pequeños.

El gráfico de intensidad más conocido es el de distribución de la amplitud, el cual muestra cuantos hits fueron grandes, y cuantos fueron pequeños. A su vez se subdivide en dos tipos, el diferencial y el acumulativo. El gráfico diferencial se representa con un histograma (figura 22), que tiene en el eje X la amplitud de los hits (escalado en dB) y en el eje Y traza la cantidad de estos que fueron

detectados con la respectiva amplitud. Naturalmente, no hay señales medidas con amplitudes menores que el umbral de detección.

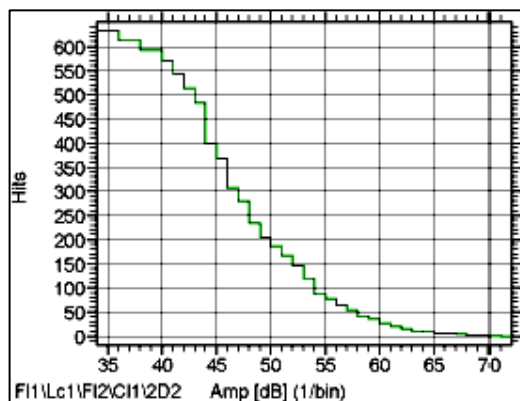
Figura 22. Distribución diferencial de la amplitud



Fuente: <http://www.ndt.net/article/v07n09/05/05.htm>

El gráfico de distribución acumulativo mostrado en la figura 23, es de gran importancia porque dice cuántos hits (eje Y) han alcanzado o excedido la amplitud especificada en el eje X. Por ejemplo para la amplitud mínima medida de 35dB todos los Hits detectados superaron este valor, sin embargo, para un valor de 50 dB poco menos de 200 Hits alcanzaron dicho valor, aún menos hits alcanzaron la amplitud de 65 dB, y finalmente ninguno alcanzo la amplitud máxima de 70 dB.

Figura 23. Distribución acumulada de la amplitud



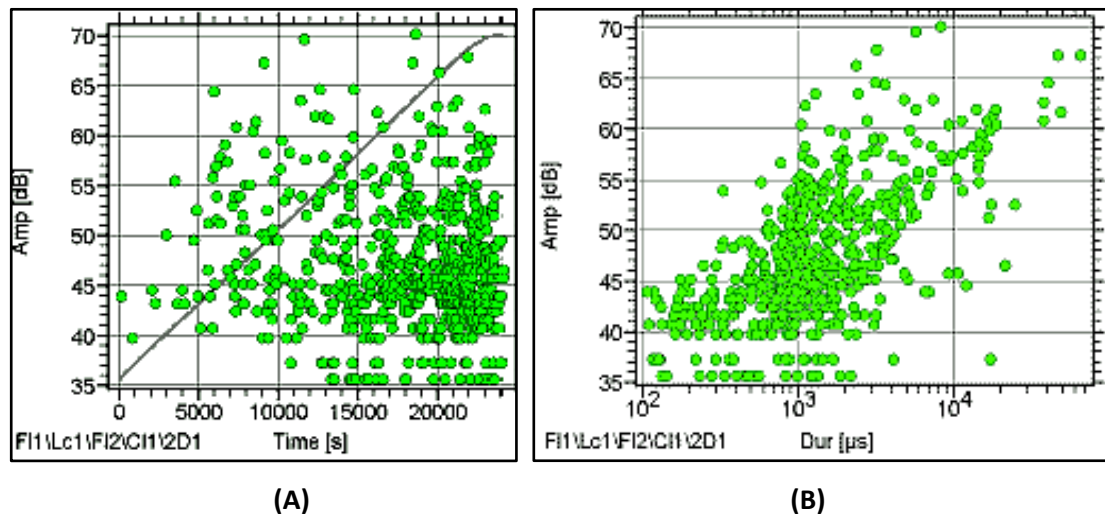
Fuente: <http://www.ndt.net/article/v07n09/05/05.htm>

Tanto la forma diferencial como la acumulativa de la distribución de la amplitud, pueden utilizar en el eje Y la escala logarítmica.

2.3.6.4. Visualización de la calidad

Se usan los diagramas de dispersión, por ejemplo se vincula un evento con dos características de la señal medida. El diagrama A de la figura 24, muestra un punto de color verde como cada evento detectado, indicando tanto su amplitud como el tiempo de detección. Adicionalmente, se muestra el gráfico de la figura 24-b, donde se resume amplitud y la duración de cada evento detectado.

Figura24. Diagramas de dispersión de los eventos y sus características.



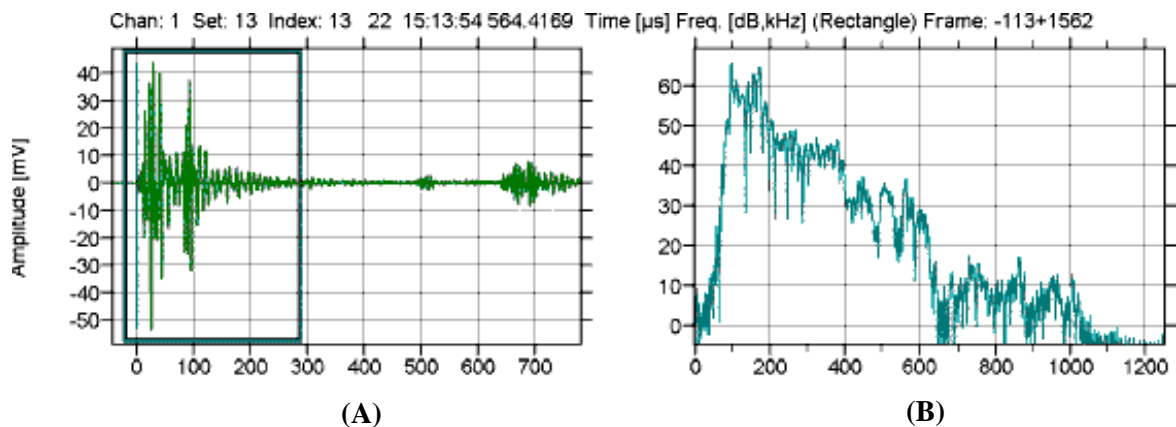
Fuente: <http://www.ndt.net/article/v07n09/05/05.htm>

Los diagramas mostrados anteriormente dan una visión global de las características del evento detectado, ya que es posible, enlazar ambas gráficas para definir el evento, por ejemplo en ambos diagramas hay solo un hit con amplitud por arriba de los 70 dB, así que debe ser el mismo para ambas gráficas, luego es posible determinar su duración ($\approx 1 * 10^4 \mu s$), y el tiempo en el cual se detectó (18500 s).

2.3.6.5. Visualización de las formas de onda

Es posible mostrar la forma de onda de la señal de dos maneras, por ejemplo la figura 25-A, muestra el comportamiento de la onda en función del tiempo, y de la cual se extrae la respuesta en frecuencia de la misma, (marco azul) figura 25-B, esto con el fin de determinar la naturaleza de la onda detectada. En efecto, operadores experimentados del AET usan el espectro de frecuencias como un indicador del mecanismo de generación de la AE, así como para detectar y descartar el ruido que no logro ser filtrado.

Figura 25. Formas de onda en el dominio del tiempo y la frecuencia



Fuente: <http://www.ndt.net/article/v07n09/05/05.htm>.

2.3.7. Evaluación de los resultados del AET

Se han elaborado procedimientos de evaluación aplicaciones específicas, por ejemplo en tanques atmosféricos, vagones cisterna de ferrocarril, camiones de carga de cilindros de GLP, y fuselajes de aviones, etc. como consecuencia de múltiples resultados experimentales ejecutados desde que inició la tecnología. Sin embargo, de manera general se resumen a continuación algunos criterios de caracterización que relacionan conceptos de AE con el análisis gráfico.

2.3.7.1. Implicaciones del efecto *Kaiser* y el efecto *Felicity*

En un AET de un componente nuevo, se observan incrementos y sostenimientos de la cantidad de AE acumuladas, en la medida que se aumenta y se sostiene la carga. En efecto, dichas emisiones detectadas durante la elevación de carga, se consideran difíciles de interpretar, y estas podrían asociarse a discontinuidades estructurales. Por otro lado, en un ensayo donde se observan aumentos en las emisiones acumuladas durante los periodos de sostenimiento de carga, se presume de defectos estructuralmente significativos, quizás el inicio o la continuación de la destrucción del material, luego se recomienda disminuir la carga y finalizar el ensayo.

2.3.7.2. Aglomeración de eventos y tendencias de los parámetros de AE

El agrupamiento o aglomeración de eventos indica una fuente emite repetidamente, indicando una falla de consideración, luego es necesario realizar un análisis más profundo, en esta zona con otro NDT.

El incremento de los parámetros de AE (amplitud, energía) tras el incremento de la carga, observado en las gráficas de intensidad, da un indicio de defecto estructural.

En general las gráficas son útiles para filtrar ciertos mecanismos de fractura y/o deformación y además ayudan a determinar cambios de naturaleza en la emisión a medida que el ensayo progresa, a menudo amplitudes mayores están relacionadas con mecanismos de deformación más serios, por ejemplo, el desarrollo de una grieta. Un inspector debe buscar en las gráficas cambios en los parámetros como se enuncia:

- ✓ Aumento en la cantidad de hits con la presión
- ✓ Incremento de la amplitud de la señal con la presión
- ✓ Aumentos de energía con la presión
- ✓ Aceleración en la cantidad de hits producidos con la presión

- ✓ Aumento en la cantidad de hits producidos durante un periodo de retención

Estos cambios en los parámetros son el indicativo de que algo está sucediendo y se entienden de la siguiente manera:

- ✓ Actividad durante los periodos de parada – indica cedencia de esfuerzos continuos o daños
- ✓ Presencia de actividad durante la carga – daños espaciados como corrosión
- ✓ Cambio en la cantidad de actividad – indica presencia de defectos
- ✓ Señales de gran amplitud – indica presencia de defectos en crecimiento
- ✓ Energía acumulada – áreas de defecto respondiendo a los incrementos de esfuerzo

También un defecto es detectado por un desproporcionado aumento de la actividad de AE bajo carga (cantidad de hits o eventos localizados).

Un decaimiento plano (baja pendiente) de la distribución acumulada de amplitud, significa que un considerable número de hits de gran amplitud fueron detectados, asociándolos a defectos que potencialmente han perjudicado la integridad estructural.

3. NORMATIVIDAD

3.1. ESTANDARES DE AET EN PROCESOS INDUSTRIALES

3.1.1. Monitoreo de AE durante procesos de soldadura continua¹¹

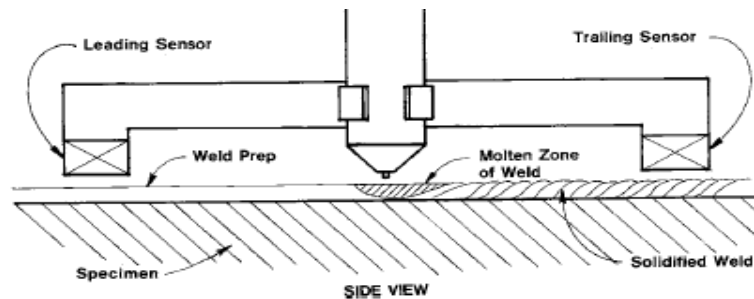
Esta norma proporciona una guía aplicable a la detección y localización de fuentes de emisiones acústicas en soldaduras y las zonas afectadas por la temperatura durante procesos de fabricación, particularmente para los casos en los que el tiempo de soldadura es tal que la fusión y solidificación toman lugar mientras la unión aún está en marcha. La efectividad del método de detección de fallas mediante emisiones acústicas en soldaduras y en las zonas afectadas por ellas, depende del diseño del sistema de detección, del procedimiento de verificación de los hits, el proceso de soldadura, y el tipo de material. Algunos materiales que han sido monitoreados incluyen aceros de bajo carbón, aceros aleados, aceros inoxidable y algunas aleaciones de aluminio.

La detección y localización de fuentes de emisiones acústicas en procesos de soldadura provee información acerca de la integridad de la misma. Esta información es usada para modificar el proceso o como una guía para la aplicación de otros NDT. La mayor cualidad de aplicar las emisiones acústicas en un monitoreo *in-progress* de soldadura, es la habilidad del método de entregar información en tiempo real sobre la integridad de la unión. Este rasgo hace el método conveniente para reducir costos por reparación de defectos en el momento más conveniente de la producción. La actividad micro sísmica proveniente de las discontinuidades en la unión soldada que es estimulada por el estrés térmico, es detectada por los sensores cercanos a la soldadura y estos

¹¹ *Standard Practice For Acoustic Emission Monitoring During Continuous Welding, ASTM E749-07.*

convierten la señal ondulatoria en una señal eléctrica, el procesador las analiza y las traduce para una visualización inmediata, o para generar una alerta.

Figura 26. Configuración con sensor unido a la estructura del cabezote soldador



Fuente: ASTM E749-07

3.1.2. AET de pequeñas piezas¹²

Esta norma está orientada a la inspección de piezas pequeñas o áreas en piezas de gran tamaño. Áreas donde la atenuación de la señal de emisiones acústica, es baja. Esto elimina la consideración de complejos factores de corrección y múltiples sensores para eliminar las pérdidas de la señal debidas a la distancia.

La guía asume una inspección típica de AET donde es controlado y medido el esfuerzo que actúa sobre el objeto de prueba, se enfoca particularmente a la selección del sistema de adquisición de datos, localización del sensor, consideraciones de esfuerzo, técnicas de reducción y aislamiento del ruido, filtrado, localización de la falla, adquisición de datos, análisis y reporte de resultados.

El propósito de la inspección es analizar como un objeto bajo evaluación está soportando la carga aplicada, o si está siendo afectado por un daño latente. Consecuentemente la actividad micro sísmica debe ser evaluada en relación a la carga aplicada.

¹² *Standard Guide for Acoustic Emission Examination of Small Parts, ASTM E 1932 – 07.*

Algunas aplicaciones incluyen la caracterización de materiales, integridad, control de calidad en procesos de producción, pruebas globales de piezas, pruebas después de la fabricación, evaluar regiones de interés en estructuras de gran tamaño y hacer un monitoreo periódico en estas áreas tras un tiempo determinado en servicio, para evaluar uniones en los puentes, en tuberías y recipientes.

Las cargas aplicadas para realizar las pruebas incluyen fuerzas mecánicas, tensión, compresión, torsión, presión interna, gradientes de temperatura, aplicadas durante periodos cortos o largos, aleatoriamente o cíclicamente. La carga aplicada puede ser controlada por el inspector o puede ser parte de un proceso, en cada caso la carga aplicada es medida junto con los sonidos micro-estructurales.

3.1.3. AET en estructuras durante una estimulación controlada¹³

Esta norma proporciona una guía para la inspección mediante AET de estructuras, tales como recipientes a presión, sistemas de tubería u otras estructuras que puedan ser afectadas por cargas mecánicas o térmicas. Posteriormente otros métodos o ensayos no destructivos serán usados para evaluar el significado de esta fuente.

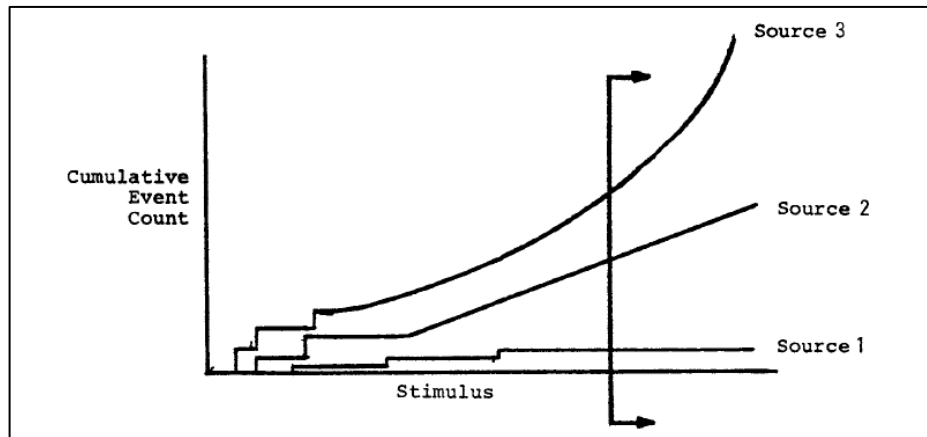
La inspección, medición y análisis de la actividad microsismica de estructuras usualmente requiere la aplicación de estímulos térmicos o mecánicos, tal situación produce cambios en los esfuerzos a los que está sometida la estructura, durante la prueba del arreglo, las AE provenientes de discontinuidades (grietas e inclusiones) y de otras áreas con concentración de esfuerzos, u otras fuentes de acústica como fugas y movimiento pueden ser detectadas por el sistema de medición, cuando los sensores son estimulados por las ondas de *stress* y se generan señales eléctricas.

Para la evaluación inmediata de las emisiones detectadas durante la aplicación de un estímulo, una permanente adquisición del número, localización de la fuente y la

¹³ *Acoustic emission monitoring of structures during controlled stimulation, ASTM E569 – 07.*

cantidad de emisiones detectadas por cada canal proporciona datos básicos para comparación con otras fuentes detectadas durante una inspección y su correspondiente estímulo.

Figura 27. Representación de la actividad acústica de 3 fuentes.



Fuente: ASTM E569.

3.2. ESTANDARES USADOS PARA LA INSPECCION DE CILINDROS DE GLP EN EL PRESENTE PROYECTO

3.2.1. Inspección de tanques metálicos durante pruebas de presión usando AE.¹⁴

El artículo, anexo A, describe métodos para llevar a cabo el AET, los objetivos tratados son localizar y evaluar fuentes de AE causadas por discontinuidades superficiales e internas en la pared del recipiente, soldaduras y partes fabricadas de componentes. Todos estos indicios de falla o anomalía en los recipientes que generan las fuentes de actividad acústica deberán ser evaluados por otros métodos de ensayos no destructivos.

¹⁴ ASME section V article 12. Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing

La norma establece que se deben realizar arreglos para presurizar el recipiente, la rata de aplicación de la presión tendrá que ser especificada en el procedimiento de inspección, el flujo deberá ser suficiente para acelerar la revisión con la mínima cantidad de ruido posible. El arreglo debe poder mantener la presión en puntos específicos durante la prueba. Para recipientes en servicio, el historial del recipiente a presión debe tenerse antes de realizar la prueba.

3.2.1.1. Requerimientos mínimos del procedimiento

- a. Procedimiento escrito: La inspección de recipientes usando emisiones acústicas deberá hacerse de acuerdo con un procedimiento escrito que debe contener la siguiente información:
 - ✓ Materiales y configuraciones a examinar, incluyendo dimensiones y forma del producto;
 - ✓ Medidas del ruido de fondo;
 - ✓ Tipo de sensor, frecuencia, y fabricante;
 - ✓ Método de fijación del sensor.
 - ✓ Acoplamiento.
 - ✓ Tipo de instrumento de AE y frecuencia del filtro.
 - ✓ Ubicaciones de los sensores
 - ✓ Método para la selección de la ubicación de los sensores
 - ✓ Descripción del sistema de calibración
 - ✓ Información por recopilar y forma de recopilación
 - ✓ Post-revisión al limpiar el recipiente
 - ✓ Informe de los requerimientos
 - ✓ Calificación /certificación por parte de los inspectores.

- b. tiempo y presión deberán ser medidos y recogidos como parte de los datos de emisiones acústicas. La presión deberá ser continuamente monitoreada.

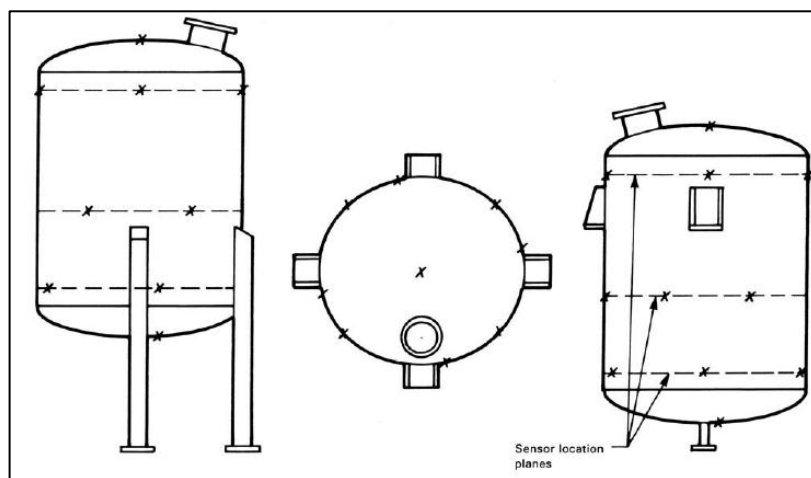
c. Los instrumentos de medición de presión deben tener características de manera que:

- ✓ Los manómetros de tipo analógico usados en la prueba deberán ser graduados por encima del rango no menor que 1.5 veces y no más que 4 veces la presión de prueba.
- ✓ Los manómetros digitales pueden ser usados sin restricción de rango sin embargo el error combinado debido a la calibración y fácil lectura no debe exceder el 1% de la presión de prueba.

3.2.1.2. Ubicación del sensor

La ubicación del sensor en el recipiente deberá determinarse por la configuración del mismo, mayores consideraciones han de tenerse en cuenta cuando es necesario detectar defectos estructurales en secciones críticas, por ejemplo: zonas de altos esfuerzos, discontinuidades geométricas, boquillas, bocas de acceso, regiones reparadas, anillos de soporte y defectos visibles, una consideración adicional debe darse a la posibilidad de los efectos atenuantes de la soldadura.

Figura 28. Ubicación de los sensores.



Fuente: ASME sección V artículo 12.

3.2.1.3. Examen previo a las mediciones y revisión de desempeño del sistema

✓ Sistema de calibración en el lugar

El desempeño de cada canal usado y el sensor instrumento de medición, deben ser chequeados insertando una señal simulada de EA, el sistema de calibración en el lugar debe ser capaz de verificar la operación del sistema, umbrales, cuentas, duración de onda, energía y amplitud.

La realización de este examen previo se llevara a cabo teniendo en cuenta los estándares ASTM E-976 y ASTM E-2374, estas normas son más explícitas en cuanto al procedimiento y se repasan más adelante.

✓ Revisión del desempeño del sistema

Una verificación del acoplamiento del sensor y de la continuidad del circuito deberá desarrollarse siguiendo el montaje y sistema de conexión. Inmediatamente después de realizado el anterior procedimiento se debe continuar con la inspección. La respuesta de la amplitud máxima de cada sensor a una fuente de emisión acústica simulada y repetible, deberá ser tomada antes y después de la prueba. La amplitud máxima medida no debe variar más que 4 dB del promedio de todos los sensores.

El desempeño del sensor y respuesta de este también podrían ser revisados usando programas de calibración de sensores electrónicos y automatizados sí el sistema que se está usando es capaz de revisar el acople del sensor, y permanentemente grabar los resultados. Esto deberá hacerse al comienzo de la prueba y al finalizar esta.

3.2.1.4. procedimiento para la examinación

El recipiente está sujeto a incrementos programados en los niveles de esfuerzo hasta un máximo predeterminado mientras está siendo monitoreado por sensores que detectan las AE causadas por el crecimiento de discontinuidades estructurales.

Si el recipiente ha estado en servicio, los niveles máximos de esfuerzos excederán el nivel de esfuerzo previo más grande que ha tenido el recipiente por un mínimo de 5% pero no excederá la presión máxima de diseño.

✓ **Ruido de fondo.**

Ruidos extraños deben identificarse, minimizarse, y grabarse. Debe llevarse a cabo la comprobación previa al ruido antes de la carga. El monitoreo de AE del recipiente durante la evaluación se requiere para identificar y determinar el nivel de falsas señales siguiendo la afinación de la comprobación del desempeño del sistema y enfatizando en la presurización del recipiente. El periodo de monitoreo recomendado es de **15 minutos**. Si el ruido de fondo está por encima del umbral a evaluar, la fuente del ruido debe ser eliminado o el examen terminado.

En el análisis de resultados hecho por el examinador de AE, el ruido de fondo debe notarse y evaluarse sus efectos sobre los resultados de la prueba. Las fuentes de los ruidos de fondo incluyen:

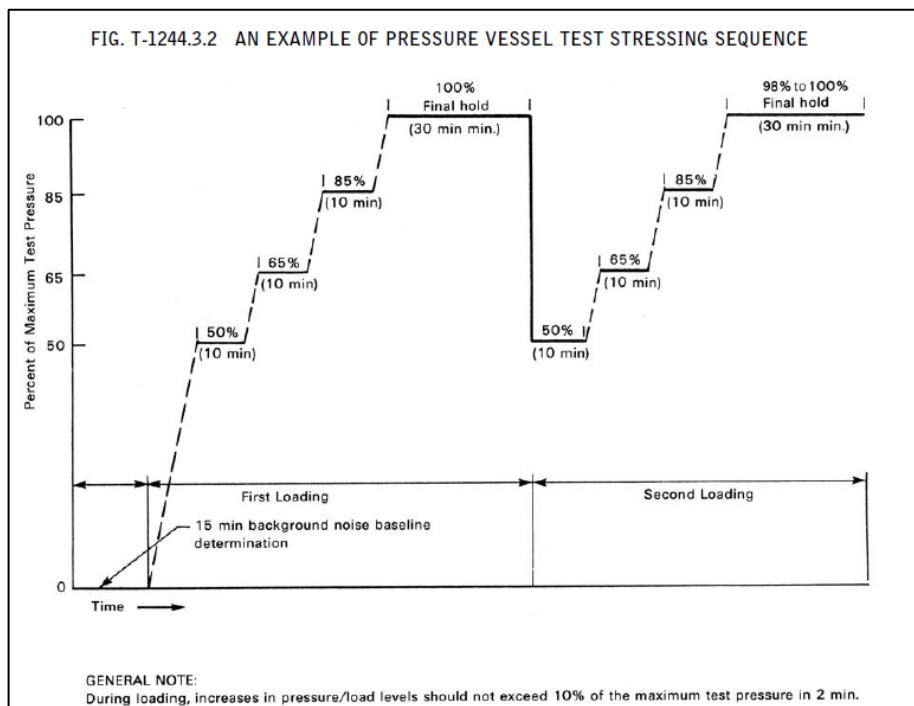
- Salpicaduras de líquidos dentro de un recipiente;
- La rata de presurización que sea muy grande,
- Bombas, motores, y otros dispositivos mecánicos;
- Interferencia electromagnética; y
- Ambiente (lluvia, viento, etc.).

Adicionalmente, fugas en válvulas, bridas, y dispositivos de seguridad y alivio deben de ser eliminados antes de continuar con la prueba.

✓ **Presurización del recipiente**

Secuencia de presurización para recipientes nuevos. Los incrementos de presión serán generalmente de 50%, 65%, 85%, y 100% de la presión máxima de la prueba. Los periodos de sostenimiento para cada incremento serán de 10 min y para el tiempo final de sostenimiento debe ser de 30 min. Normalmente, si la prueba es fallida, el recipiente tendrá que ser presurizado desde un 50% hasta al menos 98% de la presión de la prueba con sostenimiento de carga intermedia en 50%, 65%, y 85%. Periodos de sostenimiento para la segunda presurización serán iguales que para la presurización inicial.

Figura 29. Secuencia de presurización para recipientes nuevos



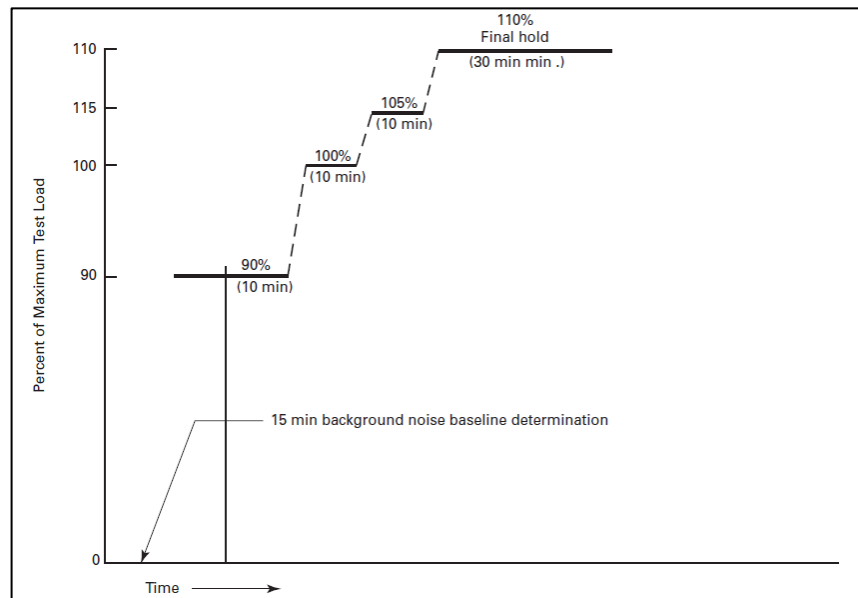
Fuente: ASME sección V artículo 12.

Secuencia de presurización para recipientes en servicio. Los incrementos de carga¹⁵ serán generalmente de 90%, 100%, 105%, y (si es posible) 110% de la

¹⁵ Efecto combinado de presión y temperatura

carga máxima de operación. Periodos de sostenimiento para cada incremento serán de 10 min y para el tiempo final de sostenimiento será de al menos 30 minutos. El valor de la carga máxima de prueba no será menor que el 105% del valor máximo de operación de los últimos 6 meses de operación o desde la última prueba, cualquiera que sea menor. Ratas de carga no excederán el 10% de la carga máxima de prueba en 2 minutos.

Figura 30. Secuencia de presurización para recipientes en servicio



Fuente: ASME sección V artículo 12.

Notas Importantes: Un incremento lineal de la energía y de los eventos con relación al incremento de la carga debe ser manejado con precaución, si las cuentas de AE o la rata de la energía incrementan con la carga rápidamente, el recipiente deberá ser descargado y terminarse el ensayo o la fuente de la emisión determinada y evaluarse la seguridad de la continuación de las pruebas. Este incremento en las cuentas o en la rata de la energía indica un descontrol que puede ser causado por un dato o falla inminente.

3.2.1.5. Evaluación de datos

Los criterios de evaluación son una parte de la inspección de recipientes sometidos a presión, se basan en la observación y análisis de las características registradas durante la prueba y se plantean como una base de evaluación de lo significativo de las indicaciones de parte de las emisiones acústicas. El estándar ASME proporciona una guía tabulada con algunos criterios de evaluación figura 31. Existen varias técnicas de análisis de las señales de EA. Las señales pueden ser recogidas y analizadas en una base paramétrica o en base de forma de onda. Los datos paramétricos son los eventos, cuentas, amplitud, duración, etc. con el objetivo de caracterización de la fuente. El análisis de forma de onda detallado es recomendado en aplicaciones especiales llevadas a cabo por expertos. El análisis paramétrico es una clase de análisis que puede ser clasificada como cualitativa y cuantitativa. Las tendencias generales de los datos registrados en el tiempo real pueden ser observadas en formas gráficas. La observación de las tendencias gráficas de las emisiones acumulativo y distribución de amplitud brinda información sobre cambios que ocurren en la estructura, como se menciona en el apartado 2.3.7.

3.2.1.6. Reporte de resultados

El documento escrito sobre cómo se realizó la prueba y los resultados obtenidos de la misma debe contener los siguientes puntos:

- ✓ Medio de prueba empleado.
- ✓ Tasa de prueba de la secuencia de carga, tiempos de sostenimiento, y niveles de sostenimientos;
- ✓ Caracterización de las atenuaciones y resultados;
- ✓ Recolección de las verificaciones del desempeño del sistema;
- ✓ Correlación de los datos de la prueba con el criterio de aceptación.
- ✓ Cualquier efecto inusual u observaciones durante o antes de la prueba;
- ✓ Fechas de las pruebas

Figura 31. Criterios de evaluación posterior al ensayo

TABLE T-1281 AN EXAMPLE OF EVALUATION CRITERIA FOR ZONE LOCATION							Evaluation Threshold, dB
Emission During Load Hold	Count Rate	Number of Hits	Large Amplitude Hits	MARSE or Amplitude	Activity		
(First Loading) Pres- sure vessels without full postweld heat treatment	Not applied	Not applied	Not more than E_4 hits above a specified amplitude	MARSE or amplitudes do not increase with increasing load.	Activity does not increase with increasing load.	V_{TH}	
Pressure vessels other than those covered above	Less than N_T counts per sensor for a specified load increase	Not more than E_T hits above a specified amplitude	Not more than E_4 hits above a specified amplitude	MARSE or amplitudes do not increase with increasing load.	Activity does not increase with increasing load.	V_{TH}	
GENERAL NOTES: (a) E_H , N_T , E_T , and E_4 are specified acceptance criteria values specified by the referencing Code Section. (b) V_{TH} is the specified evaluation threshold. (c) T_H is the specified hold time.							

Fuente: Norma ASME sección V artículo 12.

3.2.2. Guía estándar para el montaje del sensor piezoeléctrico¹⁶

Esta norma proporciona la guía sobre el montaje de los sensores, en la realización de este proyecto, esta operación se hace con frecuencia por lo que se sigue una norma con el propósito de tener los cuidados correspondientes para el procedimiento y garantizar el cuidado de los elementos del sistema de detección de fallas.

El método usado en el montaje del sensor de emisiones acústicas puede tener efectos significativos en el desempeño de este. Una óptima detección de emisiones acústicas requiere de unos accesorios de montaje y unos procedimientos adecuados para la instalación.

El propósito es fijar adecuadamente el sensor a la estructura y asegurar un acople óptimo y constante entre estos, para el ensayo se usa un montaje compresivo que pega el sensor y lo mantiene en íntimo contacto con la superficie de la estructura a través del uso de una fuerza, esta generalmente la proporciona un resorte, un tornillo, un imán o bandas elásticas. El uso de una grasa o sustancia acoplante es mencionado y tiene como función mejorar la transmisión de energía acústica entre la superficie de la estructura y el sensor.

3.2.2.1. Preparación de la estructura

La cara de contacto y acople con el sensor debe ser limpiada lo que mejora la detección de ondas deseada y asegurando la conexión para la transmisión de energía acústica entre la estructura y el sensor. La preparación de la superficie y la sustancia usada en el acople debe ser compatible con los materiales en el sensor y en la estructura. Posibles pérdidas en la transmisión de energía acústica son causadas por recubrimientos tales como pinturas, salpicaduras de soldadura y óxidos, la curvatura de la superficie analizada también puede provocar pérdidas.

¹⁶ *Standard guide for Mounting piezoelectric AE sensors, ASTM-E650-07.*

3.2.2.2. Criterios para la selección de la sustancia acoplante

El tipo de acoplante o sustancia de unión debe ser seleccionado con las apropiadas consideraciones acerca de los efectos que tiene el ambiente sobre este, por ejemplo: la temperatura, la presión, la composición del gas o el líquido donde está inmerso. Debe ser químicamente compatible con la estructura para evitar una posible corrosión rápida de la misma, en algunas situaciones es recomendable que el acoplante sea removido de la superficie completamente después de la inspección.

El espesor del acoplante puede alterar la efectividad del sensor. Una capa delgada de la sustancia es usualmente lo mejor. Hay que tener cuidado de que no queden burbujas ni vacíos en la zona de contacto y conexión, un desnivel entre uno u otro lado del sensor puede hacer que este reciba las ondas en una dirección no deseada lo que también podría reducir la sensibilidad del sensor.

Un método completo para la aplicación de la sustancia acoplante es colocar una pequeña burbuja en el centro del sensor, después, cuidadosamente se debe presionar el sensor sobre la superficie de la estructura a inspeccionar esparciendo el acoplante uniformemente desde el centro hasta las caras laterales del sensor.

3.2.2.3. Sistema de fijación

El montaje permanente del sensor sobre la superficie de estudio requiere técnicas especiales para que el sensor no se mueva ante los cambios del ambiente de la prueba, este no debe eliminar o bloquear o producir interferencia de ninguna manera en la propagación de las ondas de energía acústica, solo debe proporcionar un soporte para que el sensor sea unido con la estructura a ser inspeccionada, debe ser un dispositivo creado para sostener el sensor y además tener el mínimo efecto sobre las características de este.

Una vez el sensor es montado a la estructura se debe verificar la adecuada respuesta del mismo a las señales producidas por la estructura como se muestra más adelante.

3.2.3. Determinación de la reproducibilidad de la respuesta acústica del sensor¹⁷

El estándar define un procedimiento simple y económico para probar el desempeño de los sensores de AE, permite al usuario probar su estado, la degradación de un sensor o seleccionar uno con un desempeño igual al necesario, no proporciona una guía de calibración de los mismos.

Los datos recolectados de un ensayo de emisiones acústicas son fuertemente afectados por las características de los instrumentos usados para la adquisición, la sensibilidad es una de esas características, todos los componentes del sistema contribuyen a la sensibilidad, pero el sensor es el elemento más susceptible a variaciones producto de daños o envejecimiento en el mismo. Estos cambios pueden resultar en una ausencia de datos o una adquisición errada de los mismos. Para detectar tales variaciones es necesario tener un método para medir la respuesta de un sensor a una onda acústica.

Propósitos específicos para comprobar el buen funcionamiento de un sensor incluyen:

- ✓ Evaluar la estabilidad de su respuesta con el tiempo.
- ✓ Evaluar el sensor debido a un posible daño después de un accidente o sobreesfuerzo
- ✓ Comparar un número de sensores a ser usados en una inspección multicanal para estar seguros de que responden adecuadamente
- ✓ Comprobar la respuesta después de ser expuesto a un ciclo térmico o un ambiente hostil.

¹⁷ *Determining the reproducibility of acoustic emission sensor response, ASTM E-976.*

Es muy importante para conservar la veracidad de la evaluación que las características del sensor sean siempre medidas con el mismo cable de conexión y la misma impedancia.

El procedimiento tomado de la norma ASTM E976 está diseñado para medir la respuesta de un sensor de AE a una onda acústica arbitraria, no es una forma de calibración del sensor, esta calibración requiere un completo conocimiento de características de ondas acústicas existentes en el sensor o una guía de calibración destinada específicamente a este propósito.

Un requerimiento fundamental para evaluar la respuesta del sensor de emisiones acústicas es una fuente de ondas acústicas repetibles, las características de las ondas no necesariamente deben ser idénticas, pero deben poder producirse a voluntad.

Elementos esenciales para el procedimiento

- ✓ Sensor objeto de evaluación
- ✓ Bastidor
- ✓ Una fuente de señales
- ✓ Equipo de medición y grabación

3.2.3.1. Bastidor o bloque de pruebas

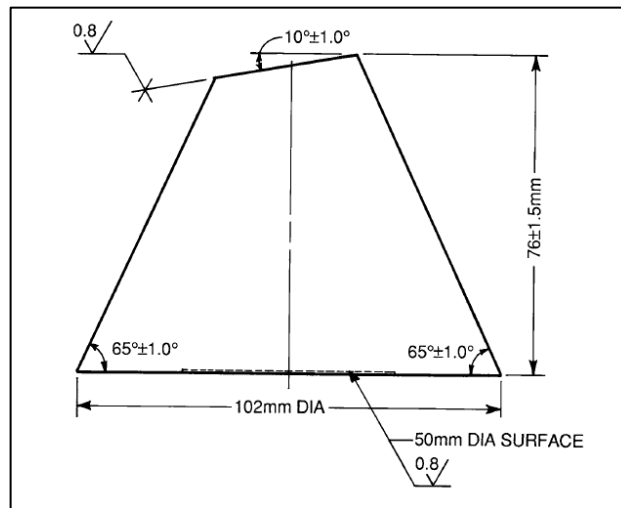
El diseño del bastidor no es primordial para la prueba, pero es recomendable el uso de un bastidor no resonante con la fuente de señales para evitar incoherencias en las señales eléctricas. El estándar establece 3 diseños básicos con los que se realiza actualmente la prueba.

- ✓ ***Conical block***

Esta pequeña estructura puede ser maquinada de un cilindro metálico, aluminio o acero de baja aleación, de 10 cm de diámetro, después de que la parte baja y alta

han sido refrentadas se cepilla la cara superior con un Angulo de 10° con lo que se obtiene una cara elíptica con aproximadamente 2.5 cm en uno de sus ejes usada para el montaje del sensor de emisiones acústicas. Una figura detallada se muestra a continuación:

Figura 32. Detalles geométricos del bastidor *conical block*



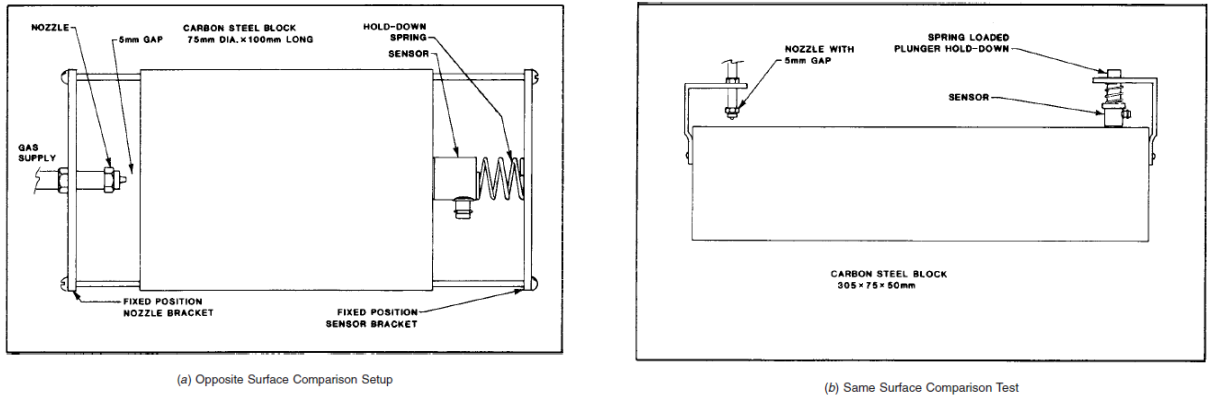
Fuente: ASTM E976.

La estimulación o señal puede ser aplicada en el centro de la cara inferior, la geometría cónica y la falta de paredes paralelas reduce el número de resonancias mecánicas que el bloque debe soportar. Una reducción mayor de la resonancia puede lograrse si se mecanizan todas las caras excepto donde está montada la fuente de las señales y se trata estas superficies con un recubrimiento epoxico.

✓ **Gas jet test block**

Dos modelos son mostrados a continuación, el primero es usado para comparaciones de caras opuestas las que producen principalmente ondas compresivas, el segundo arreglo es para realizar comparaciones sobre la misma cara las cuales producen principalmente ondas superficiales.

Figura 33. Bastidor *gas jet test block*.



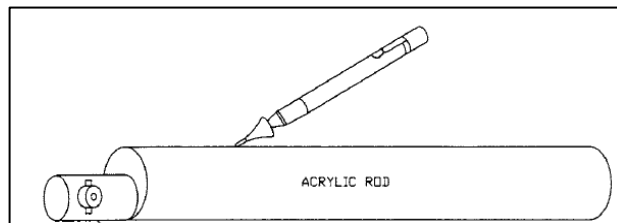
Fuente: ASTM E976.

El bloque cónico no resonante descrito anteriormente también puede ser usado con estos actuadores para evadir resonancias que puedan causar una mala adquisición de data.

✓ **Acrylic polymer rod**

Una varilla de polimetilmetacrilato es mostrada, el sensor es montado en la punta de la varilla y la excitación acústica es aplicada en el momento en el que el grafito de la punta de un lápiz se parte a una distancia constante desde el extremo del sensor en la varilla.

Figura 34 bastidor *Acrylic polymer rod*



Fuente: ASTM E976.

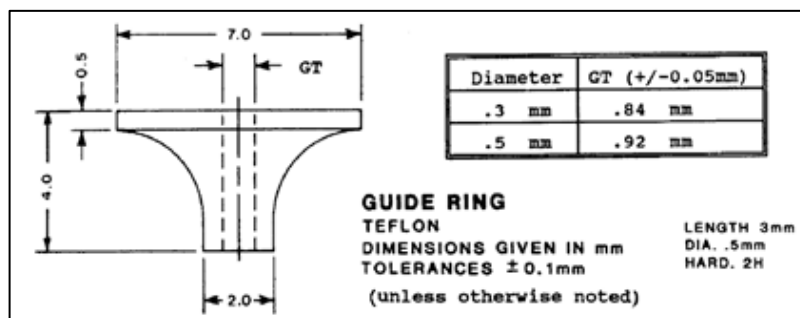
3.2.3.2. Fuente de las señales

Tres fuentes de señales son recomendados por la norma: un transductor ultrasónico controlado eléctricamente, un actuador neumático y una fuente de impulsos producidos por el rompimiento del grafito de la punta de un lápiz.

Una onda acústica repetible puede ser generada por el rompimiento cuidadoso de la mina de un lápiz sobre la superficie del bloque de prueba, cuando la punta se rompe, hay una liberación repentina de esfuerzo sobre la superficie del bloque donde la punta está tocando. Este esfuerzo repentino genera ondas acústicas, un lápiz que usa una punta con diámetro 0.3 [mm] produce una onda corta, una punta con un diámetro de 0.5 [mm] produce una señal más larga.

El asiento Nielsen mostrado en la figura 35 puede adicionar consistencia en el rompimiento del grafito, debe tenerse la precaución de siempre romper la misma longitud y el mismo tipo de lápiz, dos a tres milímetros de un lápiz 2H son preferidos. La punta debe ser quebrada todas las ocasiones durante una prueba a la misma distancia, con el mismo ángulo y orientación, se debe usar como mínimo una distancia de **10 [cm]** para obtener consistencia en los resultados, lo que se desea es una captura de la forma de onda adquirida por el sistema mediante el sensor.

Figura 35. Asiento Nielsen



Fuente: ASTM E976.

3.2.3.3. Equipo de Medición y grabación

El equipo de medición debe amplificar la señal antes de que esta pueda ser medida, después de la medición los resultados deben ser almacenados en una forma en que permita una fácil comparación, ya sea con otro sensor o con el mismo sensor en otro momento.

✓ Procedimiento

Primero se deben ubicar los, o el sensor bajo evaluación sobre el bloque de prueba, se deben usar fuerzas idénticas para unir el sensor y el bloque, puede ser usado una grasa acoplante conductora de baja viscosidad, deben ser tomadas varias mediciones antes de guardar una como validación, durante las mediciones iniciales se deben mostrar los datos para corroborar que no se encuentran dañados por saturación en el preamplificador.

✓ Interpretación de resultados

A corto plazo, la reproductibilidad de los resultados en términos de sensibilidad que cubre acciones tales como desmontar y montar nuevamente el sensor en operaciones sobre piezas o elementos de maquina en servicio, debe ser mejor que 3 dB si el test es realizado en condiciones de trabajo normales. A largo plazo la reproductibilidad debe ser verificada periódicamente comparando los datos con los de un sensor de prueba, variaciones en la respuesta del sensor superiores a 4 dB indica un daño o degradación en el sensor. Un criterio aceptable para decidir si un sensor está o no en condiciones de servicio es el hecho de que si el sensor supera una variación en la medición de 6 dB no debe ser usado en la inspección de máquinas para la medición de emisiones acústicas.

3.2.4. Verificación de desempeño del sistema de medición de AE¹⁸

Los métodos de verificación del sistema de detección de actividad micro-sísmica se basan en lanzar ondas acústicas producidas artificialmente sobre la estructura a ser inspeccionada, estas ondas viajan a través del todo el arreglo, de esta manera son detectadas en la misma forma en la que se detectaría una emisión acústica. La verificación del desempeño del sistema se debe hacer antes de la inspección pero puede ser usada en curso y al finalizar la evaluación.

La adquisición de datos de emisiones acústicas puede ser afectada por numerosos factores asociados con la instrumentación electrónica, cables, sensores, fijadores de sensores, la estructura sobre la que se monta el sensor, el ruido de fondo, y los parámetros seteados por el usuario sobre el software.

Para determinar el desempeño del sensor este debe ser sometido a algún tipo de onda de esfuerzo que viaje a través de la estructura inspeccionada, durante la evaluación al sistema esta onda acústica es producida por una fuente de señales como se describe en la sección anterior¹⁹. Diversos factores pueden afectar el desempeño del sistema de AE, algunos de ellos son el tiempo, factores físicos y medioambientales. En algunos casos esos cambios pueden tener una influencia significativa en la interpretación y los resultados de la inspección, una lista de algunos de estos factores se muestra a continuación:

Figura 36. Factores que afectan el desempeño del sistema AE

FACTOR	ITEM	AFFECT	VARIATION
Short Time (min)	Couplant	Thickness decrease	0 + 2 dB Sensitivity
Long Time (h)	Couplant	Sags	0 - 10 dB Sensitivity
Long Time (day)	Couplant	Dries out	0 - 70 dB sensitivity
Long Time	Electronics	Failure	0 - 70 dB Sensitivity
Increase Temp	Couplant	Evaporate	0 - 70 dB Sensitivity
Increase Temp	Electronics	Temporary Failure	0 - 70 dB Sensitivity
Decrease Temp	Couplant	Solidifies	0 + 5 dB Sensitivity
Increase Temp	Examination article	Density Decreases	0 - 2 %

Fuente: ASTM E-2374.

¹⁸ AE system performance verificación, ASTM E-2374.

¹⁹ Determining the reproducibility of acoustic emission sensor response, ASTM E-976.

4. DESCRIPCION DE LOS COMPONENTES PARA EL ENSAYO

4.1. SISTEMA MECANICO

4.1.1. Descripción del sistema mecánico de presurización

El AET que se realiza a los cilindros de GLP tiene la finalidad de determinar si estos son aptos para el servicio, con el propósito de llevar a cabo tal diagnostico debe seguirse como lo describe la norma ASME²⁰ una secuencia de presurización, en efecto, se elaboró un sistema mecánico encargado de crear la carga en el cilindro de interés, y por lo tanto, fue necesario adoptar una guía para la construcción del sistema, tal estándar de referencia es la NTC 5171²¹, que establece las mejores prácticas en la ejecución de pruebas hidrostáticas para cilindros de gas comprimido.

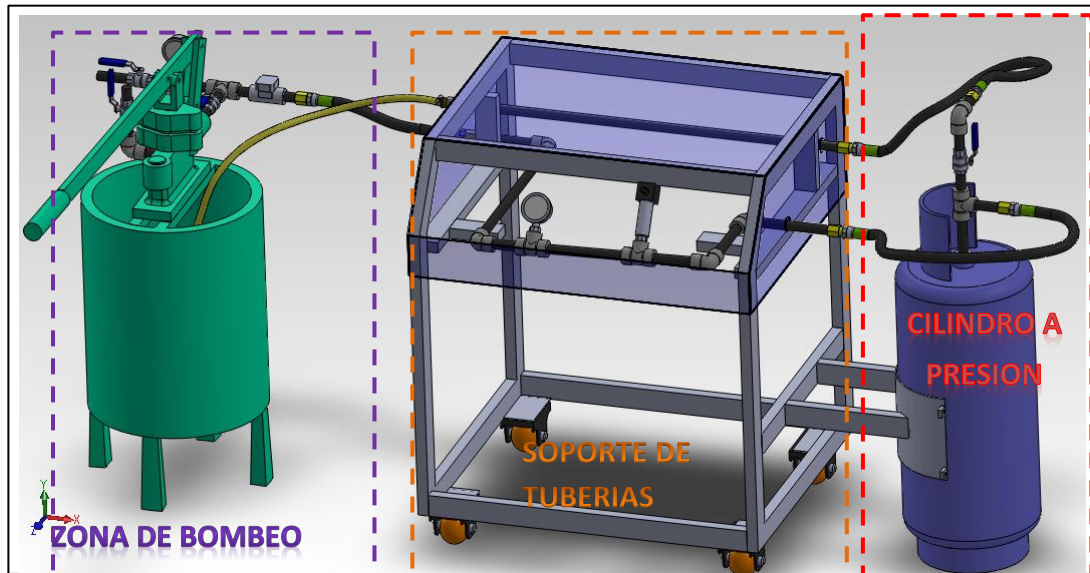
La norma establece en uno de sus apartados que se deben garantizar tres aspectos en el montaje del sistema hidráulico para realizar la prueba hidrostática, los cuales se tienen en cuenta para la construcción del banco de presurización de este proyecto:

- ✓ Que los accesorios resistan los niveles de presión del ensayo.
- ✓ No quede aire atrapado en el circuito hidráulico.
- ✓ No existan fugas.

²⁰ ASME section V article 12. Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing.

²¹ NTC 5171 métodos de pruebas hidrostáticas para cilindros de gas comprimido.

Figura 37. Subdivisión del sistema mecánico de presurización.



Fuente: Autores

4.1.1.1. Zona de Bombeo

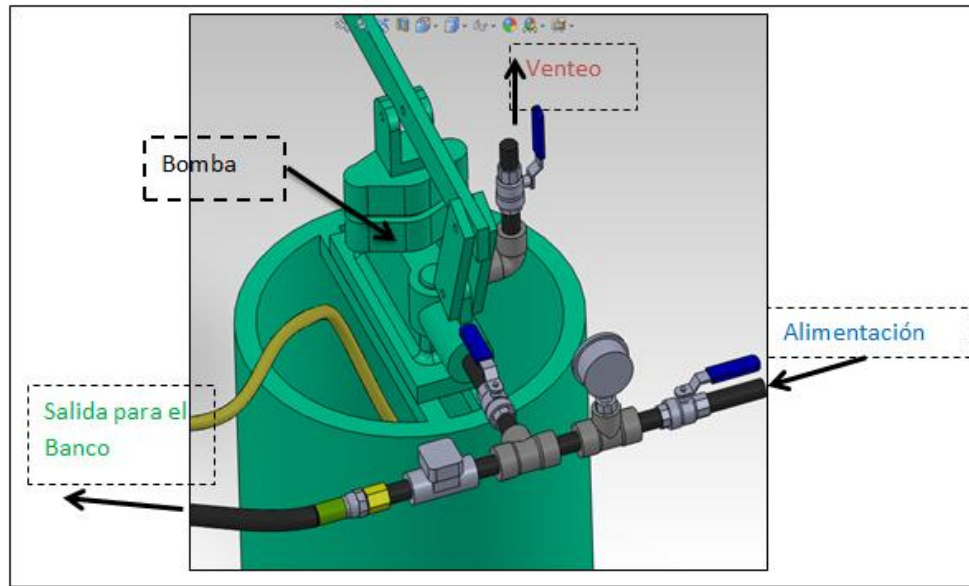
La zona de bombeo mostrada en la siguiente figura, tiene como eslabón principal una bomba manual, con la cual se presuriza la línea hidráulica, adicionalmente posee una ramificación por la cual ingresa el agua en la etapa de llenado del circuito hidráulico, dando mayor rapidez a este proceso, así mismo, posee una línea de venteo vertical, con la cual se ceba la bomba, finalmente la componen codos, tees, válvulas, niples, y un manómetro el cuál sirve para verificar si la bomba eleva presión.²²

4.1.1.2. Soporte de tuberías

Es una estructura que apoya y fija la línea hidráulica usando unas grapas metálicas, además, sirve como mesa para el computador y el equipo de emisiones acústicas. Como se observa en la figura 39, tiene 4 entradas/salidas que se conectan por medio de mangueras, con la zona de bombeo y el cilindro a presión.

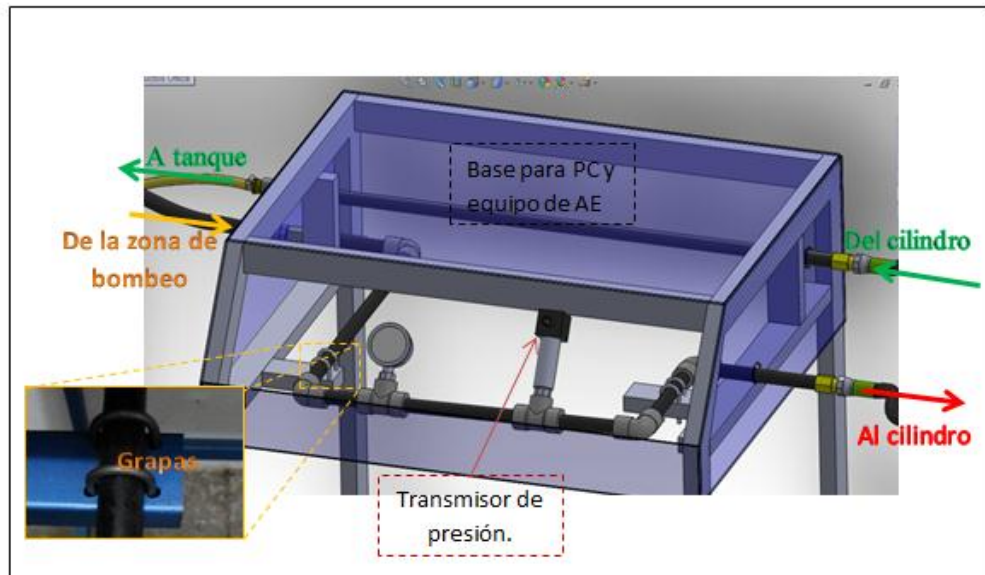
²² Especificaciones más detalladas se exponen en el Anexo C.

Figura 38. Elementos de la zona de bombeo.



Fuente: Autores

Figura 39. Soporte de la línea hidráulica.



Fuente: Autores.

Adicionalmente para reducir al máximo el atrapamiento del aire en el circuito hidráulico, como se muestra en la siguiente figura, se montó la tubería con un desnivel de pendiente positiva, con el fin de que las burbujas de aire subieran hasta alcanzar la válvula de purga (último accesorio sometido a presión), y por tanto abandonarían el segmento de la línea hidráulica que soporta presión.

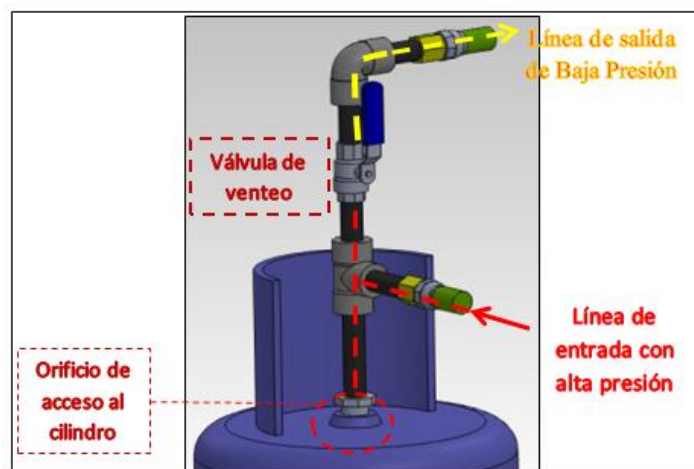
Figura 40. Desnivel en tubería para garantizar la purga del sistema



Fuente: Autores

4.1.1.3. Cilindro a presión

Figura 41. Cilindro de GLP, conexiones y accesorios.



Fuente: Autores

El cilindro de GLP es el componente del sistema mecánico al cuál se le realizara el estudio de integridad estructural. Este elemento posee un orificio a través del cual se realiza la entrada de agua, y por este mismo se desplaza por efecto de densidad el aire atrapado en el interior de él. Adicionalmente, posee una válvula de bola que corresponde al último accesorio que soporta presión en el ensayo, este elemento se utiliza para purgar el sistema, ya que al presurizar a un nivel bajo (30 psi), y accionarse en modo de apertura la válvula, el agua a presión, y el desnivel ascendente de la línea permiten que el aire abandone el circuito hidráulico como lo exige la norma.

4.1.2. Descripción de los componentes del sistema mecánico

Para garantizar los niveles de presión exigidos, se seleccionó los componentes del sistema mecánico con un factor de presión de trabajo igual o superior a los 1000 psi, de tal manera que el cilindro sea el elemento crítico (de menor resistencia) en el proceso de presurización, ya que el nivel de presión mínimo para su rotura es de 960 psi. A continuación se describen los componentes seleccionados, los cuales varían en su nivel de presión de trabajo (siempre mayor o igual a 1000 psi), dada la estandarización en particular para cada uno de ellos y también la diversidad encontrada en el mercado local. Adicionalmente, el anexo B reúne los certificados de calidad de los accesorios del sistema mecánico con los cuales se verifica que cumplen con el criterio establecido.

4.1.2.1. Tuberías

La línea hidráulica tiene un tipo único de tubos con dimensiones estándar que satisfacen los requerimientos de presión del sistema, difiriendo únicamente en la longitud según el montaje establecido. En tabla 1 se listan las especificaciones del tubo utilizado.

Figura 42. Tubo de la línea hidráulica



Fuente: <http://es.dreamstime.com> .

Tabla 1. Especificación tubería del sistema hidráulico.

Diámetro (in)	Schedule	Fabricación	Material	Tipo de Rosca
1/2	80	Cold-Drawn	ASTM A53	NPT ²³

Fuente: Autores

4.1.2.2. Codos

Estos accesorios permiten realizar cambios de dirección en la línea hidráulica, según la necesidad. Se implementó un tipo único de codo (figura 43) que satisfizo los requerimientos de presión, en la tabla 2 se resume las principales características del accesorio.

Figura 43. Codo implementado en la línea hidráulica.



Fuente: Autores.

²³ NPT National pipe thread

Tabla 2. Especificación del codo.

Angulo [°]	Diámetro [pulgadas]	Tipo Radio	Rating (Psi)	Tipo de rosca	Material
90	½	Corto	3000	NPT	ASTM A105N-05

Fuente: Autores.

4.1.2.3. Tees

Estos accesorios (figura 44) se utilizaron en el sistema para acoplar los elementos de medición de presión (manómetros y transmisor de presión), así como para realizar ramificaciones en la línea hidráulica.

Figura 44. Tee implementada para instalación de manómetro



Fuente: Autores.

Se implementó un tipo único de tee recta, la cual se especifica en la siguiente tabla.

Tabla 3. Especificación de la Tee.

Tipo	Diámetro [pulgadas]	Rating (PSI)	Tipo de rosca	Material
Recta	½	3000	NPT	ASTM A105N- 05

Fuente: Autores.

4.1.2.4. Buje de reducción

Este tipo de accesorio mostrado en la figura 45, permite realizar la instalación de los elementos de medición de presión, ya que las Tees (receptoras) son de $\frac{1}{2}$ " NPT y los sensores tienen una conexión de $\frac{1}{4}$ " NPT. Adicionalmente la entrada del cilindro de GLP es de $\frac{3}{4}$ " NPT y es unida a la tubería por este componente.

Figura 45. Buje de reducción de cabeza hexagonal de $\frac{1}{2}$ "x $\frac{1}{4}$ "



Fuente: Autores

La especificación del buje para adaptar los sensores es: *Hex Bushing $\frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{4}$ " 3000Psi NPT.*

La especificación del buje para la entrada del tanque es: *Hex Bushing $\frac{3}{4}$ " x $\frac{1}{2}$ " 3000Psi NPT.*

4.1.2.5. Válvulas:

✓ Válvula de bola

La función de este elemento en el subsistema hidráulico era permitir el acceso/salida del agua al/desde el cilindro de prueba, así como para realizar la purga del sistema; su función es estar completamente abierta o cerrada, sin realizar regulación alguna. La descripción de este accesorio se muestra en la tabla 4.

Figura 46. Válvula de bola instalada en la línea hidráulica.



Fuente: Autores.

Tabla 4. Características principales de la válvula de bola instalada

Tamaño (pulgadas)	Rating (Psi)	Conexión	Material del cuerpo y del bonete
1/2	1000	NPT	ASTM-A351-CF8M

Fuente: Autores.

✓ Válvula anti retorno:

Este accesorio es de vital importancia porque garantiza el sostenimiento del nivel de presión en la línea hidráulica, (por tanto en el cilindro) tras el accionamiento de la bomba manual.

Figura 47. Válvula antiretorno.



Fuente: Autores.

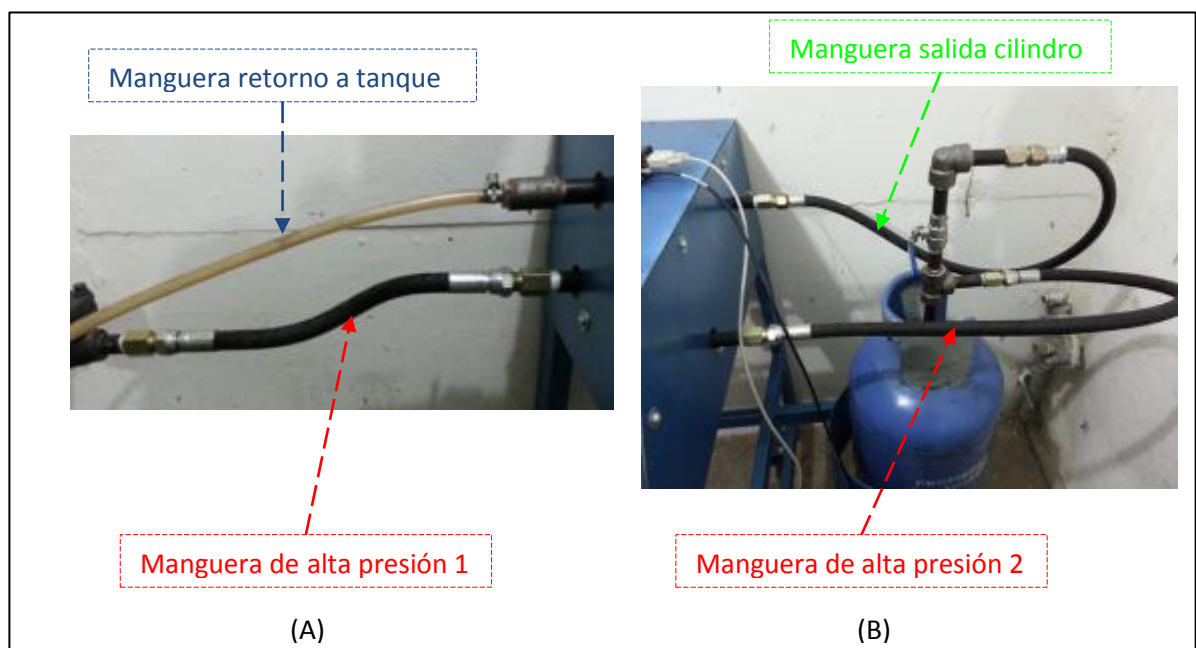
4.1.2.6. Mangueras

Se utilizaron tres mangueras diferentes, según el nivel de presión requerido en puntos determinados de la línea hidráulica.

✓ Mangueras de alta presión:

Estas mangueras son las principales en el subsistema mecánico, ya que deben resistir completamente los niveles de presión del AET, sin permitir fugas. Una de las mangueras conecta la salida del equipo de presurización con la entrada del banco que soporta la tubería como se observa en la figura 48-A, la segunda manguera conecta la línea hidráulica saliente del banco con el cilindro del ensayo como se muestra en la parte B.

Figura 48. Disposición de las mangueras de alta y baja presión en la línea hidráulica.



Fuente: Autores.

En la siguiente tabla se resumen las características de la manguera de alta presión.

Tabla 5. Especificación de la manguera de alta presión.

Manguera	Longitud (cm)	Diámetro nominal (pulgadas)	Diámetro exterior (pulgadas)	Presión de trabajo máxima (Psi)	Radio curvatura mínimo (pulgadas)
1	25	1/2	0.79	2320	7.01
2	90				

Fuente: Autores

✓ **Manguera de salida del cilindro**

Esta manguera se considera de baja presión debido a que no interactúa con la elevación de esta en el ensayo, en vez de esto, la manguera se sitúa seguida de la válvula de purga como se evidencia en la figura 48.b, que es el último elemento que sostiene la presión de la prueba, por tanto su nivel de presión siempre será la de tanque, en otras palabras la presión atmosférica. En adición, la facilidad de instalación jugó un papel importante en la selección de la manguera, ya que los accesorios de acoplamiento de esta, debían ajustar con la tubería del sistema (diámetro 1/2"); A continuación dan las especificaciones más relevantes.

Tabla 6. Características principales de la manguera de baja presión.

Tipo	Diámetro Interior (pulgadas)	Diámetro Exterior (pulgadas)	Máxima Presión de Trabajo (Psi)	Longitud (cm)
Manguera industrial de aire y agua	1/2	0.813	200	80

Fuente: Autores

Los elementos de fijación para las mangueras de altas y bajas presiones descritas anteriormente, se muestran en la siguiente figura:

Figura 49. Elementos de unión de la manguera de baja presión



Fuente: Autores

Las características de los anteriores elementos se muestran a continuación:

Tabla 7. Descripción de los componentes de unión de las mangueras.

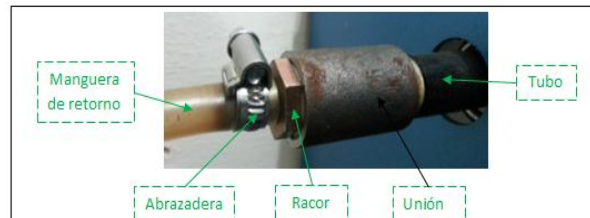
Accesorio	Descripción
Boquilla para manguera de cabeza giratoria	Es unido a la manguera mediante el grafado, utilizando un abrazadera de refuerzo como elemento de sujeción, se encarga de enlazar la línea de tubería con la manguera, posee de manera especial un o' ring que realiza el sello hidráulico, en este caso con el adaptador macho que se monta en el tubo receptor, eliminando las fugas de la unión.
Abrazadera	Es una banda metálica que presiona la boquilla, para que no se salga de la manguera. Esto se hace mediante el proceso de grafado, que consta de prensar los elementos de unión al extremo de la manguera, fijándolos con gran fuerza.
Adaptador macho	Este componente se instala en el tubo receptor para enlazar la manguera con la línea hidráulica, además su extremo que es roscado posee un bisel a 60° que realiza sello hidráulico con el o' ring de la boquilla de cabeza giratoria.

Fuente: Autores

- ✓ Manguera de retorno a tanque

Esta manguera es el último elemento del circuito hidráulico ya que realiza el retorno de agua al tanque, se une a la salida del banco de ensayo como se muestra adelante

Figura 50. Elementos de fijación de la manguera de retorno a tanque



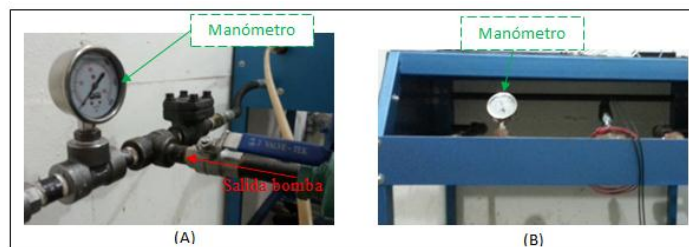
Fuente: Autores.

Las especificaciones de los elementos de unión de la manguera de retorno a tanque se muestran en el plano 06 del anexo C.

4.1.2.7. Manómetro

Hay dos ubicados en la línea hidráulica, el primero (figura 51.a) en la ramificación que se tiene en la salida de la bomba, previo a la válvula anti retorno; con este manómetro se puede comprobar que el cheque no está fugando, pues si así lo fuese su aguja indicaría un valor diferente de cero. El segundo manómetro (figura 51.b) se encuentra frontalmente ubicado en el soporte de tubería.

Figura 51. Manómetros de la línea hidráulica.

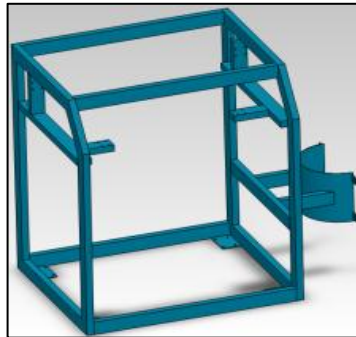


Fuente: Autores.

4.1.2.8. Estructura

Este componente soporta la línea hidráulica, conecta el equipo de bombeo con el cilindro a inspeccionar, y está fabricada en tubo de acero carbono de perfil rectangular: 2"x 1"-calibre 20. detalles constructivos en el plano 04 del anexo C.

Figura 52. Estructura de soporte de la línea hidráulica.

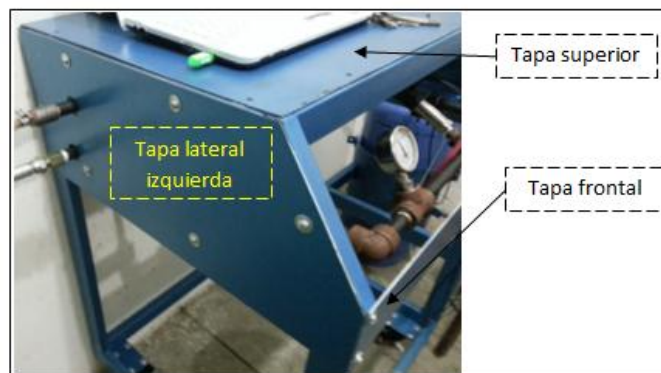


Fuente: Autores.

4.1.2.9. Tapas

Las tapas son láminas metálicas cortadas según el perfil de la estructura, que la cubren y que dan soporte a los componentes electrónicos (lámina superior). En el plano 05 del anexo C se dimensionan estos componentes.

Figura 53. Tapas de la estructura.



Fuente: Autores.

4.1.2.10. Ruedas

Son cuatro componentes que permiten el desplazamiento del soporte de tubería, siendo otros elementos más (junto con las mangueras) que dan flexibilidad en el montaje del sistema mecánico, adicionalmente luego de instalado el banco brindan equilibrio pues poseen un freno que las bloquea inhibiendo el movimiento de la estructura. El distribuidor para este proyecto fue Induradas y su referencia es 2-1/2PG17A.

Figura 54. Ruedas del soporte de tubería.

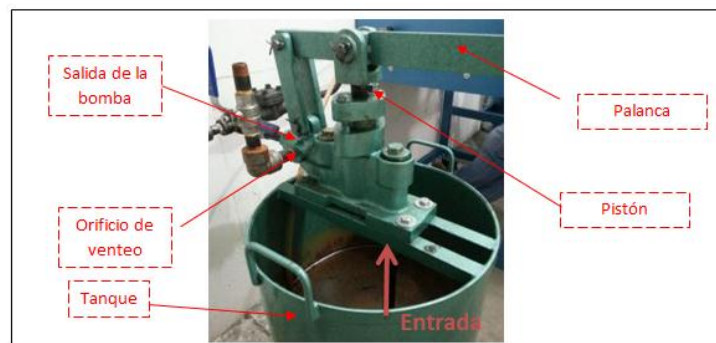


Fuente: Autores.

4.1.2.11. Bomba hidráulica manual

Este elemento se encarga de elevar la presión en el cilindro de GLP tras el movimiento manual de una palanca de gran longitud (menor fuerza de accionamiento), en la tabla 8 se listan sus características.

Figura 55. Bomba hidráulica manual



Fuente: Autores

Tabla 8. Características de la bomba hidráulica.

TIPO	CLASE	Flujo [cm^3 /stroke]	Capacidad de Tanque [L]	Presión trabajo máxima [psi]	Fabricante
BDP	Reciprocante de pistón y simple acción	≈25	≈66	≈1000	Herman

Fuente: Autores.

4.1.2.12. Cilindro de GLP

Este componente es fabricado a nivel nacional bajo el estándar de NTC 522-1²⁴, “norma que establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben someterse los cilindros de acero con costura, destinados al almacenamiento y transporte, de propano, butano o sus mezclas en cualquier proporción con capacidad desde 5kg hasta 46kg”.

Figura 56. Cilindro de GLP usado en el AET.



Fuente: Autores.

²⁴ NTC 522-1 recipientes metálicos. Cilindros de acero con costura para gases licuados del petróleo (GLP) con capacidades de 5 Kg a 46 Kg.

En la siguiente tabla se listan los niveles de presión que maneja el cilindro.

Tabla 9. Especificación del cilindro de GLP.

CAPACIDAD [kg]	PRESION [PSI]		
	MAXIMA SERVICIO	MAXIMA DE PRUEBA HIDROSTATICA	MINIMA DE ROTURA
18	240	≈520	960

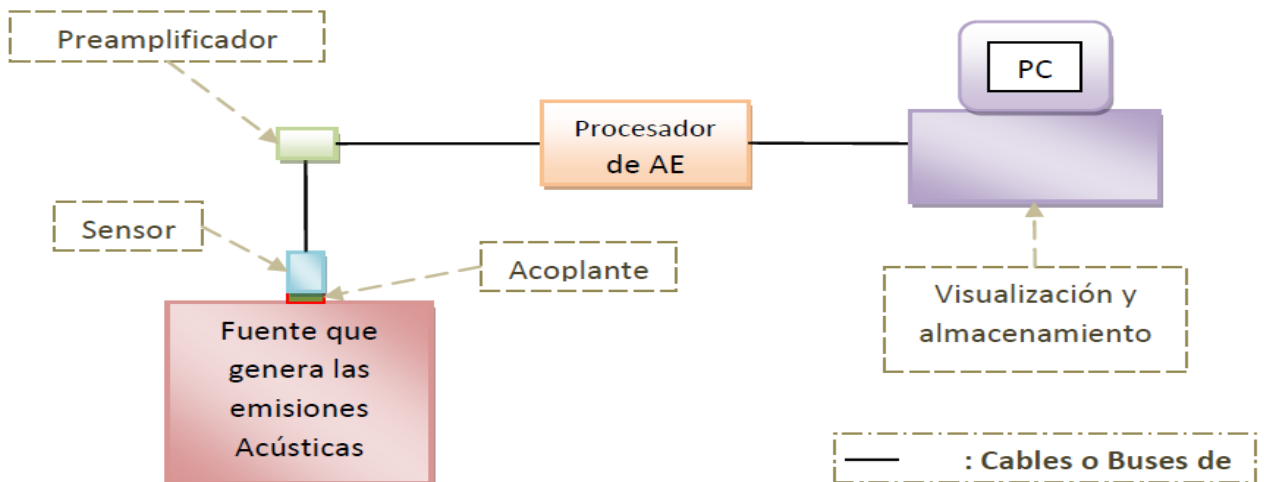
Fuente: Autores.

4.2. SISTEMA ELECTRONICO

4.2.1. Diagrama de montaje del sistema electrónico

El siguiente diagrama muestra los componentes necesarios para detectar, procesar y visualizar las emisiones acústicas en un sistema convencional de detección:

Figura 57. Esquema del sistema de detección, procesamiento de AE



Fuente: Autores

4.2.2. Características técnicas normalizadas de los elementos electrónicos

En el desarrollo de este proyecto se ha investigado acerca de las recomendaciones frente a las características técnicas establecidas por las principales entidades normativas mundiales, por con siguiente a continuación se clasifican tales requerimientos, correspondiente a cada norma:

4.2.2.1. Características normalizadas-Acoplante

Tabla 10. Tipos de acoplantes

Parámetro	ASTM	ASME	MERCOSUR
Tipo de sustancia	Grasa de silicona	No establecido	Vaselina Grasa de vacío
Otras especificaciones: Estable a cambios de temperatura, buenas propiedades acústicas.			

Fuente: Los autores

4.2.2.2. Características normalizadas-Sensor

Tabla 11. Requerimientos del sensor

Parámetro	ASTM	ASME	MERCOSUR
Rango de frecuencia sensor	20-1200 [kHz-kS/s]	100-400 [kHz-kS/s]	100-300 [kHz-kS/s]
Sensibilidad	≥ 77 [dBv a1v/ μ bar]	-80 [dBv a1v/ μ bar]	≥ 77 [dBv a1v/ μ bar]
Otras especificaciones: variación de sensibilidad de < 3 dB a la temperatura de prueba, Aislamiento electromagnético			

Fuente: Los autores.

4.2.2.3. Características normalizadas-Bus de señal

Tabla 12. Características del cable

Parámetro	ASTM	ASME	MERCOSUR
Longitud máxima	1.83[m]	1.8[m]	1.8[m]
Otras especificaciones: cable protegido contra interferencia electromagnética, opción- cable coaxial, conectores que aseguren un correcto acople en la prueba			

Fuente: Los autores.

4.2.2.4. Características normalizadas-Preamplificador

Tabla 13. Requerimientos del preamplificador

Parámetro	ASTM	ASME	MERCOSUR
Precisión	± 1 dBv dentro del rango de frecuencia especificado	No establecido	± 1 dBv dentro del rango de frecuencia especificado
Ruido	$< 7 \mu V_{rms}$	No establecido	$< 7 \mu V_{rms}$
Modo de rechazo	40 [dB]	40 [dB]	40 [dB]
Filtro, atenuación de banda	24[dB/octava]	24[dB/octava]	24[dB/octava]
Otras especificaciones: los sensores que incluyan el preamplificador también deben poseer las anteriores especificaciones.			

Fuente: Los autores.

4.2.2.5. Características normalizadas-Bus de datos

Tabla 14. Características del cable de señal del preamplificador al procesador.

Parámetro	ASTM	ASME	MERCOSUR
Longitud máxima	150[m]	150[m]	150[m]
Otras especificaciones: pérdida de señal < 1dB por cada 30[m], conectores que aseguren un correcto acople durante toda la prueba.			

Fuente: Los autores.

4.2.2.6. Características normalizadas-Procesador de señales AE

Tabla 15. Requerimientos del procesador

Parámetro	ASTM	ASME (mas detallado)	MERCOSUR
Precisión	±2 dB	±2 dB	±2 dB
Rango de temperatura	4.4 a 37.8 [C]	5 a 50 [C]	4 a 40 [C]
Otras especificaciones: el procesador debe estar provisto de filtros, el cable 3 procesador-pc varía dependiendo del fabricante.			

Fuente: Los autores.

4.2.3. Características base del sistema electrónico extraídas de las normas

Basándose en las características establecidas por las normas y los criterios de selección estudiados anteriormente, se establecen los parámetros principales necesarios que deben cumplir los componentes del sistema de detección de AE, en cuanto a la velocidad de muestreo del equipo que va a procesar los datos, se adoptara el criterio de ingenieros de Nacional Instrumento, estos expertos expresan que la velocidad de muestreo debe ser igual a 10 veces la frecuencia de la señal que se quiere estudiar.

Tabla 16. Requerimientos técnicos de los componentes electrónicos.

Característica	Hardware de adquisición de datos	Sensor	Cables
Velocidad de muestreo	12 MS/s (ver nota)	20-1200 KHz	No aplica
Resolución	16 bit	No aplica	No aplica
Precisión	2 dB	≥ 77 [dBV a1v/ μ bar]	No aplica
Frecuencia de resonancia	No aplica	< 250 KHz	No aplica
Canales dedicados EA	1	No aplica	No aplica
Conexión	USB	BNC	BNC
Bus de datos	USB	Cable BNC a BNC	No aplica
Portabilidad	Alta	Alta	Alta
Rango de temperatura	4 a 50 °C	-45 a 85 °C	-20 a 80
Filtro	Incorporado	No aplica	No aplica
Preamplificador	Incorporado	No aplica	No aplica
Soporte técnico	Si	Si	Si

Fuente: Los autores.

4.2.4. Descripción de los componentes electrónicos adquiridos para el ensayo

El hardware de adquisición de datos seleccionado es el *USB AE NODE 1283-5015* con preamplificador integrado, sensor 1282-4003-1 y bus de datos *USB* de Physical acoustic corporation, PAC²⁵.

²⁵ PAC. *Physical Acoustics Corporation*.

4.2.4.1. Nodo de Emisiones Acústicas

Figura 58 Nodo de adquisición de datos



Fuente: Los autores.

su selección se realiza debido a que cumple con la mayoría de los requerimientos expuestos en la alternativa base, Por otro lado, el USB AE Nodo es un sistema de bajo costo y fácil conexión al computador con driver libre para C++ y *Labview*. tiene un procesador digital de señales de *AE* dedicado de un canal que caracteriza las propiedades, eventos y tiempos de la emisión.

Figura 59 Conexiones laterales nodo de AE



Fuente: Los autores.

Figura 60. Conexiones laterales, comunicación pc y otros módulos.



Fuente: Los autores.

✓ **Características del *AE node*.**

Las características generales son:

- Alimentación y operación a través del puerto *USB*
- Construcción robusta
- Amplificador interno
- Filtros analógicos y digitales programables
- Opciones de localización y forma de onda
- Controlador *labview/C++* disponible incorporado
- Software de procesamiento de *AE*

Las características Técnicas son:

- Entrada para emisiones acústicas (*AE Input*): 1 canal por cada “*USB AE NODE*”
- Frecuencia de muestreo: 20 [MS/s]
- Resolución: 18 bits
- Entradas paramétricas: Ch1, ± 10 [v], 16 bits; Ch2-4, 0-16[v], 16 bits
- Digital I/O : 2
- Preamplificador incorporado
- Sistema operativo: *Windows xp, vista, Windows 7 requiere actualización de controladores.*
- Peso: 230 [gr]
- Potencia de consumo: <0.5 [watt]

4.2.4.2. Sensor

Se hace adquisición de un sensor serie alpha PN 1282-4003-1, anexo D, que satisface las necesidades impuestas por las normas para la realización del ensayo y que ha sido recomendado por expertos de PAC.

Figura 61. Sensor de AE

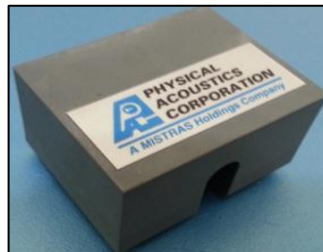


Fuente: Autores.

✓ **Características y especificaciones técnicas**

- Frecuencia de muestreo entre 100 y 900 [kHz]
- Precisión ≥ 77 [dBv a 1V/ μ bar]
- Rango de temperatura -45 a 85 [C]
- Alta portabilidad
- Conexión BNC
- Costo 388 USD (al día 9 de marzo de 2012)

Figura 62. Acoplador magnético



Fuente: Autores.

4.2.4.3. Bus de señal-Bus de datos

La conexión entre el sensor y la tarjeta de adquisición de datos requiere cuidados especiales, la información podría ser afectada por cualquier circunstancia lo que hace que el cable que transmite los datos sea especialmente diseñado para tal fin.

Figura 63. Bus de datos



Fuente: Autores

Características

- ✓ Conectores BNC
- ✓ Alta portabilidad
- ✓ Rango de temperatura de -20 a 80 [C]
- ✓ Protección contra interferencia electromagnética
- ✓ Longitud 1 [m]

También se usa para la prueba cables de conexión USB entre la tarjeta de adquisición de datos y el computador y un cable serial entre la fuente de alimentación y amplificación del transductor de presión y este mismo.

Figura 64. Conexión USB, transmisión de datos entre el nodo de EA y el ordenador.



Fuente: Autores.

Figura 65. Conexión DB9, entrada paramétrica de presión



Fuente: Los autores

4.2.4.4. Transductor de presión

Para adquirir información sobre la presión que el recipiente está soportando durante la prueba hidrostática y el monitoreo mediante emisiones acústicas en necesario un sensor de presión que lee y envía la data al hardware de AE.

Figura 66. Transductor de Presión



Fuente: Los autores.

Características y especificaciones técnicas

- ✓ Diseño compacto
- ✓ Construcción robusta
- ✓ Rango de presión entre 0 y 1000 [psi]
- ✓ Precisión 0.5-1 % sobre el rango
- ✓ Voltaje de alimentación 24(12~36)VDC (Amplify signal), 10(6~12)VDC (mV output)
- ✓ Salida 4-20mA(Two wire), 0-5V, 0-10V(Three wire); 2mV/V, 3.3mV/V (PT124S-210)
- ✓ Rango de temperatura de trabajo entre -40 y 80 [C]
- ✓ Conector eléctrico Hirschmann
- ✓ Conexión a proceso ½ NPT

Figura 67. Conector eléctrico Hirschmann



Fuente: Autores.

4.2.4.5. Circuito de recepción de señal de presión

Figura 68. Dispositivo de acondicionamiento de señal de presión



Fuente: Autores.

Para realizar correctamente el protocolo de medición, se hizo necesaria la instalación de un instrumento transmisor de presión y del respectivo circuito de adecuación para la recepción de su señal en el computador.

Sujetos a las características del transmisor de presión PT124B-210 escogido para el montaje fue diseñado el circuito, que básicamente cumple 2 funciones: la primera, alimentar el sensor; y la segunda, adecuar la señal para ser adquirida por

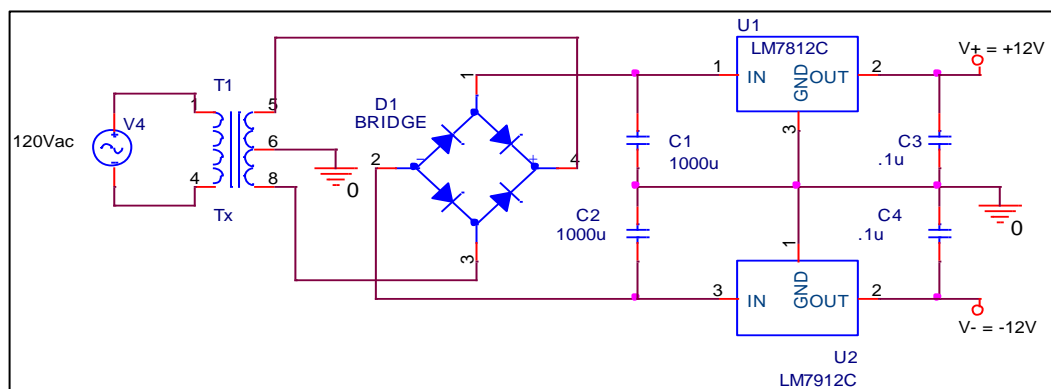
el modulo *USB-AE NODE* y de esta manera tener la señal de presión como una variable en la interfaz del computador.

Una tensión de alimentación entre 12 y 36 [V] para alimentar el transductor y una salida de 4 a 20 [mA] como señal al nodo de emisiones acústicas son los parámetros que limitan el diseño del circuito de acondicionamiento de la señal, De esta manera el circuito consta de una fuente de tensión y el correspondiente circuito de adquisición y acondicionamiento, que serán explicados a continuación:

✓ Fuente de tensión

Se requiere alimentar el transmisor de presión y asimismo los amplificadores operacionales de la etapa de adecuación, por tanto se utilizó un transformador de tensión con derivación central de 120/12 [Vac], un circuito rectificador de onda completa, algunos capacitores para disminuir el rizado en la tensión de salida, y los reguladores de tensión LM7812/LM7912 positivo y negativo respectivamente; conectados de la siguiente manera para obtener a la salida de esta etapa se tiene una salida de 12 v y -12 v de corriente continua. Notándose que posee una configuración típica de una fuente de tensión.

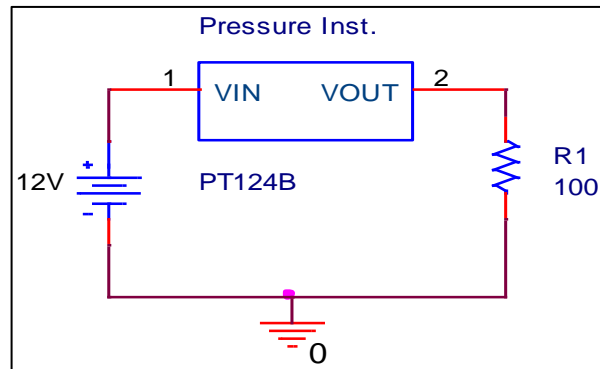
Figura 69. Fuente de tensión dual de 12Vdc



Fuente: Autores.

La señal de salida del instrumento de presión es una señal analógica de corriente de 4 a 20 [mA]. Esta salida de 4 a 20 [mA] representa el valor de la presión medida que viene dada de 0 a 1000 [psi].

Figura 70. Conexión 2 hilos del instrumento de presión



Fuente: Autores.

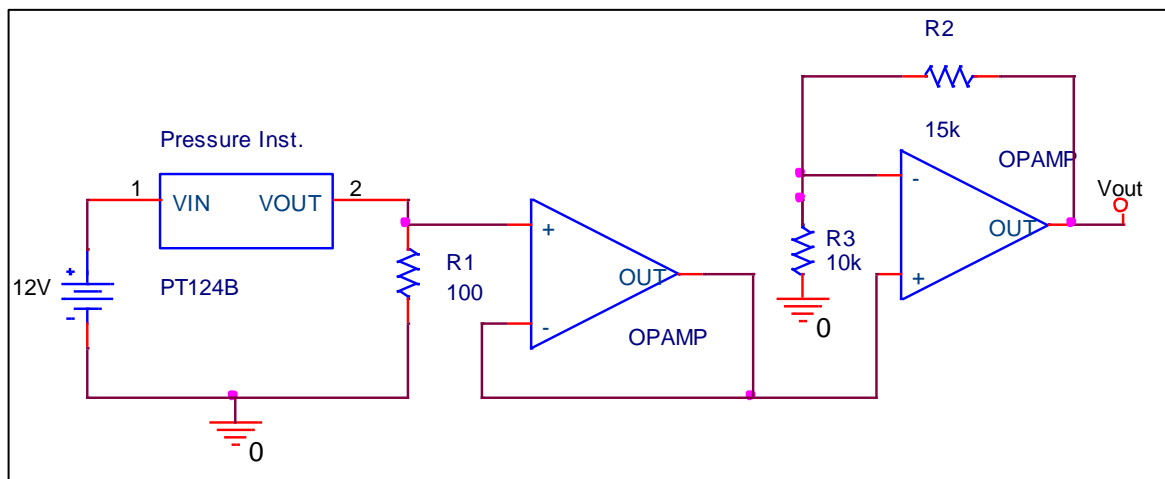
Para la adquisición de esta señal se usa una resistencia R1 de 100 Ω en serie con la alimentación y el instrumento de presión como se muestra en la Figura 71. Al tenerse una corriente que varía en la resistencia de 4 a 20 [mA], se genera en la resistencia una tensión que varía entre 0.4 y 2 Volts, transformando de esta manera la señal de corriente en una señal de voltaje que es proporcional a la presión a la que se encuentra el transmisor, lo que la hace más fácil de trabajar y además, cabe tener en cuenta que el modulo *USB-AE NODE* que recibe las señales de las emisiones acústicas posee un puerto para la recepción de señales de tensión adicionales a la interfaz, lo cual es un punto positivo y además de ello, reduce el trabajo para la recepción de la señal.

Si bien, el trabajo se reduce ahora a amplificar la señal de tensión para obtener una señal de tensión entre 1 y 5 Volts. En la primera etapa, se utiliza un amplificador operacional en la configuración de seguidor de tensión para desacoplar la etapa de amplificación de la resistencia R1, y de esta manera que la

carga que se conecta en paralelo no vaya a afectar a R1 ya que podría afectar la medición.

Luego del seguidor de tensión viene una etapa de amplificación utilizando la configuración de amplificador no inversor la cual tiene una ganancia A_v que viene dada por la expresión $A_v = 1 + \frac{R_2}{R_3}$. Y se escogen R2 y R3 como 15k Ω y 10k Ω respectivamente para así tener una ganancia A_v de 2.5 v/v. El circuito se muestra en la Figura 71.

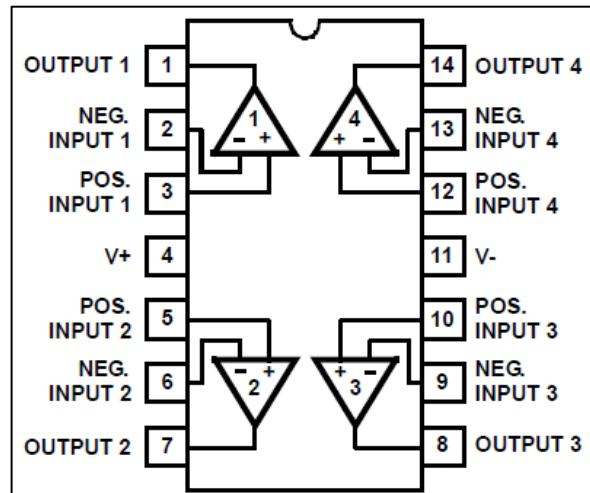
Figura 71. Circuito de aislamiento y amplificación



Fuente: Autores.

Para esta etapa fueron utilizados los siguientes elementos: 3 resistencias de: 100 Ω , 10k Ω y 15k Ω , la fuente diseñada en el punto anterior, y el circuito integrado LM324 que posee 4 Amplificadores Operacionales como se muestra en la figura 72.

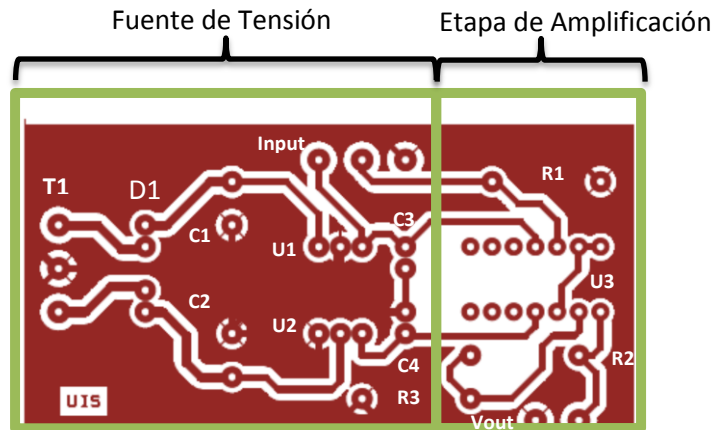
Figura 72. Pinout amplificador operacional LM324



Fuente: Intersil, [PDF]: LM324 *Datasheet*.

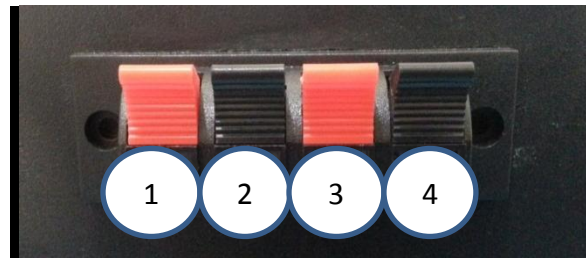
Luego del diseño del circuito y verificación del mismo, se realizó el diseño de la PCB con cada una de las etapas descritas anteriormente como se muestra en la figura 73.

Figura 73. Circuito de aislamiento y amplificación



Fuente: Autores.

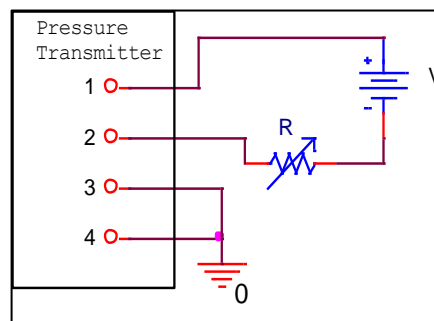
Figura 74 Diagrama de conexión lateral



Fuente: Autores.

La numeración encontrada en la figura 74, corresponde con la numeración de la conexión del instrumento de presión PT124B-210, mostrado en la Figura 75.

Figura 75. Diagrama de conexión del Transmisor de Presión PT124B-210



Fuente: Autores.

4.3. SOFTWARE AE WIN LITE

AE win Lite es un programa de la autoría de PAC, que almacena y reproduce datos con información de las AE sensadas, sus características principales son:

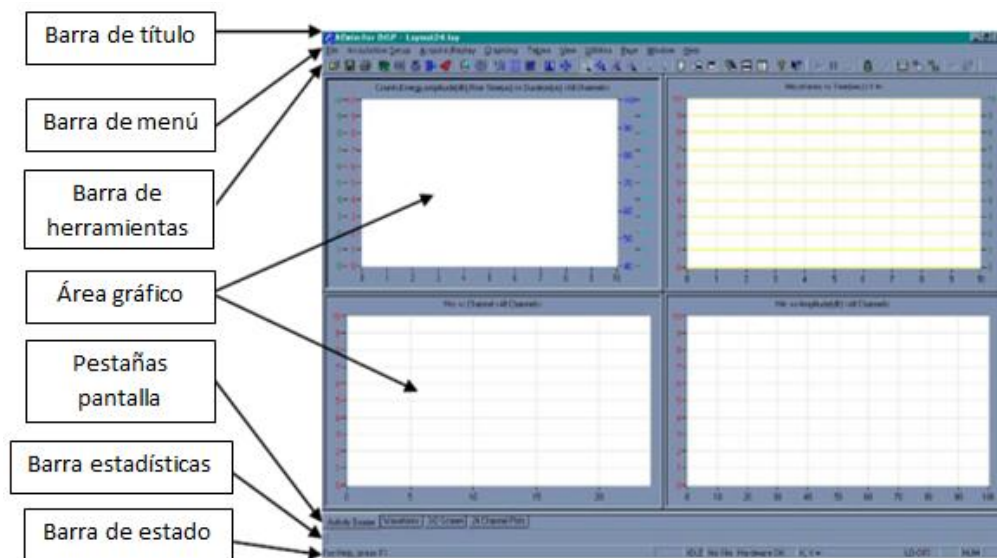
- ✓ Procesamiento de formas de onda de las AE.
- ✓ Usa barras de herramientas que incluyen íconos de ajuste, controles para la adquisición, y cuadros estadísticos sobre los resultados.

- ✓ Capacidad de establecer diferentes áreas y tipos de gráficas, limitado únicamente por la resolución de la pantalla.
- ✓ Maneja gráficas 2-D, 3-D, entre estos histogramas, formas de onda, gráficos de dispersión entre otras.
- ✓ Según la licencia, adopta modos de localización de eventos de AE, en 1, 2 y 3D.
- ✓ El anexo E corresponde a la guía de instalación del programa que PAC entrega tras la compra del producto.

4.3.1. Iniciando con AEwin

El primer paso tras la instalación del software es correr el programa, que se hace de la misma manera que un programa convencional de Windows, inicio, programas, *Physical Acoustics*, y el ícono de AEwin. Seguidamente, el programa inicia por defecto usando un archivo llamado "Layout.LAY", y muestra una interfaz como la de la siguiente figura:

Figura 76. Interfaz de inicialización de AE Win Lite



Fuente: Manual del programa AE Win, modificado por el usuario.

- ✓ Barra de título: Esta es una barra estándar de Windows, que incluye el Logo de PAC, y botones para minimizar, restaurar, maximizar, y cerrar el programa.
- ✓ Barra de Menú: La barra de menú principal entrega una serie de comandos, tales como *File*, *Graphing*, *Utilities*, entre otros sub-menús desplegados, que muestran más opciones para configurar el programa.
- ✓ Barra de herramientas: Varios de los ítems de la barra de menú pueden ser de rápido acceso en esta barra.
- ✓ Área de gráfico: Es la zona de mayor importante de la pantalla, ya que es posible visualizar en forma de gráficas la información obtenida tras el AET.
- ✓ Pestañas de pantalla: AE win puede mostrar varias páginas de gráficos, conmutando entre una y otra pestaña de la pantalla.
- ✓ Barra de estadísticas: Provee las estadísticas del ensayo, muestra según la configuración, el tiempo transcurrido, la cantidad de hits detectados, el nivel de presión adquirido entre otros.
- ✓ Barra de estado: Provee información acerca del estado de la prueba, como prueba en pausa, prueba activa, o abortada, entre otros.

El software maneja dos tipos de archivos en su configuración, de extensiones “.LAY” y “.DTA”, respectivamente.

El archivo “.LAY” es un archivo de inicialización que almacena la información de configuración para el AET, es decir la configuración del *hardware*, de las gráficas, de la adquisición, los filtros, las alarmas y de los modos de ubicación. Para abrir este tipo de archivos esta la opción de “*Open Layout*”, para guardarlos en “*Save Layout*”, o “*Save Layout As*”. El segundo tipo de archivo usado en AE Win Lite,

tiene la extensión “.DTA”, su función es almacenar los datos adquiridos tras el AET. Se crea un nuevo archivo “.DTA” al iniciar la adquisición de datos de AE, esto se hace usando el cuadro de dialogo “*Start Acquisition*” de la opción de menú “*Acquire/Replay*”. Tanto los archivos “.LAY” y “.DTA” deben ser guardados en una carpeta ubicada en un directorio conocido, ya que estos son los archivos que se manipulan con frecuencia.

4.3.2. Configuración para la adquisición

En el menú desplegable “*Acquisition Setup*”, se encuentra el cuadro de dialogo “*Hardware Setup*” (figura 77) donde se ajustan todas las configuraciones del software antes del AET.

Figura 77. Cuadro de dialogo “*Hardware Setup*”

AE Channel	Threshold		Analog Filter		Waveform Setup		
	Type	dB	Lower	Upper	Sample Rate	Pre-Trigger	Length
<input checked="" type="checkbox"/> 1	FIXED	45	20kHz	1MHz	5MSPS	20.0000	1k

Fuente: Manual del programa AE Win, modificado por el usuario.

4.3.2.1. *Standard Channel Setup.*

En esta pestaña es posible habilitar o no, los canales del sistema de AE y ajustar sus parámetros de adquisición. Particularmente, dada la licencia del software es posible habilitar la adquisición de formas de onda o “*Waveforms*”, herramienta adicional para el análisis de resultados tras el AET. A continuación se describe cada uno de los parámetros a configurar, en esta pestaña:

- ✓ *AE Channel:* Es posible habilitar los canales que serán usados en el AET.
- ✓ *Threshold:* Aquí se configura el umbral de detección en dB; hay dos opciones para su configuración, “*Fixed*” (fijo) que se usa cuando se desea

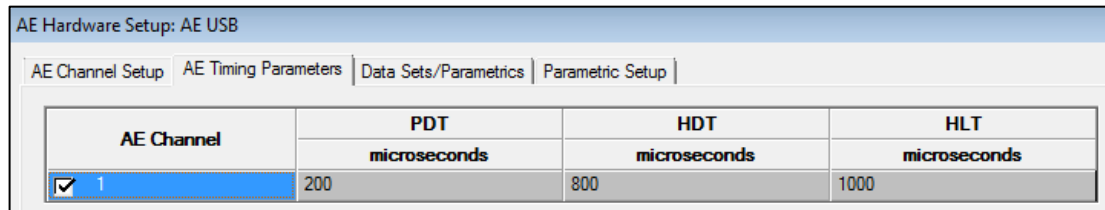
mantener invariante el nivel del umbral y “*Floating*” (flotante) cuando se requiere implementar un umbral flexible dado las condiciones de ruido de fondo variante y de gran magnitud.

- ✓ *Analog Filter*: Esta opción permite plantear los límites inferior y superior de frecuencia disponibles para el filtrado análogo de la señal.
- ✓ *Sample Rate*: Esta es la rata a la cual la tarjeta de adquisición de datos muestrea las formas de onda, en base de segundos. Una rata de muestreo de 1MSPS (Mega Samples Per Second) o 1MHz, significa que la forma de onda es muestreada cada 1[μ s], una rata de muestreo de 2 MSPS significa que se toma cada 1/2" [μ s], etc. Este parámetro se ajusta desplegando las opciones disponibles en el cuadro de valor y seleccionando el valor deseado.
- ✓ *Hit Length*: Este parámetro determina el tamaño del mensaje o información del “*Waveform*”. En la lista desplegable están los valores de 1k a 7k.
- ✓ *Pre-Trigger*: Este parámetro ajusta el tiempo en micro segundos, de recolección de datos previo al punto de superación del umbral. El valor mínimo que se puede tomar es cero, y el valor máximo se calcula dividiendo el “*Hit Length*” entre el “*Sample Rate*” en MHz. Si por ejemplo, la longitud del hit es 1 k (1k=1024) y el muestreo se hace a 4 MHz, entonces el máximo valor del *Pre-Trigger* sería $1024/4=256 \mu$ s.

4.3.2.2. Advance Channel Setup

Tras desplegar esta pestaña es posible nuevamente, habilitar o deshabilitar los canales necesarios para el AET, adicionalmente es posible configurar los valores de PDT, HDT, LDT.

Figura 78. Ventana de *Advance Channel Setup*



The screenshot shows the 'AE Hardware Setup: AE USB' window with the 'AE Channel Setup' tab selected. It contains a table with the following data:

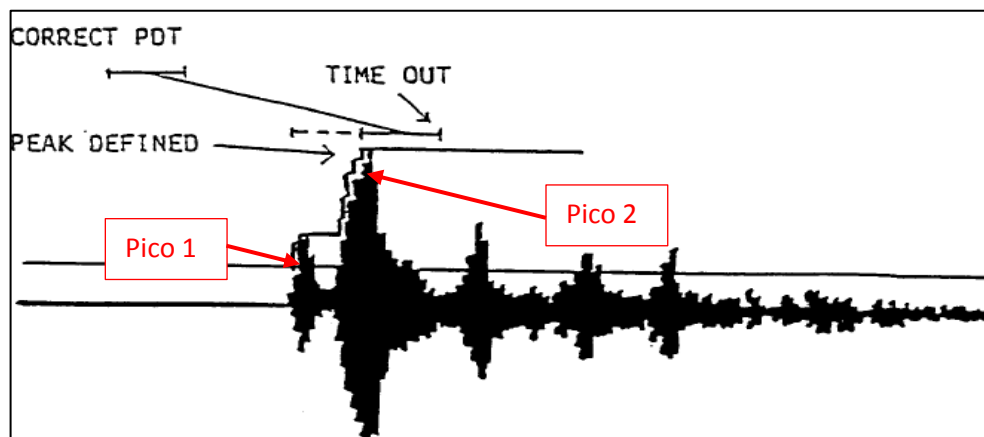
AE Channel	PDT	HDT	HLT
	microseconds	microseconds	microseconds
<input checked="" type="checkbox"/> 1	200	800	1000

Fuente: Manual del programa AE Win, modificado por el usuario.

✓ **Peak Definition Time (PDT)**

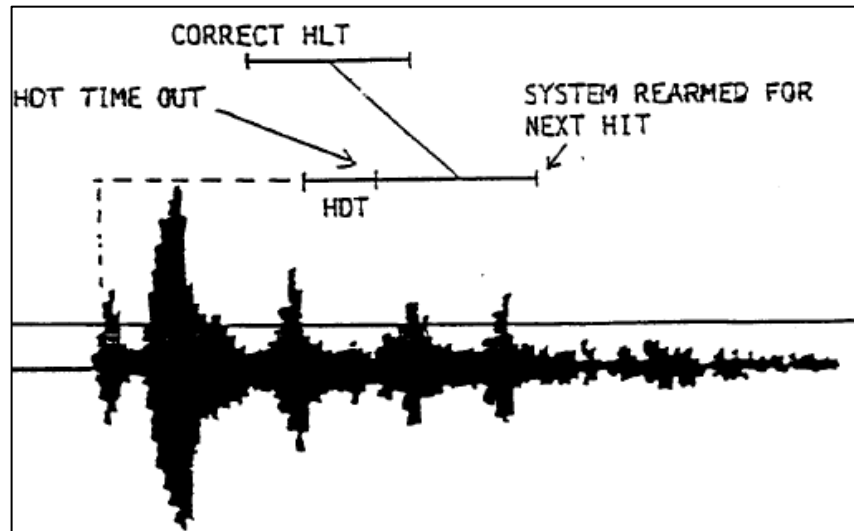
Su función es permitir la determinación correcta del tiempo de subida de la forma de onda de la AE. Como se observa en la figura 79, existen dos picos de amplitud, uno (pico 1) más alto que el otro (pico 2), cada vez que se alcanza un pico aparece el PDT, es decir si en este lapso de tiempo no aparece un pico más alto entonces el tiempo de subida o *Rise Time* de la forma de onda queda definido por este primer pico, por el contrario si aparece un nuevo pico en un tiempo antes del valor del PDT, entonces se inicia de nuevo el conteo y si ningún otro pico aparece antes del PDT, el *Rise Time* queda definido por este nuevo pico, en el caso de la figura el pico 2.

Figura 79. Correcto ajuste del PDT



Fuente: Apéndice del manual del programa AE Win.

Figura 81. *Hit Lockout Time*



Fuente: Apéndice del manual del programa AE Win.

PAC en su manual recomienda algunos valores de PDT, HDT, y HLT, según el material del componente a examinar, en la siguiente figurase listan algunos.

Figura 82. Valores de PDT, HDT y HLT de propósito general

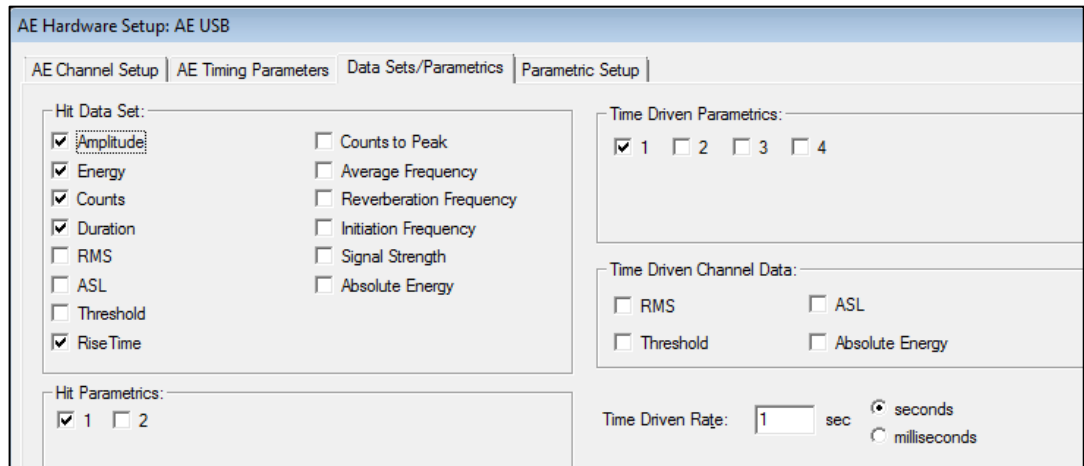
	PDT	HDT	HLT
Composites, Non-Metals	20-50	100-200	300
Small Metal Specimens	300	600	1000
Metal Structures (high damping)	300	600	1000
Metal Structures (low damping)	1000	2000	20000

Fuente: Manual del programa AE Win.

4.3.2.3. *Data Set/Parametrics.*

Esta pestaña que se muestra en la figura 83, permite seleccionar los parámetros tales como amplitud, tiempo de subida, energía, etc. que se desean medir. En efecto al elegir algunos de estos se aumenta la capacidad de procesamiento de datos del *AE node* y se economiza espacio de almacenamiento.

Figura 83. Pestaña de configuración *Data Set/Parametrics*



Fuente: Apéndice del manual del programa AE Win.

✓ **Hit Data Set**

Este cuadro le permite al usuario seleccionar cuales de los parámetros medidos estarán disponibles en la descripción de cada hit. Los parámetros pueden seleccionarse marcando la caja de activación a la izquierda del parámetro. El tiempo de la prueba o “*time of test*” es un parámetro que no aparece en este cuadro ya que siempre está incluido en el “*Hit Data Set*”.

✓ **Hit Parametrics**

Con esta opción es posible seleccionar cual entrada paramétrica será incluida en la descripción de cada hit. Adicionalmente, tanto en el cuadro de “*Hit Parametrics*” como el “*Time Driven Parametrics*”, deben incluir los mismos recuadros activados, para que no emerja una señal de error.

✓ **Time Driven Parametrics y Time Driven Channel Data**

Adicionalmente a las descripciones del hit, AEWin permite recolectar los valores de RMS, ASL, *Threshold*, *Absolute Energy*, *Cycle Counter* y *parametric inputs*, en intervalos de tiempo regulares incluso en la ausencia de actividad AE.

Adicionalmente, el “*Time Driven Rate*” es una opción que controla la frecuencia de las lecturas y los datos que deben incluirse en los reportes. Así que, el tiempo que se configura en esta caja es el utilizado en la actualización de las gráficas, mostrando los valores de la entrada paramétrica y el tiempo del ensayo, incluso cuando no hay hits detectados. El intervalo de configuración es de 10[ms] a 1800 [s], y debe ser múltiplo de 10[ms]. Los valores típicos de ajuste están en el rango de 1[s] a 60[s].

4.3.2.4. Parametric Setup

Esta pestaña (figura 84) permite escalar los voltajes medidos en la entrada paramétrica o “*Parametric Input*”, de tal manera que el sistema muestra el correspondiente valor de la carga o valores de presión. Además, es posible configurar las unidades de medidas [kN, psi], y así visualizarlas en los ejes de las gráficas.

Figura 84. Pestaña *Parametric Setup*

Channel	Software Scaling			Hardware	
	Multiplier	Offset	Units	Gain	Filter
1	1.0000	0.0000	Volts	x1	<input type="checkbox"/>
2	1.0000	0.0000	Volts	x1	<input type="checkbox"/>
3	1.0000	0.0000	Volts	x1	<input type="checkbox"/>
4	1.0000	0.0000	Volts	x1	<input type="checkbox"/>

Fuente: Manual del programa AE Win.

El proceso de escalamiento recomendado por AEwin, se logra asignado un valor a los recuadros “*Multiplier*” y “*Offset*”. Particularmente la entrada paramétrica usada en el presente proyecto es asignada a un transmisor de presión, así que, usando un manómetro patrón se puede observar dos valores separados de presión (L1 y L2), y medir la respectiva salida de voltaje del transmisor (V1 y V2). Entonces los

valores correctos para los recuadros de escalamiento se calculan usando las siguientes ecuaciones:

$$Multiplier = \frac{L_1 - L_2}{V_1 - V_2}$$

$$Offset = \frac{(V_1 * L_2 - V_2 * L_1)}{(V_1 - V_2)} = L_1 - Multiplier * V_1$$

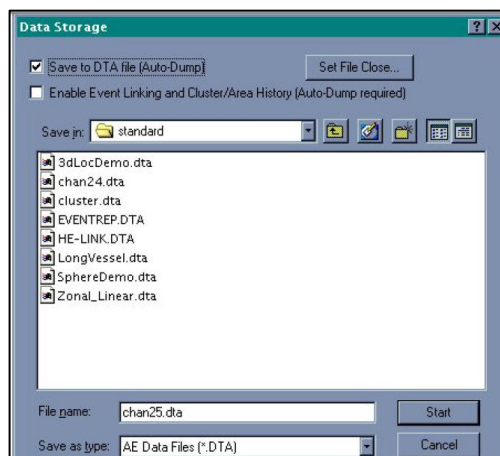
Una vez se da Ok, queda ajustada la entrada paramétrica que aparecerá en las listas de configuración de los diversos tipos de gráficas.

4.3.3. Adquisición de datos

4.3.3.1. *Acquire*

Tras la configuración del sistema de adquisición, se procede a comenzar el AET vía la opción “*Acquire*”, del menú “*Acquire/Replay*”, o presionando la tecla F9. En consecuencia, aparece un cuadro de dialogo (figura 85) en el cual se registra el nombre del ensayo, que tendrá una extensión “.DTA”, para ser almacenado como archivo de datos de AE.

Figura 85. Cuadro de dialogo “*Data Storage*”



Fuente: Manual del programa AE Win.

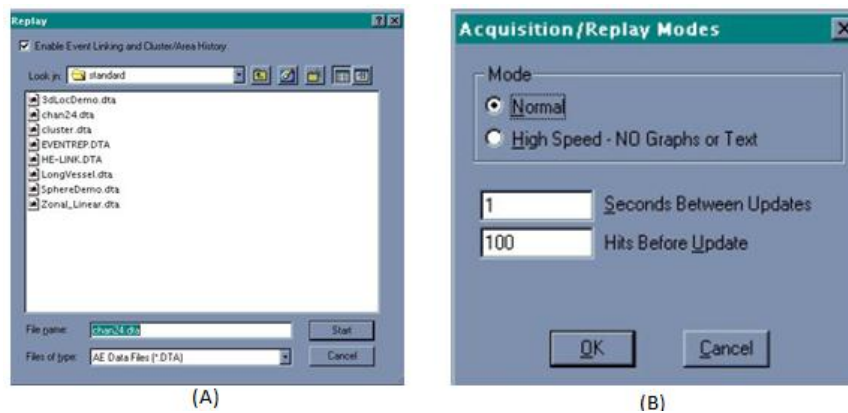
En la parte superior del cuadro están dos opciones importantes:

- ✓ *Auto-Dump*: Si esta caja es activada, es posible guardar de manera permanente los datos de AE, por el contrario si se inactiva, ningún dato de la información AE será almacenado y únicamente será posible visualizar en tiempo real la información del AET.
- ✓ *Enable Event Linking and Cluster/Area History*: Son opciones usadas en las técnicas de localización de eventos, entonces en el caso del AET para el presente proyecto deben estar inactivas, ya que su utilización el desempeño en cuanto al muestreo del sistema de medición.

4.3.3.2. *Replay*

Esta opción (figura 86.A) es esencialmente la misma que el cuadro de dialogo “*Acquire*”, no obstante la opción *Enable Event Linking and Cluster/Area History* no está disponible. Una vez que el archivo de datos ha sido seleccionado y se oprime el botón “*Start*”, es posible reproducir la información AE que este contiene. Durante la reproducción, el sistema lee los datos almacenados en el disco, actualizando gráficas/tablas a la velocidad especificada en el cuadro de dialogo “*Display Mode*” (figura 86.B).

Figura 86. Cuadros de dialogo de la opción *Replay*



Fuente: Manual del programa AE Win.

Hay dos modos disponibles de “*Adquisition/Replay Mode*” en AE win. El modo “*Normal*”, el cual al ser seleccionado permite visualizar gráficas, tablas, estadísticas, sin restricción alguna. Y la opción “*High Speed*” que es implementada cuando se espera obtener gran actividad acústica, de tal manera que las gráficas y tablas quedan inactivas, y únicamente es posible visualizar las estadísticas ya que se da prioridad a la transferencia de datos al disco para un análisis posterior.

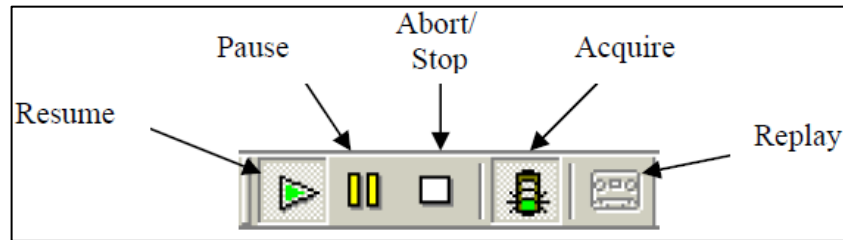
Las opciones “*Seconds Between Updates*” y “*Hits Before Updates*”, determinan cada cuanto se redibujan las gráficas y las tablas. Es decir que se produce una actualización cuando el tiempo especificado sea logrado o la cantidad de hits ajustados sean detectados, cualquiera que ocurra primero. PAC en su manual recomienda valores para los primeros ensayos, de 3 [s] y 100 [Hits], no obstante para ensayos de larga duración se replantea el valor del tiempo.

4.3.3.3. Corrida del ensayo

Hay algunos comandos de acceso rápido, que se usan para controlar el ensayo o la reproducción de un archivo existente:

- ✓ *Pause*: Temporalmente detiene el ensayo.
- ✓ *Resume*: Usado para continuar un ensayo pausado.
- ✓ *Stop*: Utilizado para finalizar un ensayo pausado. Este es el comando apropiado para finalizar la prueba, y cualquier dato almacenado en el “*Buffer*” es guardado en el disco (si el *auto-dump* está activado).
- ✓ *Abort*: Es usado para terminar un ensayo que no se ha pausado. Esta es una manera rápida de abandonar el ensayo y puede ser usado incluso si el hardware no está respondiendo. Es usado para emergencias o cuando los datos no están siendo almacenados en disco.
- ✓ *Acquire*: Este icono se usa para iniciar el ensayo AE.
- ✓ *Replay*: Se usa para cargar un archivo de datos e iniciar su reproducción.

Figura 87. Icono de adquisición de la barra de herramientas



Fuente: Manual del programa AE Win.

4.3.4. Graficación en AEwin

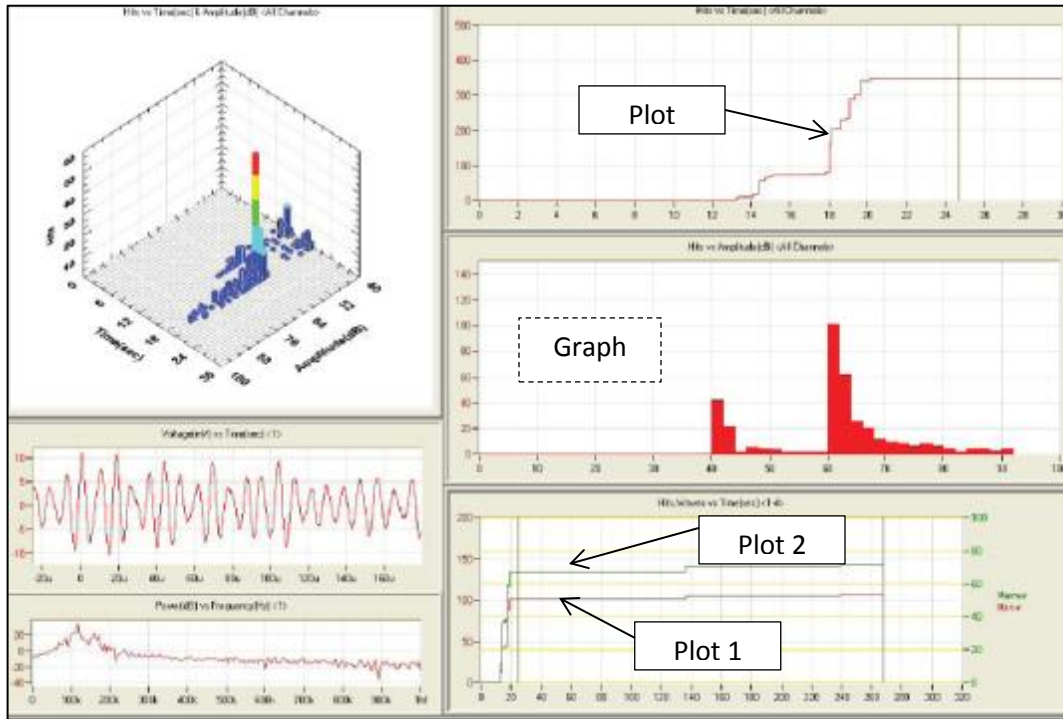
Este es el componente de mayor importancia del *software* porque es con el que se realiza el análisis de los datos tras la ejecución del AET. En su interfaz gráfica (figura 88), el programa maneja pestañas o “pages”, en las cuales es posible crear múltiples gráficas (*graphs*), dentro de las cuales es posible ubicar diferentes curvas (relación de varios parámetros) y que el software denomina “plots”.

Una gráfica en AE win, se crea usando la opción “New Graph”, y para personalizarla se acude al cuadro de dialogo “Graph Setup” (figura 89) que se muestra al dar *click* derecho sobre la gráfica, sin embargo, la apariencia de este cuadro no siempre es la misma y varía según el tipo de gráfica que se elija, las cuales se describen a continuación.

- ✓ *2D Histogram*: Es un histograma convencional (figura 90.A), que puede ser de barras si se selecciona la opción “filled” o puede ser una línea si se escoje “not filled”. Tanto en el eje Y, como en el X, se puede escoger cualquier parámetro AE, así como las entradas paramétricas, y el tiempo del ensayo, adicionalmente, tienen la opción de ser auto ajustable, o mantener valores fijo (máximo y mínimo), manejando además la escala logarítmica si se requiere. El eje Y particularmente tiene la propiedad de mostrar sus resultados de manera acumulativa, o instantánea, y el eje X

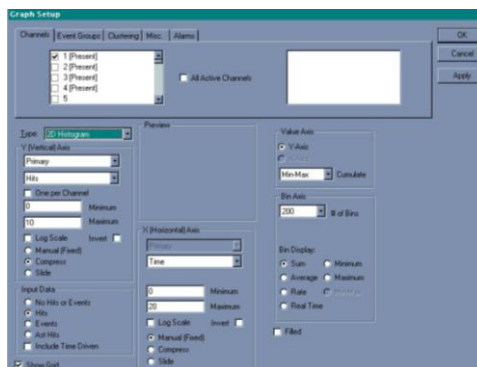
seleccionando el valor de la cantidad de “bins”, permite ajustar su resolución en cuanto a los intervalos en los que se encuentra dividido.

Figura 88. Distribución del área de gráfico de AEwin



Fuente: Manual del programa AE Win, modificado por los autores.

Figura 89. Cuadro de dialogo *Graph Setup*



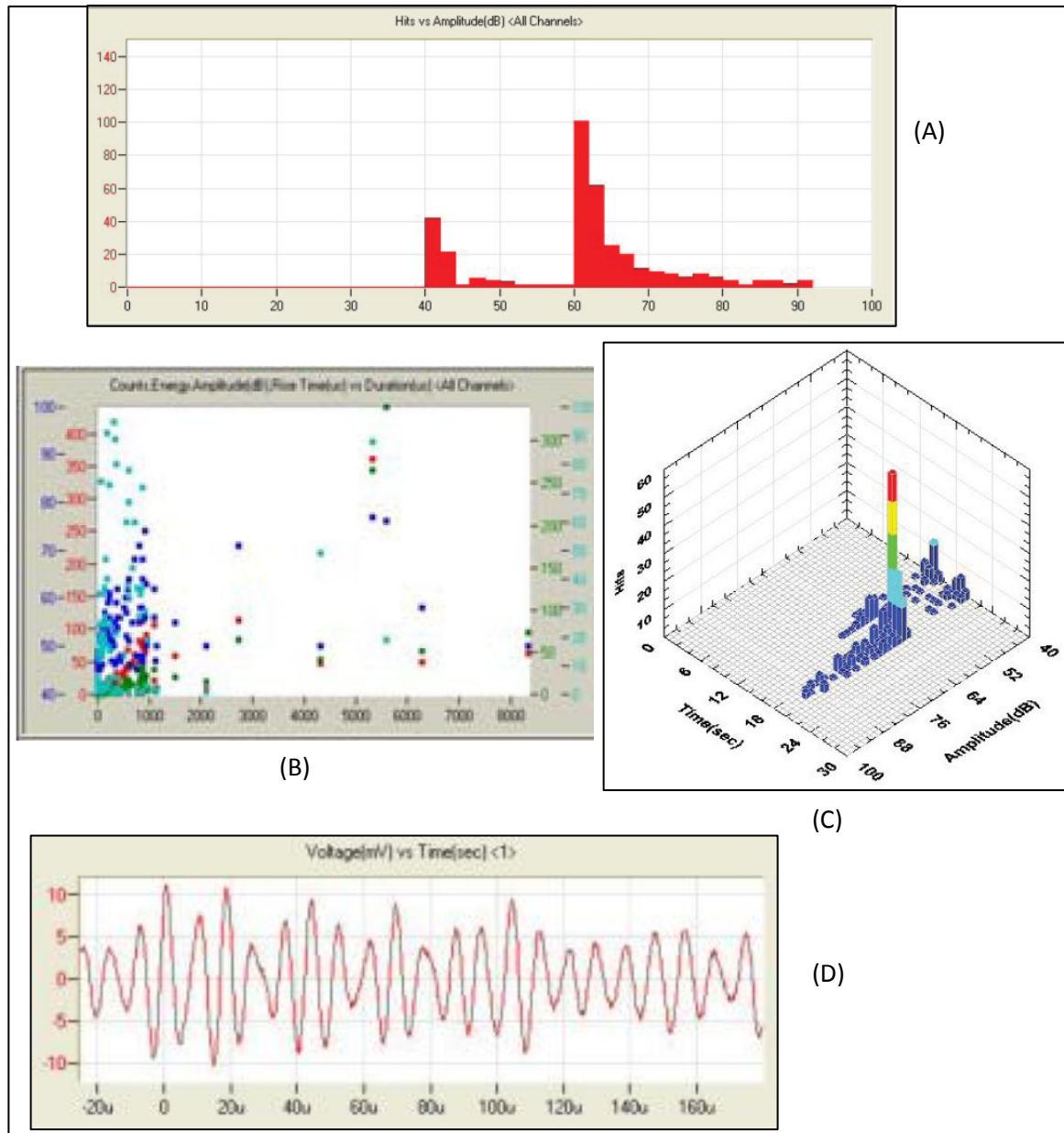
Fuente: Manual del programa AE Win Lite.

- ✓ *2D Scatter (Point Plot)*: Este es el tipo de gráfica básico que usa dispersión de puntos , al igual que el histograma goza de la configuración de los eje X y Y.
- ✓ *2D Binned Scatter*. Es una variante del “*2D Scatter*”, Este tipo de gráfica asigna una división de 200 intervalos al eje X y al eje Y, así que cada punto dibujado en ella, no corresponde a un valor único, sino que representa un pequeño rango de valores del parámetro asignado a dicho eje. Su ventaja radica en que permite visualizar los datos rápidamente, sin perder velocidad en ensayos de larga duración, como sucede con su análogo, no obstante se pierde un poco de resolución.
- ✓ *2D Colored Scatter*. Variante del “*2D Scatter*”, que permite visualizar diferentes niveles de los parámetros usando como diferenciador una gama variada de colores. Se observa este tipo de gráfica en la figura 90.B.
- ✓ *3D Histogram*: Corresponde a un gráfico de barras estándar (figura 90.C), que maneja tres ejes, X,Y y Z, a los cuales se les puede asignar diferentes parámetros AE.
- ✓ *3D Scatter (Point Plot)*: Es un gráfico de dispersión en tres dimensiones.
- ✓ *Waveform*: Es una gráfica que muestra las forma de onda del hit detectado (figura 90.D), que su eje Y se encuentra por defecto escalado en dB, y su eje X escalado en [μ s], además muestra el nivel de umbral establecido en la configuración del sistema de AE.

En la pestaña “*Channels*” del cuadro de dialogo “*Graph Setup*”, se selecciona cuales canales del sistema AE se requieren visualizar en la gráfica. En la pestaña “*Event Groups*” define que grupos están activos en la gráfica (si se definieron

previamente). La pestaña “Clustering” permite configurar el agrupamiento en las gráficas tipo dispersión de puntos. La pestaña “Misc” permite crear una leyenda que sirve para identificar las curvas que se encuentran en el gráfico. Finalmente está la pestaña de alarmas que permite establecer niveles de alerta

Figura 90. Tipos de gráficas usadas en AEwin

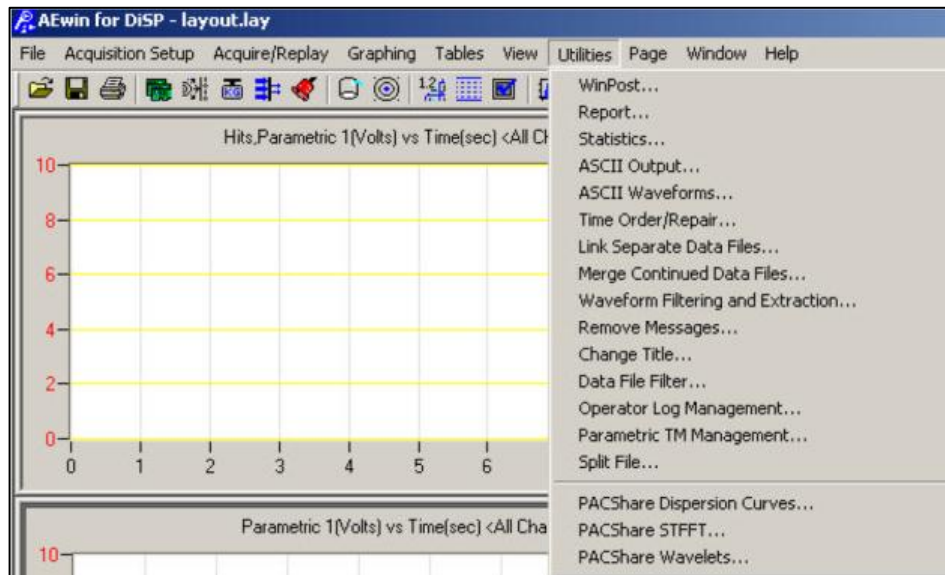


Fuente: Manual del programa AE Win Lite, modificado por los autores.

4.3.5. Menú de utilidades

Esta menú que despliega su contenido como se muestra en la siguiente figura, reúne un conjunto de subprogramas que se implementan en el análisis póstumo a la realización del AET.

Figura 91. Menú de utilidades de AE win



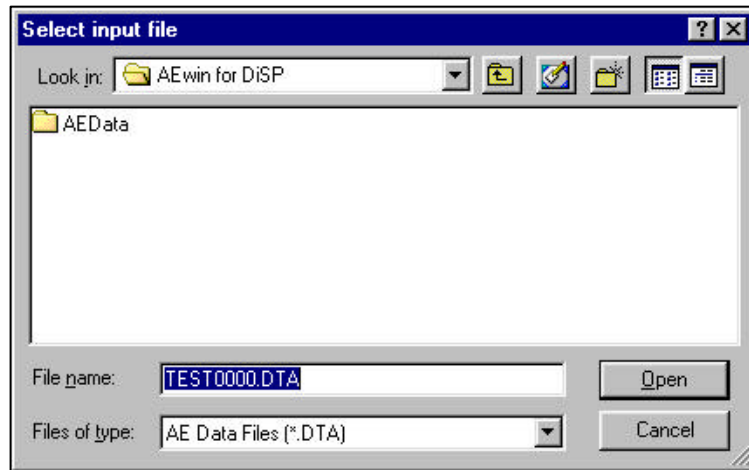
Fuente: Manual del programa AE win.

A continuación se describen las herramientas que brindaron mayor ayuda en el análisis de los datos obtenidos, tras la inspección de los recipientes.

4.3.5.1. *Statistics*

Esta herramienta entrega valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, de los parámetros AE asociados a los hits detectados. Cuando el usuario selecciona la opción en el menú de utilidades, el programa exige la entrada de un archivo de datos; la ventana asociada se muestra en la siguiente figura.

Figura 92. Ventana de selección del archivo de entrada para las estadísticas



Fuente: Manual del programa AE win.

Cuando el usuario selecciona el botón “open”, aparece la ventana mostrada en la siguiente figura, la cual resume los valores estadísticos de los parámetros AE que se midieron y que fueron configurados en *hardware set up*.

Figura 93. Ventana de resultados de la herramienta *statistics*

HIT DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev
Risetime	1	1.0000	2225.0000	247.1744	440.9676
Counts	1	1.0000	3471.0000	218.7442	588.2981
Energy	1	0.0000	3202.0000	83.8256	363.7154
Duration	1	1.0000	47423.0000	3905.9187	8679.1174
Amplitude	1	40.0000	78.0000	44.7558	7.7203
As1	1	11.0000	51.0000	31.1744	8.8989
Parametric1	1	-0.0427	0.0134	-0.0142	0.0073
Parametric2	1	-0.0134	-0.0055	-0.0100	0.0013
Risetime	2	1.0000	439.0000	142.8182	166.2226
Counts	2	1.0000	1278.0000	137.2727	362.4646
Energy	2	0.0000	4139.0000	447.0909	1172.5845
Duration	2	1.0000	21840.0000	3129.4546	6105.1411
Amplitude	2	60.0000	90.0000	65.0909	8.2292
As1	2	31.0000	55.0000	46.4545	9.7921
Parametric1	2	-0.0327	0.0143	-0.0132	0.0105
Parametric2	2	-0.0110	-0.0079	-0.0099	0.0008
Risetime	3	648.0000	648.0000	648.0000	0.0000
Counts	3	968.0000	968.0000	968.0000	0.0000
Energy	3	3373.0000	3373.0000	3373.0000	0.0000

Fuente: Manual del programa AE win.

4.3.5.2. *Link Separate Data Files*

Esta es una herramienta que le permite al usuario combinar diferentes archivos de múltiples ensayos, y sintetizar un solo archivo de datos. Como se mostrará en la sección de realización del ensayo, esta herramienta es muy importante ya que permite unir los resultados de los AET de cada escenario, facilitando el análisis global de resultados. Al seleccionar esta utilidad aparece una ventana como se muestra en la siguiente figura, que exige en términos generales los archivos de datos a unir, y permite con sus botones “Up” y “Down”, ordenar los archivos en mención.

Figura 94. Ventana de selección y ordenamiento de los archivos a unir



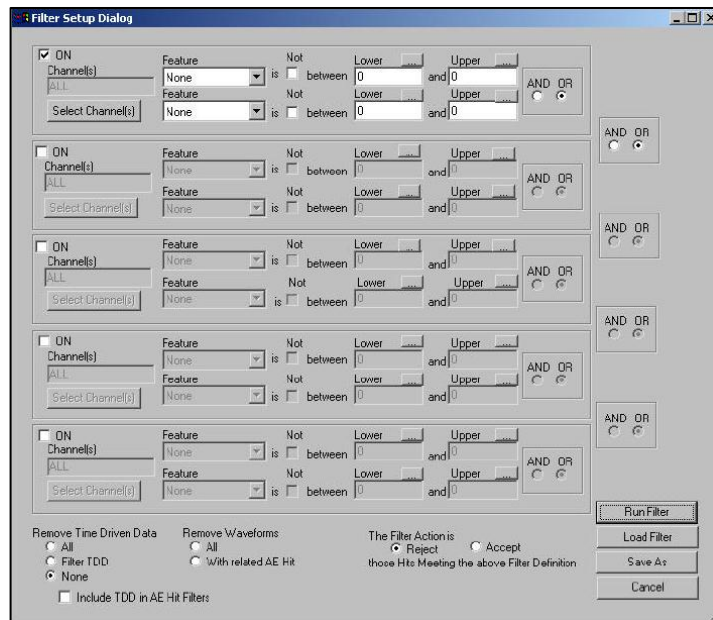
Fuente: Manual del programa AE win.

Al oprimir el botón “Ok” en la ventana de selección de archivos mostrada anteriormente, aparece otra ventana característica de AE que exige un nombre al nuevo archivo creado, así como la ubicación de tal archivo, recordar que lo guarda con extensión “.DTA”. Ahora bien, este nuevo archivo que contiene otros individuales puede reproducirse con la herramienta “Replay” explicada anteriormente.

4.3.5.3. Data File Filter

Es la utilidad con mayor importancia en este proyecto, ya que con ella es posible eliminar el ruido de fondo, y poder realizar un correcto análisis de resultados. En primera instancia se le solicita al usuario entrar el archivo de datos a filtrar, cuando dicho archivo es escogido, se observa el cuadro de dialogo que se muestra

Figura 95. Cuadro de dialogo de configuración de filtros.



Fuente: Manual del programa AE win.

El menú de definición del filtro consiste en 5 grupos, cada uno de ellos unidos por una condición lógica (*AND/OR*), de tal manera que cada grupo opera un par de condiciones, relacionadas también por una condición lógica, y un conjunto de canales a los cuales esta condición aplicará.

Para ajustar una condición, el usuario selecciona una característica en el menú desplegable que se muestra en la siguiente figura, luego se especifica un rango digitando un valor mínimo y máximo, y también es posible seleccionar el cuadro “*NOT*”, si se quieren retener los valores por fuera del rango establecido.

Figura 96. Grupo de filtrado.

The screenshot shows a filter configuration window. At the top left, there is a checked checkbox labeled 'ON'. Below it, a 'Channel(s)' field contains the text 'ALL' and a 'Select Channel(s)' button. The main area contains two identical filter rules. Each rule consists of a 'Feature' dropdown menu set to 'None', followed by the text 'is', a 'Not' checkbox (unchecked), and the text 'between'. To the right of 'between' are two input fields for 'Lower' and 'Upper' values, both containing the number '0'. The word 'and' is placed between the two input fields. To the right of the second rule, there are two radio buttons labeled 'AND' and 'OR', with the 'OR' button selected.

Fuente: Manual del programa AE win.

Adicionalmente en la parte inferior de la ventana de filtrado, el usuario tiene la opción de aplicar el filtrado a las formas de onda (*waveforms*), así como la opción de rechazar o elegir los datos que se extraen tras el filtrado, finalmente al ejecutar el filtro se guarda u archivo de datos que puede reproducirse con la herramienta replay.

Figura 97. Opciones adicionales en la interfaz de definición del filtro.

The screenshot shows a panel of additional filter options. It is divided into three sections. The first section is 'Remove Time Driven Data' with three radio buttons: 'All' (unchecked), 'Filter TDD' (unchecked), and 'None' (checked). Below this is a checkbox labeled 'Include TDD in AE Hit Filters' which is unchecked. The second section is 'Remove Waveforms' with two radio buttons: 'All' (unchecked) and 'With related AE Hit' (checked). The third section is 'The Filter Action is' with two radio buttons: 'Reject' (checked) and 'Accept' (unchecked). Below this section is the text 'those Hits Meeting the above Filter Definition'.

Fuente: Manual del programa AE win.

5. ENSAYO

En primera instancia se van a tratar como metodología para el ensayo, el procedimiento, los escenarios de falla y las configuraciones básicas del software para seguidamente desarrollar dicho procedimiento para cada uno de los recipientes.

5.1. METODOLOGÍA PARA EL ENSAYO

A continuación se muestra una descripción general del procedimiento usado en la detección de actividad acústica durante el monitoreo de recipientes a presión con una determinada falla y correspondiente severidad:

5.1.1. Procedimiento

Se extrajo de las normas y de ensayos realizados con anterioridad, un procedimiento que tiene como propósito garantizar la veracidad de la prueba y el correcto funcionamiento del sistema, obteniendo de esta manera datos confiables para un análisis certero de lo que sucede con el material. El siguiente diagrama muestra los pasos seguidos durante el ensayo para la detección de la actividad microsismica:

Figura 98. Procedimiento general del AET en este proyecto.







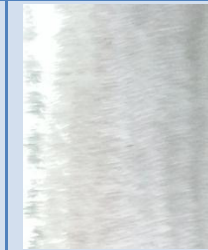
Cada uno de los componentes del anterior diagrama, montaje del sistema, verificación de desempeño, determinación del ruido de fondo y demás, serán detallados posteriormente en la sección donde se desarrolla el procedimiento, se muestran los datos obtenidos en la prueba y se realizan algunas observaciones para finalmente hacer el correspondiente análisis para cada uno de los escenarios de falla que se muestran más adelante.

5.1.2. Escenarios de ensayo

Los escenarios de falla para el ensayo son configuraciones del sistema de detección AE y el recipiente con una determinada severidad, se busca identificar el comportamiento del material al ir incrementando el rigor del defecto para dos cilindros de GLP.

Para el primer recipiente se plantean cinco escenarios de falla, en los primeros dos escenarios no se realiza ningún tipo de daño, se quiere conocer la actividad producida por el recipiente en su estado original y comprobar el efecto *Kaiser*. En el escenario 3 se realizan puntos con una profundidad aproximada de 0.5 [mm]. Más adelante, en el escenario con un nivel de severidad medio, se disminuye el espesor de pared borrando los puntos realizados en el nivel de severidad leve, nuevamente se realizan puntos, esta vez mas cantidad con una profundidad aproximada de 0.5 [mm]. Finalmente para el nivel de severidad alto se disminuye el espesor de pared hasta borrar los puntos. Con la disminución en el espesor de la pared (tabla 17) se produce una falla durante la presurización (figura 99).

Tabla 17. Escenarios de ensayo recipiente 1

		Recipiente 1				
		nula	Nula*	Leve	Media	Alta
severidad						

Fuente. Autores.

Figura 99. Falla recipiente 1



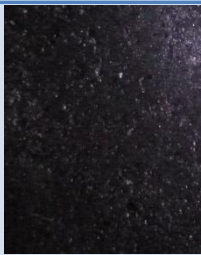


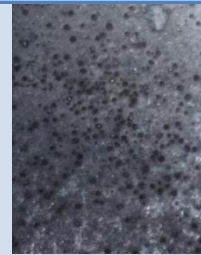
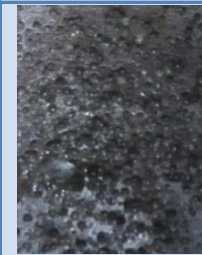
Fuente. Autores.

Las pruebas realizadas al recipiente 2 incluyen daños realizados en su interior dejando caer una barra con una masa de aproximadamente 0.5 [Kg] que sostiene un punzón en uno de sus extremos.

Con el escenario 6 y 7 se busca como en los escenarios 1 y 2, conocer el comportamiento inicial del recipiente y comprobar el efecto *Kaiser*. Para el escenario 8 se realizan 200 puntos dejando caer la barra a través del orificio de conexión de válvula desde una altura de aproximadamente 20 [cm], con esto se logra un daño con aproximadamente 0.5 [mm] de profundidad. En el escenario 9, para aumentar la severidad de la falla se realizan daños, 1000 puntos con una profundidad aproximada de 1 [mm], dejando caer la barra esta vez desde una

altura de aproximadamente 40 [cm]. Finalmente para aumentar la severidad de la falla hasta niveles altos, se deja caer la barra sobre la base del cilindro desde una altura de aproximadamente 60 [cm] 2300 veces con lo que se logra la fuga durante la presurización del mismo.

Tabla 18. Escenarios de ensayo recipiente 2

		Recipiente 2				
		nula	Nula*	Leve	Media	Alta
severidad						

Fuente. Autores.

Figura 100. Falla recipiente



Fuente. Autores.

5.1.3. Configuración del software²⁶

Una correcta puesta a punto del sistema mediante una acertada selección de parámetros es fundamental para la adquisición de la señal. El software se configuro como se muestra:

✓ AE Channel setup

Figura 101. Configuraciones de canal de AE

Threshold		Analog Filter		Waveform Setup		
Type	dB	Lower	Upper	Sample Rate	Pre-Trigger	Length
FIXED	40	20kHz	1MHz	10MSPS	50.0000	7k

Fuente. Autores.

✓ AE Timing parameters

Figura 102. Configuraciones de tiempos de definición de la señal

PDT	HDT	HLT
microseconds	microseconds	microseconds
300	600	1000

Fuente. Autores.

✓ Data set / parametrics

Figura 103. Configuración y activación de Parámetros a adquirir

Hit Data Set: <input checked="" type="checkbox"/> Amplitude <input checked="" type="checkbox"/> Energy <input checked="" type="checkbox"/> Counts <input checked="" type="checkbox"/> Duration <input checked="" type="checkbox"/> RMS <input checked="" type="checkbox"/> ASL <input checked="" type="checkbox"/> Threshold <input checked="" type="checkbox"/> Rise Time		<input checked="" type="checkbox"/> Counts to Peak <input checked="" type="checkbox"/> Average Frequency <input checked="" type="checkbox"/> Reverberation Frequency <input checked="" type="checkbox"/> Initiation Frequency <input checked="" type="checkbox"/> Signal Strength <input checked="" type="checkbox"/> Absolute Energy		Time Driven Parametrics: <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4	
		Time Driven Channel Data: <input type="checkbox"/> RMS <input type="checkbox"/> ASL <input type="checkbox"/> Threshold <input type="checkbox"/> Absolute Energy			

Fuente. Autores.

²⁶ La descripción del funcionamiento y configuración de muchos de los parámetros del software es más amplia en el apartado 4.3.

✓ **Parametrics**

Figura 104. Configuración de entradas paramétricas

Channel	Software Scaling			Hardware	
	Multiplier	Offset	Units	Gain	Filter
1	243.7500	-219.4300	PSI	x1	<input type="checkbox"/>

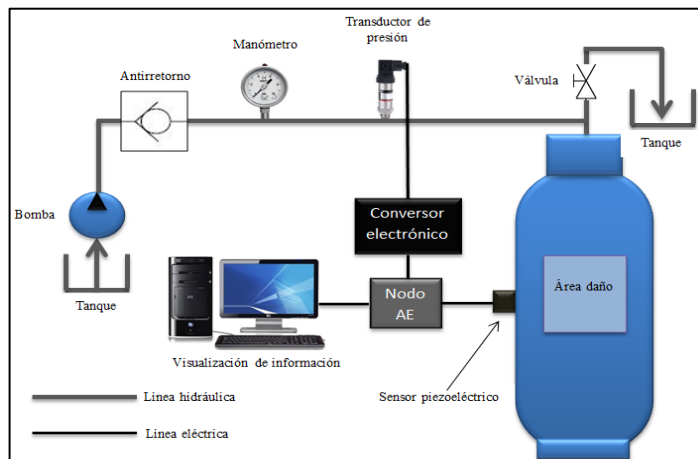
Fuente. Autores.

5.2. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA - RECIPIENTE FALLAS EXTERNAS

5.2.1. Montaje del sistema recipiente 1

El primer pasó del procedimiento para la obtención de los datos es realizar el montaje del sistema mecánico con el que se controlara de forma segura la presurización del recipiente y el sistema electrónico con el que se hará la adquisición de los datos. En el primer cilindro se realizaran daños superficiales incrementando su rigor a medida que se va cambiando de escenario, es decir, solo cambiara el daño sobre el recipiente y el nivel de presión usado como se indica en el apartado 5.2.5.

Figura 105. Montaje del sistema, recipiente con fallas externas



Fuente: Autores.

5.2.2. Verificación de la respuesta acústica del sensor y desempeño del sistema recipiente 1

Como lo exponen las guías normativas que se trataron en el capítulo 3, se realiza como parte del procedimiento, la verificación del desempeño del sistema para cada uno de los escenarios antes de la obtención de datos, esta comprobación valida el correcto funcionamiento de los equipos, y garantiza la obtención de datos de calidad. La tabla a continuación muestra valores de parámetros típicos de una AE producto del rompimiento de la mina de un lápiz como se indica en la sección 3.2.3 de este libro, este paso del procedimiento se realizó para cada uno de los escenarios encontrando similitud en los valores producidos por el evento en cada uno de los casos, sin embargo solo se muestra los datos obtenidos para un escenario.

Tabla 19. Verificación de desempeño del recipiente 1

Parámetro.	Rompimiento					
	1	2	3	4	5	promedio
Energía	3195	3513	2244	2624	2990	2909.2
Amplitud	86	85	86	90	87	86.8
Duración	35633	35678	33093	30825	32051	33456
Counts	1138	935	961	894	903	966.2

Fuente: Autores.

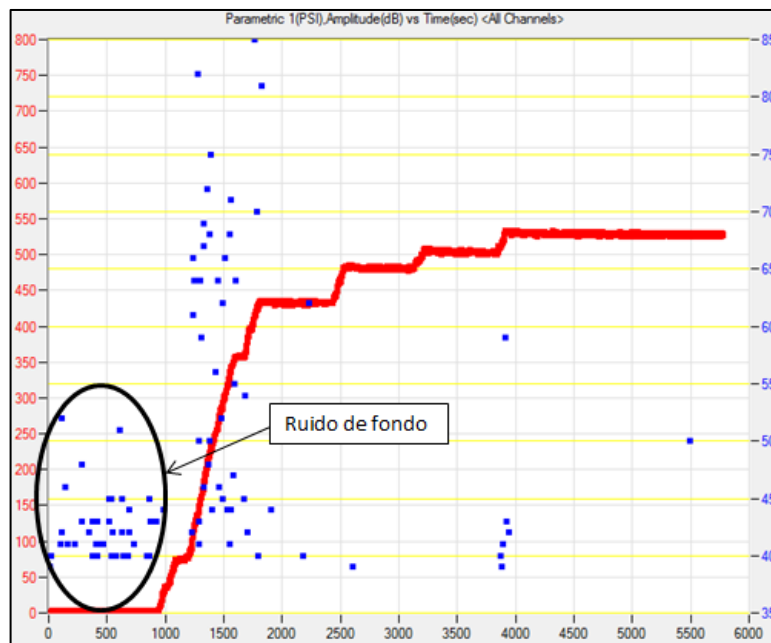
5.2.3. Determinación del ruido de fondo recipiente 1

La determinación del ruido de fondo es una actividad de gran importancia para la correcta interpretación y análisis de datos obtenidos durante la realización del ensayo. Una de las técnicas para eliminar cualquier tipo de ruido es filtrar el nivel de amplitud estableciendo un umbral sobre el cual los estallidos producidos serán

guardados por el sistema, durante todos los escenarios planteados este umbral se configuro, basados en las características del ruido de fondo, configuraciones halladas en artículos científicos y recomendaciones de expertos en el tema, en 40 [dB].

Posterior a la realización del ensayo se analizó cada uno de los escenarios caracterizando el ruido de fondo y filtrándolo para obtener datos claros del procedimiento. A continuación se ilustran algunas imágenes que ejemplifican el tratamiento que se realizó sobre los datos.

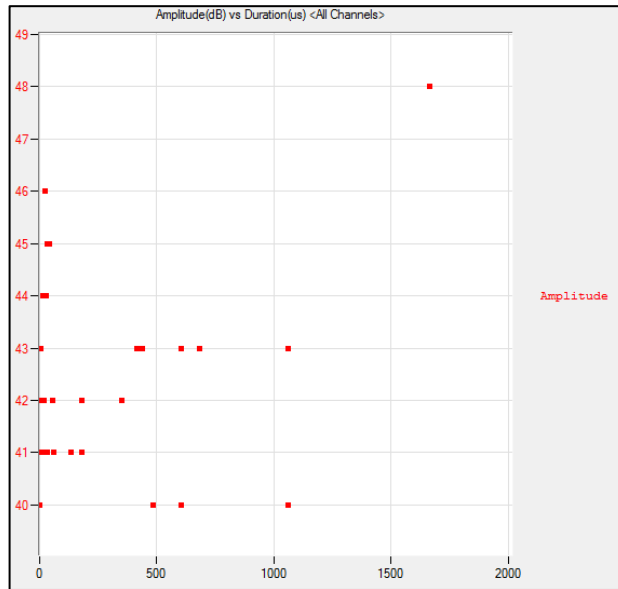
Figura 106. Tiempo de detección de ruido de fondo



Fuente: Autores.

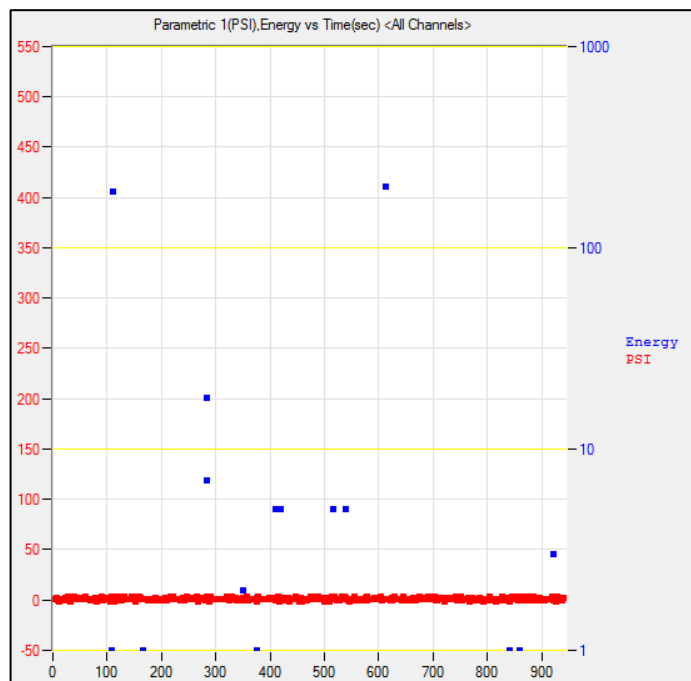
El filtrado de la información se realiza rechazando la mayoría del ruido de fondo, encontrando características que lo identifiquen (figura 107-108), tales como amplitud, duración y energía asociada a cada hit.

Figura 107. Duración y amplitud característica del ruido de fondo



Fuente: Autores.

Figura 108. Energía característica del ruido de fondo



Fuente: Autores.

Al revisar estadísticas sobre algunas de las características medidas en el AET se puede destacar la baja amplitud: 42 [dB] y energía promedio del ruido: 11[Und]²⁷ detectadas por el sistema, otros valores típicos detectados se muestran en la siguiente tabla.

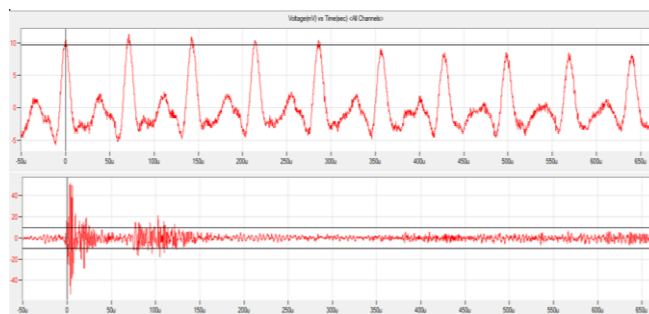
Tabla 20. Estadísticas ruido de fondo

HIT DRIVEN DATA:				
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average
Risetime	1	1.0000	1586.0000	186.5000
CountsPeak	1	1.0000	140.0000	9.1750
Counts	1	1.0000	294.0000	17.5250
Energy	1	0.0000	201.0000	11.1500
Duration	1	1.0000	17213.0000	995.2000
Amplitude	1	39.0000	52.0000	42.5500

Fuente: Autores.

Se encontró que gran parte del ruido de fondo posee una forma de onda con patrones que se repiten constantemente, posee baja amplitud, baja energía y duración, a diferencia de pulsos simples característicos de una AE como lo indica Wood²⁸. En la siguiente figura se logra visualizar la diferencia entre la forma de onda característica del ruido y la de una emisión acústica, esta es otra forma de detectar y descartar el ruido para limpiar la información.

Figura 109. Forma de onda ruido de fondo y AE



Fuente: Autores.

²⁷ [Und]: Representa las unidades de energías trabajadas en AE win que fueron: $\mu\text{Volt-sec/count}$.

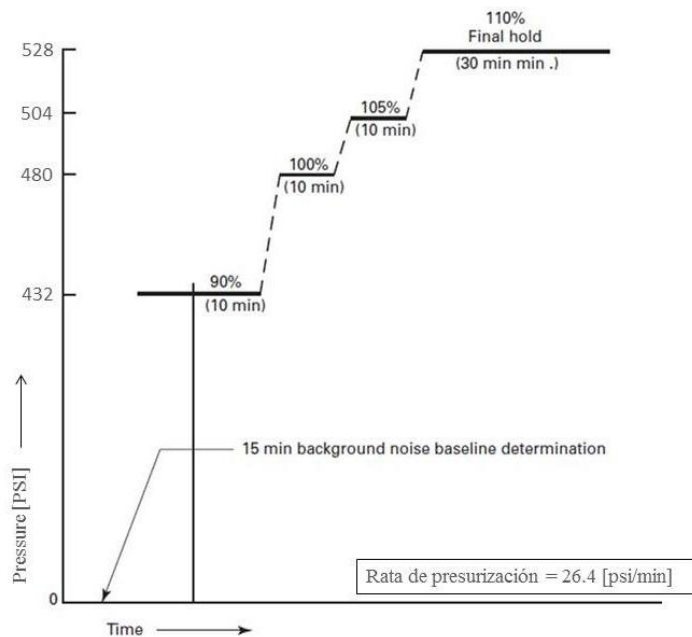
²⁸ WOOD, BRA y HARRIS RW. *Structural Integrity and remnant life evaluation of pressure equipment from acoustic emission monitoring*. *En: international journal of pressure vessels*, 2000 no 77. p. 125-132.

Es importante resaltar la posibilidad de que algunos de los hits detectados con características similares a las del ruido hayan sido descartados y algo del ruido haya sido considerado un estallido. Con el filtrado se busca disminuir tanto como sea posible el ruido de fondo para realizar un análisis certero de la información relevante.

5.2.4. Secuencias de presurización recipiente 1

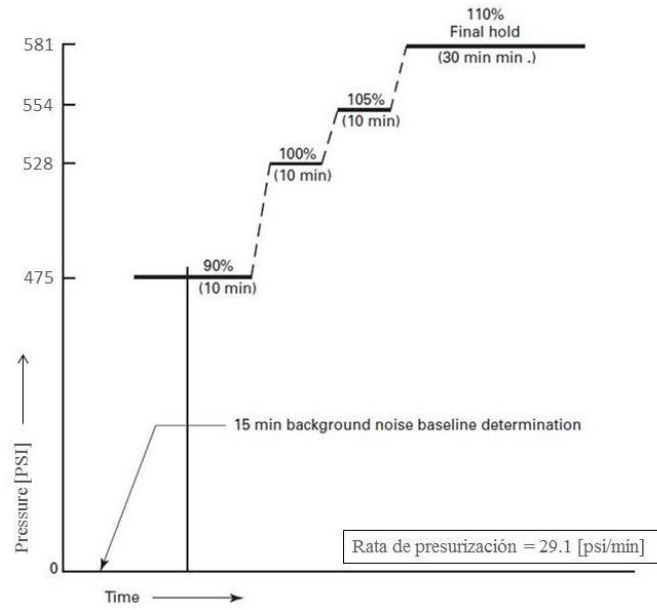
La presurización del recipiente es un factor importante debido a que puede generar ruido indeseado, aumentar o disminuir una tasa de producción de hits o hacer peligroso una inspección, por tal razón, se establecen basados en la norma ASME sección V artículo 12, los niveles y las tasas de presurización a las cuales fueron sometidos los recipientes.

Figura 110. Secuencia de presurización escenario 1



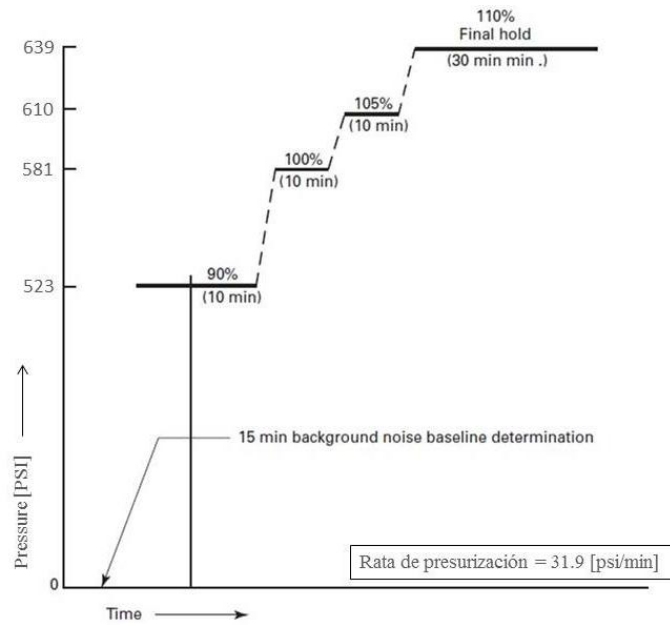
Fuente. ASME modificado por Autores.

Figura 111. Secuencia de presurización escenario 2



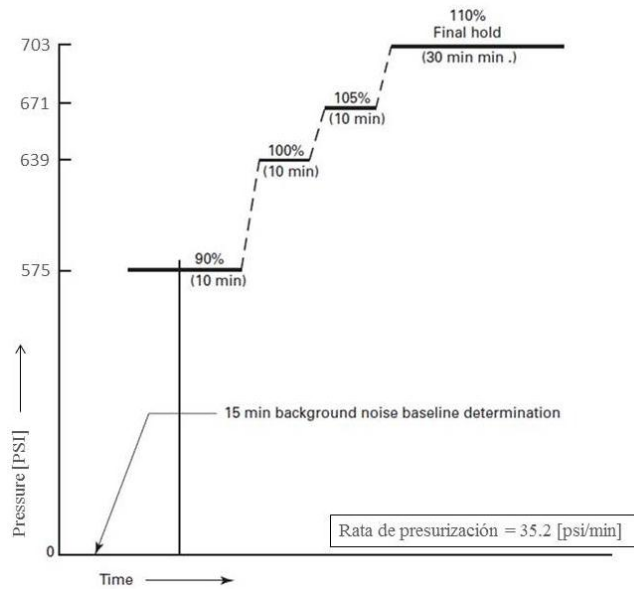
Fuente. ASME modificado por Autores.

Figura 112. Secuencia de presurización escenario 3



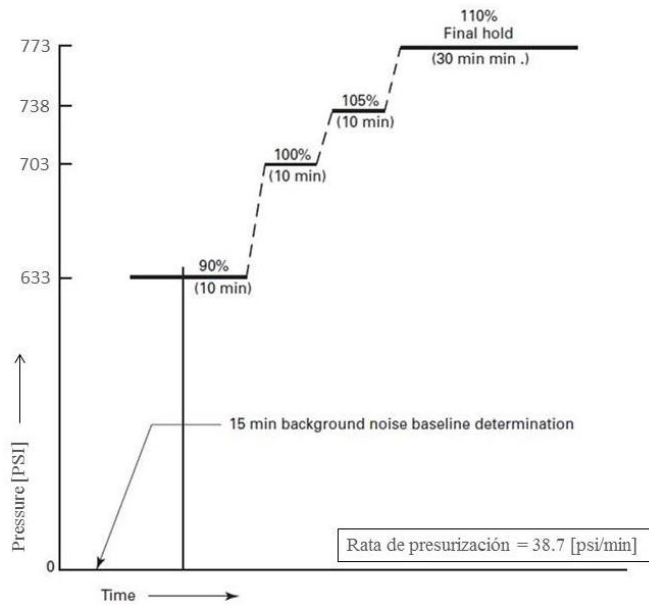
Fuente. ASME modificado por Autores.

Figura 113. Secuencia de presurización escenario 4



Fuente. ASME modificado por Autores.

Figura 114. Secuencia de presurización escenario 5



Fuente. ASME modificado por Autores.

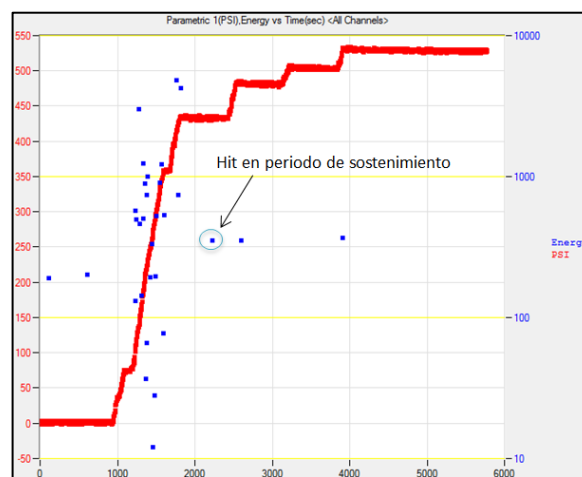
5.2.5. Reporte y análisis de resultados recipiente 1

5.2.5.1. Resultados escenario 1

Se realizó el primer ensayo al tanque sin imponer falla alguna, únicamente se monitoreo la actividad acústica llevándolo a un nivel máximo de presión de 530 [PSI] que corresponde a un 10% por encima del nivel de presión al cual fue sometido el recipiente durante su prueba hidrostática.

Los datos obtenidos durante el AET se analizan gráficamente. En la figura 115 se asocian las variables: tiempo (eje X), presión (curva roja) y la energía (puntos azules), de tal manera que cada punto azul corresponde a un hit el cual en un tiempo determinado del ensayo tiene un valor de energía específico (eje Y). Esta gráfica es útil para observar la actividad durante el ensayo, se extrae de ella que la mayor cantidad de hits detectados se produjeron en la primera etapa de presurización. Así mismo, se observa que en periodos de sostenimiento hay muy poca actividad (1 solo hit detectado).

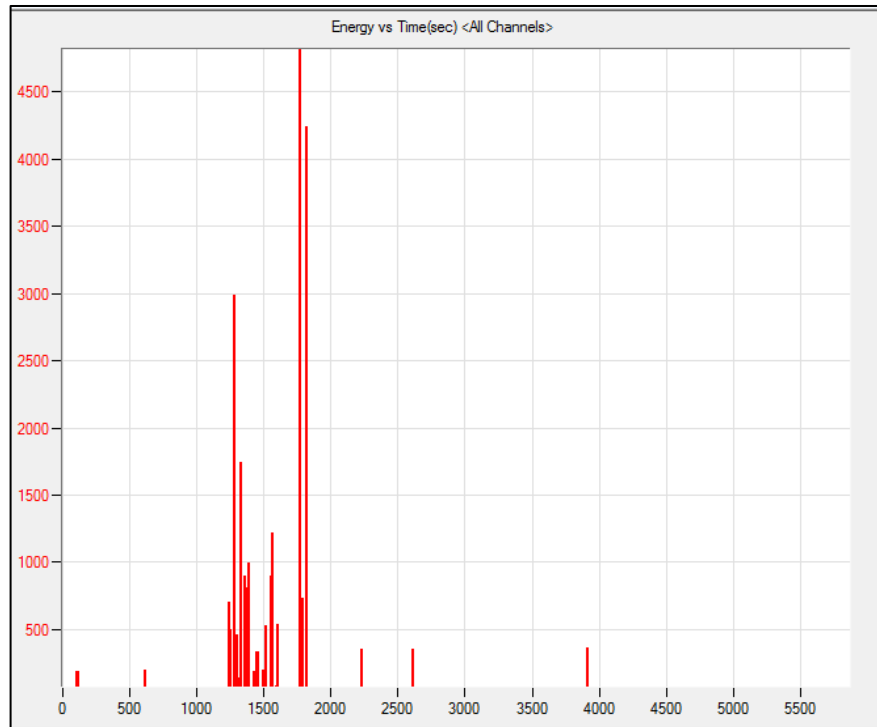
Figura 115. Presión-Energía Vs Tiempo, escenario 1



Fuente: Autores

Tanto en la figura anterior como en la siguiente figura, se observa que la energía de los hits que se van detectando, desciende en la medida que se aumenta la presión, lo que es indicativo de la buena integridad estructural del tanque como lo indica Juárez y Ortega en su trabajo²⁹.

Figura 116. Energía Vs Tiempo, escenario 1

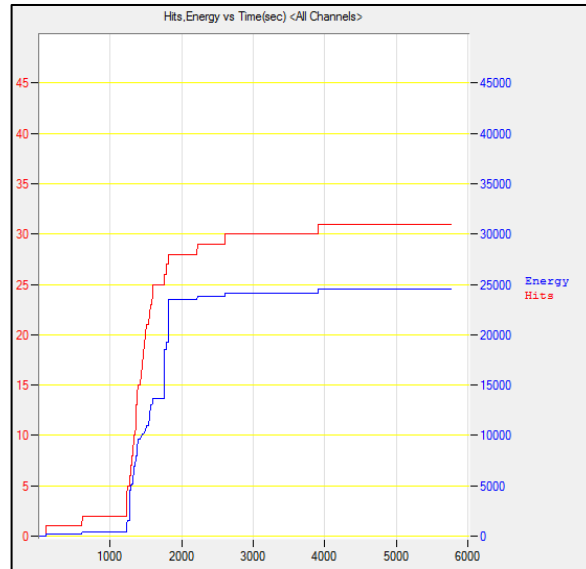


Fuente: Autores.

Igualmente se obtiene la gráfica de actividad acumulada que posee las curvas de energía (azul) y hits acumulados (roja) en el tiempo, ambas curvas reflejan un crecimiento con concavidad negativa que se asocia al buen estado del recipiente²⁹.

²⁹ JUÁREZ, Ricardo E. y ORTEGA, Carlos M. *Análisis del informe de resultados de ensayo de Emisión Acústica en base a lo establecido en el código ASME Boilers and Pressure Vessels Code (BPVC) Sección V Artículo 12 2007. En: Congreso Regional de Ende (7: 11-13, Noviembre, 2009: Rosario, Argentina). Memorias. Rosario: AANDE, 2009. 9 p.*

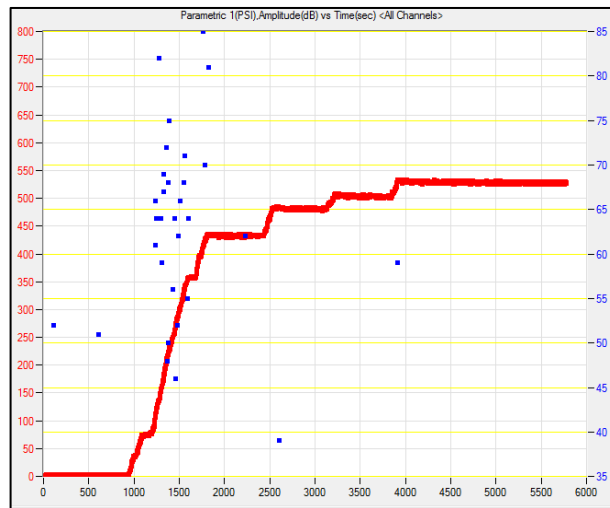
Figura 117. Energía y hits acumulados Vs Tiempo, escenario 1



Fuente: Autores

La siguiente figura que corresponde a una gráfica de calidad que muestra que los hits de mayor amplitud se produjeron en la etapa de presurización inicial, además permite visualizar el rango de amplitud de los hits detectados el cual estuvo entre 40dB y 85dB.

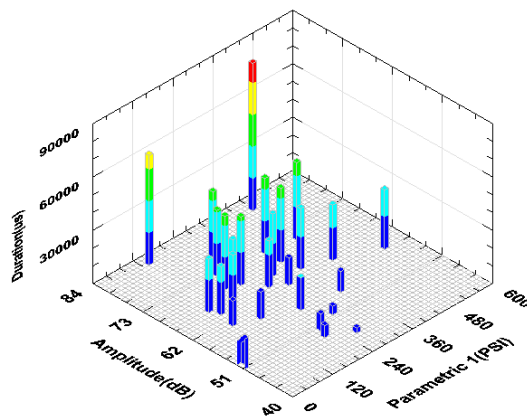
Figura 118. Presión y amplitud Vs Tiempo, escenario 1



Fuente: Autores.

Otra gráfica importante se observa en el siguiente histograma 3-D, en la cual se puede visualizar de manera general, que en la medida que se iba incrementado los niveles de presión en el tanque, aparecían hits de mayor amplitud y se les asocia mayor duración, en efecto, se observa que en un valor de presión aproximado de 480 psi, se registra un grupo de hits con amplitud de 82 dB, y la máxima duración encontrada de 88900 μ s.

Figura 119. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 1



Fuente: Autores

Finalmente se obtiene la tabla de estadísticas generales de este ensayo, con la cual se cuantifican los parámetros de AE medidos. Se ordenan por valores máximos, mínimos, promedios y su respectiva desviación estándar.

Tabla 21. Estadísticas del AET en el escenario 1.

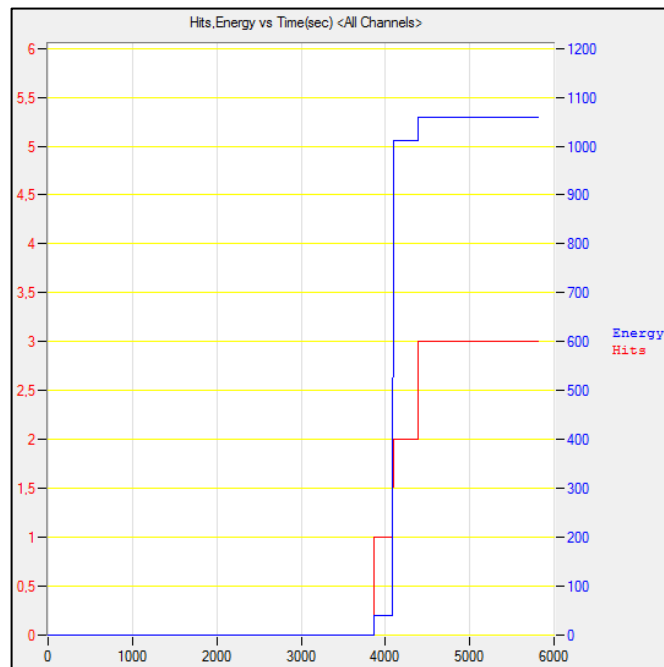
HIT DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std. D.
Risetime	1	7.0000	1424.0000	279.4839	355.80
CountsPeak	1	1.0000	140.0000	27.7419	34.20
Counts	1	1.0000	9703.0000	2417.9678	2248.75
Energy	1	12.0000	4811.0000	791.3549	1131.16
Duration	1	2996.0000	88891.0000	31044.7090	19726.71
Amplitude	1	39.0000	85.0000	62.8387	10.51
Asl	1	16.0000	52.0000	32.4839	9.65
Threshold	1	40.0000	40.0000	40.0000	0.00
AvgFreq	1	0.0000	127.0000	64.8387	34.74
Rms	1	0.0004	0.0294	0.0055	0.00
RevFreq	1	1.0000	127.0000	65.0000	35.76
InitFreq	1	3.0000	428.0000	138.5806	85.12
SigStrength	1	77299.1953	30056164.0000	4946174.5000	7066356.10
AbsEnergy	1	370.5813	4336942.5000	410528.0938	1017570.18
Parametric1	1	0.7611	530.4098	258.5425	130.09
TIME DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std. D.
Parametric1	1	-1.6194	533.9805	375.6523	202.22

Fuente: Autores

5.2.5.2. Resultados escenario 2

Este escenario es análogo al anterior en el sentido de que no se han impuesto fallas manuales, solo se ha incrementado el valor máximo de la presión en un 10 %. En primera medida se comprueba que la integridad del tanque se conserva dada la concavidad de la curva de actividad acumulada (figura120).

Figura 120. Energía y hits acumulados Vs Tiempo, escenario 2

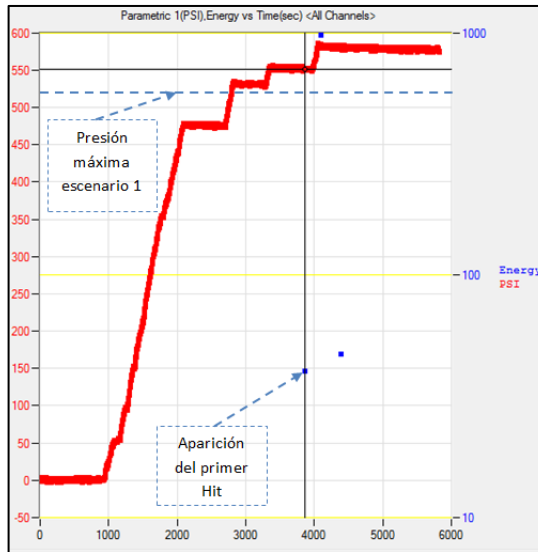


Fuente: Autores

En segundo lugar se presenta el efecto *Kaiser*, el cual como lo referencia la sección de AE del NDT Handbook, corresponde a la ausencia de actividad AE hasta que se supera el nivel de presión máxima del ensayo anterior, este fenómeno se identifica en la figura 121, donde la aparición del primer hit ocurre en un nivel de presión de 553 psi, la cual corresponde al máximo alcanzado en el escenario 1.

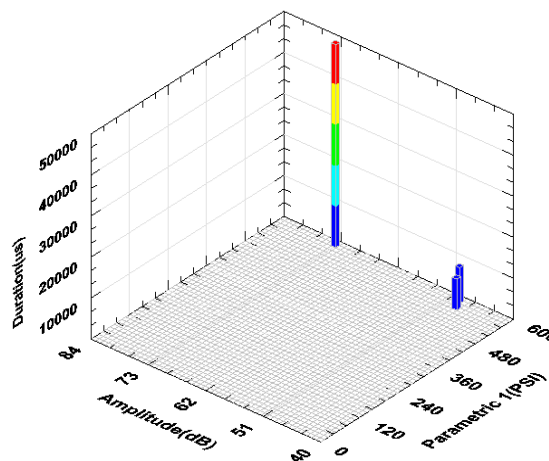
La figura 122 permite cuantificar en términos de amplitud, energía y presión, los hits detectados tras el AET. También se evidencia que los únicos hits detectados se presentan en niveles de presión elevados, que superan el nivel de presión máximo del escenario anterior.

Figura 121. Presion-Energia Vs Tiempo, escenario 2



Fuente: Autores.

Figura 122. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 2



Fuente: Autores.

A continuación se cuantifican los parámetros de AE medidos. Se organizan por valores máximos, mínimos, promedios y su respectiva desviación estándar.

Tabla 22. Estadísticas del AET en el escenario2

HIT DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std D
Risetime	1	7.0000	1424.0000	279.4839	355.80
CountsPeak	1	1.0000	140.0000	27.7419	34.20
Counts	1	1.0000	9703.0000	2417.9678	2248.75
Energy	1	12.0000	4811.0000	791.3549	1131.16
Duration	1	2996.0000	88891.0000	31044.7090	19726.71
Amplitude	1	39.0000	85.0000	62.8387	10.51
Asl	1	16.0000	52.0000	32.4839	9.65
Threshold	1	40.0000	40.0000	40.0000	0.00
AvgFreq	1	0.0000	127.0000	64.8387	34.74
Rms	1	0.0004	0.0294	0.0055	0.00
RevFreq	1	1.0000	127.0000	65.0000	35.76
InitFreq	1	3.0000	428.0000	138.5806	85.12
SigStrength	1	77299.1953	30056164.0000	4946174.5000	7066356.10
AbsEnergy	1	370.5813	4336942.5000	410528.0938	1017570.18
Parametric1	1	0.7611	530.4098	258.5425	130.09
TIME DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std D
Parametric1		-1.6194	533.9805	375.6523	202.22

Fuente: Autores

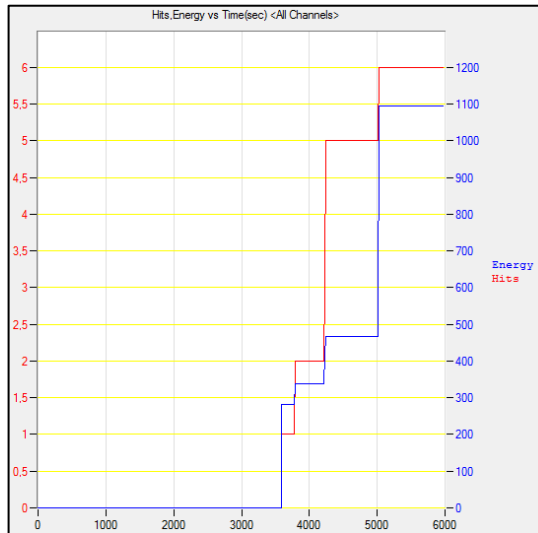
5.2.5.3. Resultados escenario 3

En este ensayo se inicia el deterioro del recipiente, y se imponen las fallas catalogadas como incipientes, caracterizadas por desmejorar en baja proporción (en comparación a los siguientes escenarios) la integridad estructural del material. En efecto, dado que no se ha afectado severamente dicha integridad, la curva de actividad acumulada (figura 123) muestra que el crecimiento de los hits y su energía es desacelerado, mostrando un amesetamiento en los últimos periodos de presurización, asociándose a buena integridad estructural.

Nuevamente se evidenció el efecto *Kaiser*, ya que ningún Hit fue detectado hasta que se superó el nivel de presión máximo del escenario 2, No obstante, se diferencia de los escenarios 1 y 2, ya que los hits detectados en este ensayo dieron lugar en etapas de sostenimiento de carga (etapa 3) y a presiones

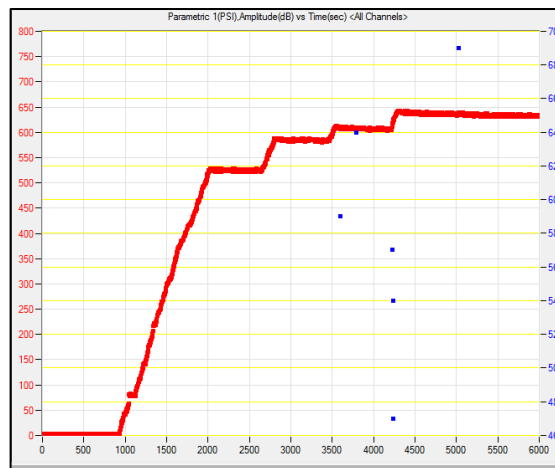
elevadas, señalando el inicio de fallas que pueden conducir a la destrucción del material.³⁰

Figura 123. Hits-energía acumulados vs tiempo, escenario 3



Fuente: Autores.

Figura 124. Presión-Amplitud Vs Tiempo, escenario 3.

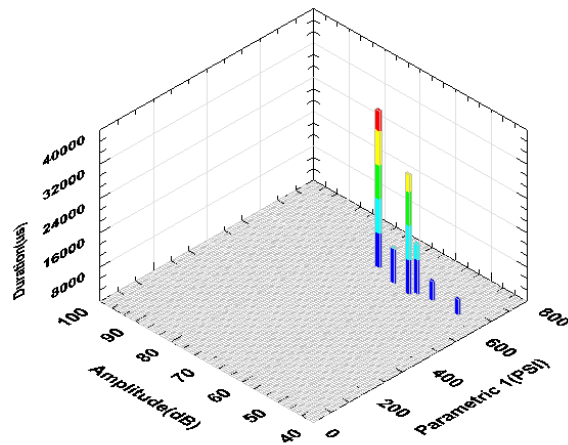


Fuente: Autores.

³⁰ VALLEN , Harmut.AE Testing fundamentals, Equipment, Applications. *En: NDT.net. Septiembre, 2002, vol.7, no.09.*

Adicionalmente se comprueba con la siguiente figura que los hits detectados tomaron lugar en presiones elevadas, además se logra cuantificar su duración y amplitud.

Figura 125. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 3



Fuente: Autores.

Para concluir con este escenario se cuantifican los parámetros obtenidos durante el censo, tabulando sus valores mínimos, máximos, promedios y su respectiva desviación estándar.

Tabla 23. Estadísticas del AET en el escenario 3

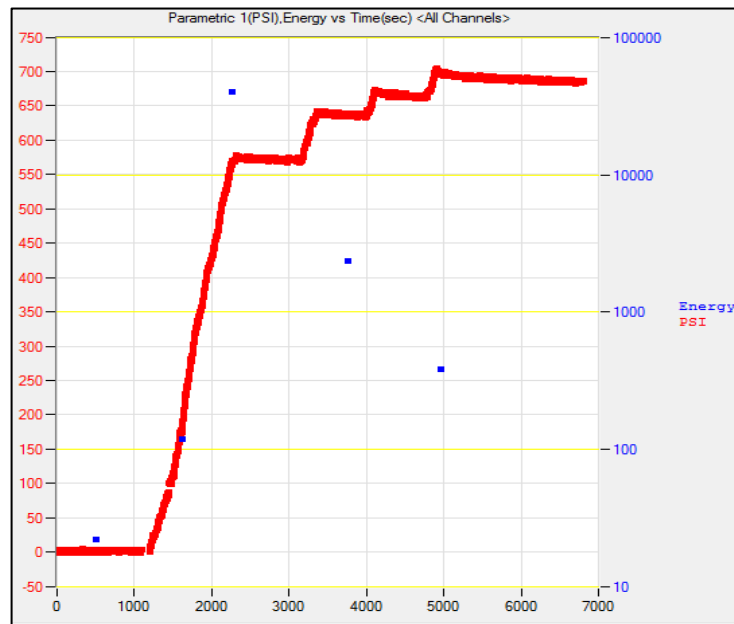
HIT DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std D
Risetime	1	6.0000	545.0000	132.0000	189.49
CountsPeak	1	3.0000	180.0000	39.8333	63.36
Counts	1	50.0000	5252.0000	1590.6666	1892.78
Energy	1	17.0000	630.0000	182.6667	218.67
Duration	1	3786.0000	36682.0000	15499.6670	12431.66
Amplitude	1	47.0000	69.0000	58.3333	7.01
Asl	1	17.0000	37.0000	24.5000	6.67
Threshold	1	40.0000	40.0000	40.0000	0.00
AvgFreq	1	13.0000	143.0000	69.5000	42.86
Rms	1	0.0004	0.0048	0.0016	0.00
RevFreq	1	13.0000	141.0000	69.1667	42.40
InitFreq	1	189.0000	500.0000	306.1667	96.14
SigStrength	1	110684.5000	3935329.5000	1143870.5000	1365234.59
AbsEnergy	1	579.4952	114648.4141	24352.5918	40962.77
Parametric1	1	606.5840	636.3395	619.6765	10.28
TIME DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std D
Parametric1	1	-1.6194	642.2906	447.9635	239.63

Fuente: Autores.

5.2.5.4. Resultados escenario 4

Este ensayo se caracteriza, en términos generales, por un pronunciamiento claro de la actividad acústica, debido al nivel de severidad medio que se le impone al cilindro. La siguiente gráfica, muestra la secuencia de presurización efectuada (curva roja) y le asigna a cada hit su energía medida (puntos azules) en una escala logarítmica, así que observando la gráfica es posible visualizar que en el intervalo de tiempo entre 2000 y 3000 [s], aparece el hit de mayor contribución que tiene energía de 39800 [Und], además en el ensayo para este hit en particular se escuchó un estallido característico tras la ruptura del material. Por otro lado, este escenario se diferencia de los escenarios 2 y 3, en cuanto a que el fenómeno del efecto *Kaiser* no se hace presente, por que como lo muestra la siguiente figura, la producción de hits inicia en un nivel de presión menor al máximo de su ensayo predecesor, lo que se conoce como efecto *Felicity*.

Figura 126. Presion-Energia Vs Tiempo, escenario 4.

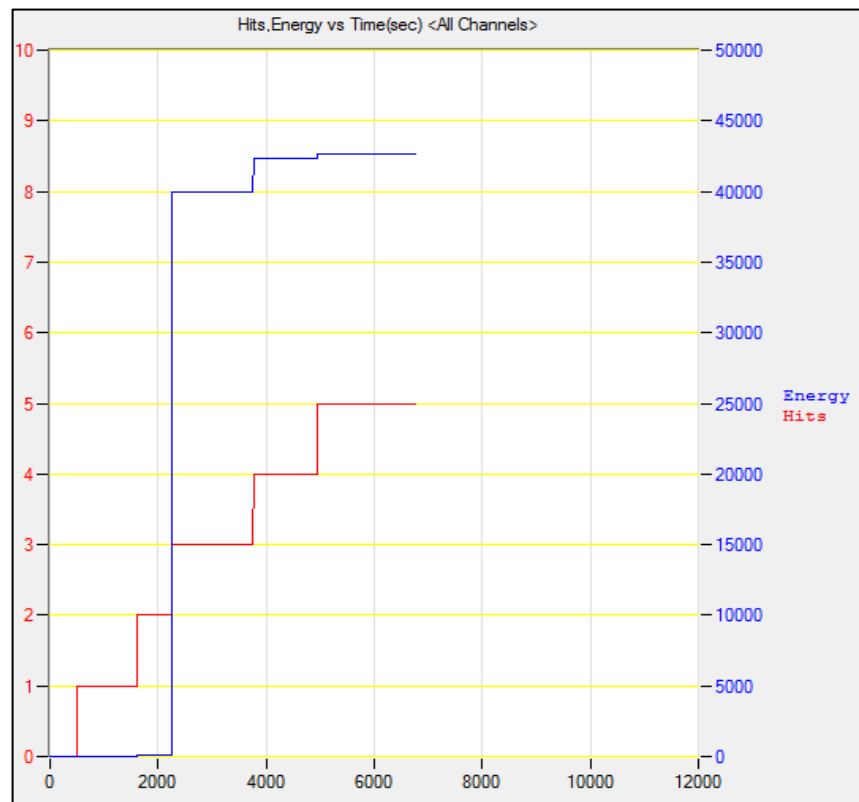


Fuente: Autores.

A pesar de los altos valores energéticos acumulados debido a la actividad en este ensayo, el amesetamiento en la finalización de la prueba para las cantidades de hits y energía acumulada, como se evidencia en la siguiente figura 127, se asocia a un material que no ha sufrido un cambio drástico en su estructura.

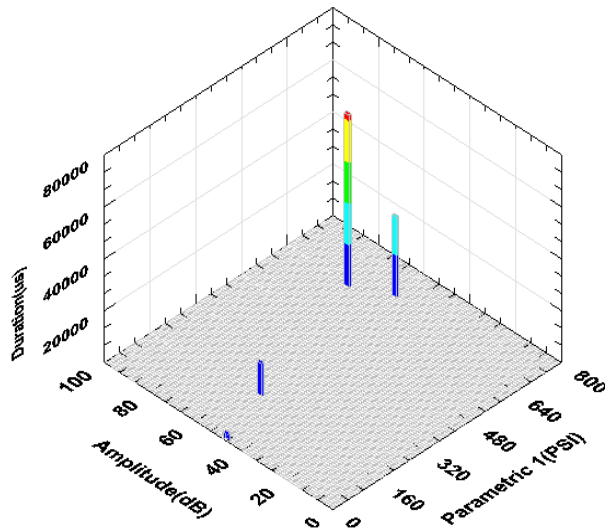
También con la siguiente figura 128 es posible cuantificar las características de amplitud y duración de los hits detectados, así como el nivel de carga en el cual estos aparecen, desprendiéndose como ocurrió en los anteriores escenarios, que a mayor presión se presentaban los hits de mayor amplitud, y mayor duración.

Figura 127. Energía y hits acumulados Vs Tiempo, escenario 4



Fuente: Autores.

Figura 128. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 4



Fuente: Autores.

Finalmente se obtiene la tabla de estadísticas generales de este ensayo, con la cual se cuantifican los parámetros de AE medidos.

Tabla 24. Estadísticas del AET del escenario 4

HIT DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev
Risetime	1	11.0000	780.0000	243.4000	290.9410
CountsPeak	1	2.0000	67.0000	24.4000	23.4145
Counts	1	48.0000	12723.0000	4109.6001	4574.8080
Energy	1	22.0000	39802.0000	8535.5996	15656.4772
Duration	1	2824.0000	162877.0000	55052.0000	58105.1429
Amplitude	1	47.0000	100.0000	66.6000	18.7467
Asl	1	20.0000	70.0000	38.0000	18.4608
Threshold	1	40.0000	40.0000	40.0000	0.0000
AvgFreq	1	16.0000	114.0000	59.8000	34.2368
Rms	1	0.0008	0.2340	0.0505	0.0919
RevFreq	1	16.0000	115.0000	60.4000	34.3895
InitFreq	1	21.0000	500.0000	245.4000	158.3800
SigStrength	1	139339.2500	248623504.0000	53319960.0000	97797139.8603
AbsEnergy	1	1128.8031	276261312.0000	55453640.0000	110404450.1470
Parametric1	1	-1.6194	695.8506	417.3387	274.8027
TIME DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev
Parametric1		-1.6194	704.1822	484.4371	265.4045

Fuente: Autores.

5.2.5.5. Resultados escenario 5

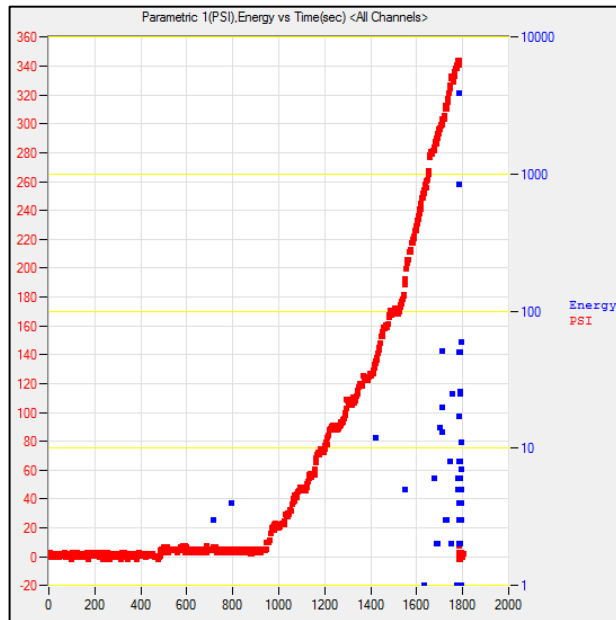
En este escenario se imponen al cilindro fallas catalogadas como severas, es decir en comparación con los escenarios anteriores, se desmejora considerablemente la integridad mecánica del recipiente, y en consecuencia se observan cambios drásticos en los parámetros de AE medidos en el ensayo.

En primer lugar según la figura 129, se observa actividad acústica desde niveles bajos de presión, es decir que el primer hit (punto azul) con energía aproximada de 10 [und] tiene lugar en 80 psi, además dicha actividad aumenta significativamente en la medida que se presuriza, lo que se asocia a la manifestación de los nuevos defectos impuestos en este escenario.³⁰

En segundo lugar, en este escenario se logró que el recipiente fallara, y lo más importante es que permitió con los datos obtenidos plantear una línea base para la predicción de la falla en este tipo de experimentos.

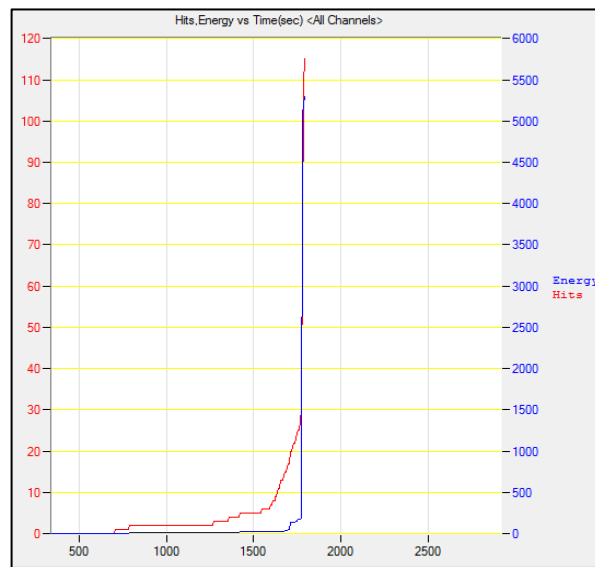
En la figura 130 se observa el crecimiento exponencial de las curvas acumulativas de hits (roja) y energía (azul), diferenciándose de todos los escenarios anteriores cuyas curvas sufrían amesetamiento en la parte final del ensayo, es así que, tras el crecimiento desmesurado de los parámetros mencionados en el tiempo 1500-2000 [s] ocurre la falla del recipiente justamente en la zona en la cual se impusieron las fallas severas, esta observación se complementa si se mira detalladamente en la figura anterior, donde no se alcanza ni siquiera el primer nivel de sostenimiento de presión establecido para este ensayo, 633 [psi], alcanzando como máximo 344 [psi], y luego cayendo de manera instantánea a 0 [psi], tras la ruptura de la pared del recipiente.

Figura 129. Presión-Energía Vs Tiempo, escenario 5



Fuente: Autores

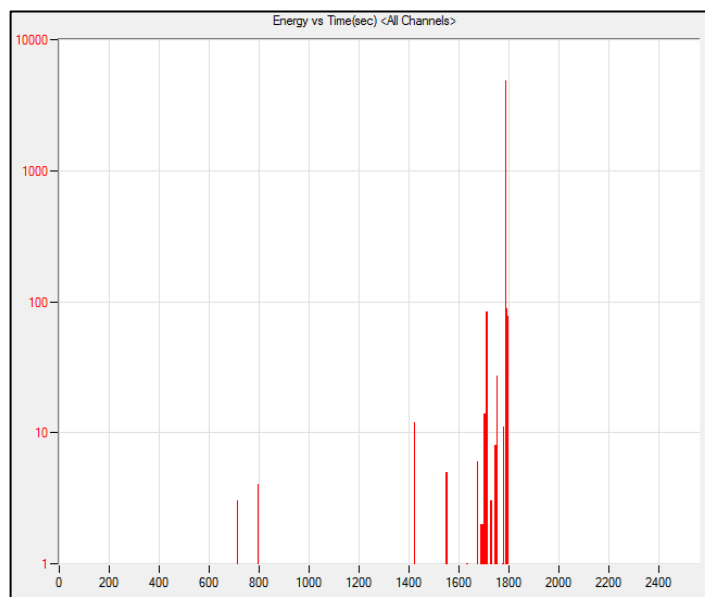
Figura 130. Energía y hits acumulados Vs tiempo, escenario 5



Fuente: Autores

Otra herramienta que sirve para predecir la aparición de la falla es la gráfica de actividad figura 131, que muestra un histograma de barras en escala logarítmica (eje Y), y relaciona los parámetros de energía y tiempo del ensayo. Es así que en el intervalo de 1600 [s] hasta 1800 [s], se presentan las barras de mayor altura indicando mayor actividad energética en ese momento, anunciando la falla del recipiente.

Figura 131. Energía Vs Tiempo, escenario 5

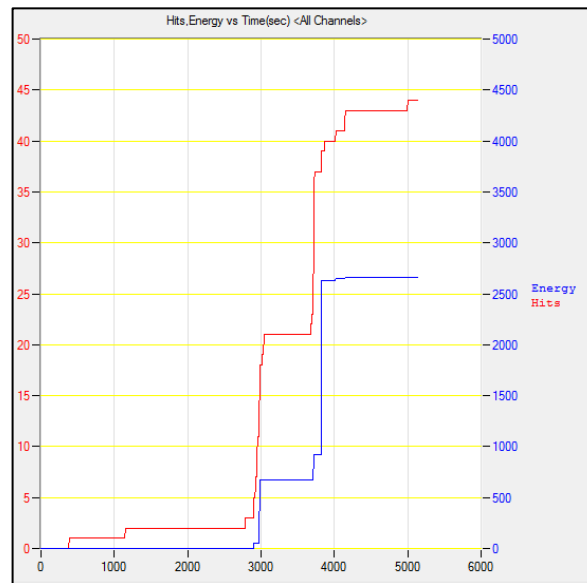


Fuente: Autores.

En este punto, es importante analizar a fondo las características de la falla, es por esto que se toma como elemento de comparación los resultados obtenidos tras el AET efectuado a otro recipiente de GLP (previo a los ensayos formales), el cual es análogo ya que las fallas impuestas a este también fueron realizadas en su superficie exterior. Este cilindro de ensayo preliminar (similar en dimensiones), se analizará a continuación en dos condiciones de falla diferentes: el escenario “a” con fallas catalogas como intermedias, y el “b” con alta degradación del material produciendo la falla del cilindro a niveles de presión por debajo de los valores de diseño.

El escenario “a” tuvo una gráfica de actividad acumulada como se muestra en la siguiente figura, de esta se extrae la cantidad total de hits y energía tras el AET, y es similar en comportamiento con el escenario 4 (descrito anteriormente) pues se observa un crecimiento tenue, con concavidad negativa de sus curvas acumulativas. Esto como se referenció anteriormente, implica que el material del recipiente no se encuentra en un nivel crítico de falla.

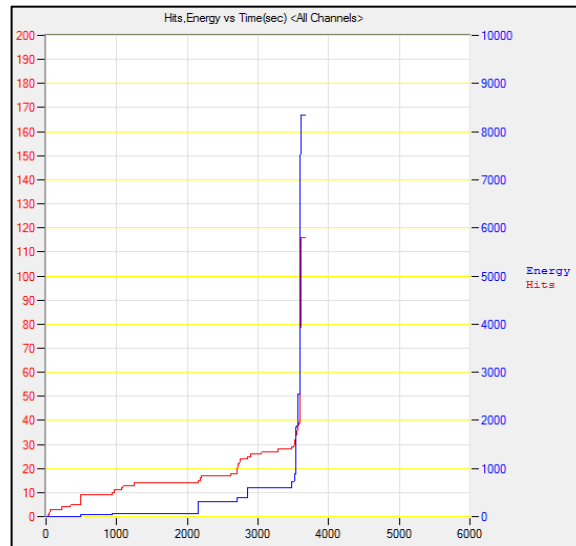
Figura132. Actividad acumulativa escenario “a”



Fuente: Autores

Por otro lado, el escenario “b” muestra con la siguiente gráfica, el crecimiento exponencial que sufrieron las curvas acumulativas de energía (azul) y hits (roja), siendo análogo al comportamiento en el escenario 5 (figura 130), de esta manera se comprueba que al observar el incremento desmesurado de las curvas en mención, es posible predecir la falla del material (como sucedió en ambos casos).

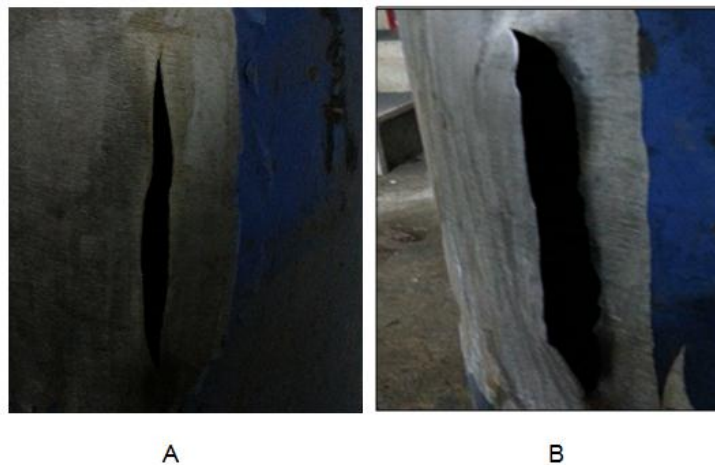
Figura 133. Actividad acumulativa escenario “b”



Fuente: Autores.

La siguiente fotografía ilustra la condición de las superficies de los cilindros afectados, tras los ensayos, siendo la figura 134.A la correspondiente al escenario “b”, y la figura 134.B la del escenario 5.

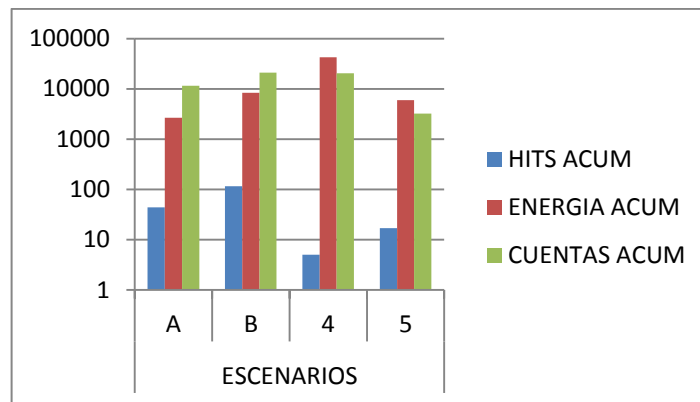
Figura 134. Falla de la superficie exterior del cilindro de GLP



Fuente: Autores.

Por otro lado si se hace un análisis comparativo entre los escenarios “a” y “b”, se observa (figura 135) que el escenario “b” tuvo mayor acumulación de hits y energía, además alcanzo un nivel de presión un 10% mayor frente al escenario “a”, esto se asocia al aumento entre la severidad de la falla entre cada ensayo. No obstante, los escenarios 4 y 5 presentan una relación diferente, a pesar de que el 5 dio lugar a la falla del recipiente; esto se asocia a que en el último escenario no se alcanzó un nivel de presión por encima del valor máximo del escenario 4, como consecuencia, se tuvo menor tiempo de ensayo y menor actividad AE.

Figura 135. Comparación parámetros AE escenarios 4, 5, a y b

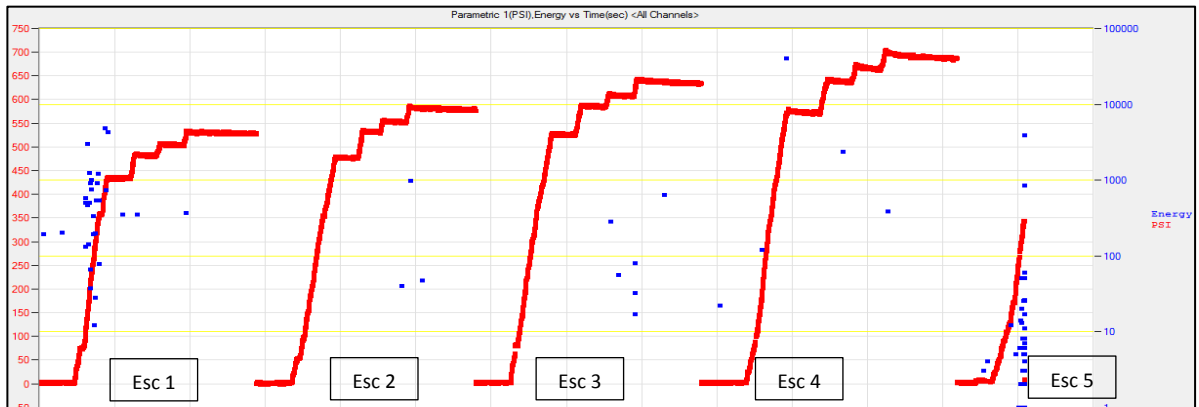


Fuente: Autores.

5.2.6. Análisis global de resultados recipiente 1

En primera instancia es importante revisar la actividad energética de las AE registradas en los 5 escenarios de falla correspondientes al cilindro 1; La gráfica 136 muestra dicha actividad relacionando los hits detectados (puntos azules) con los valores de energía del eje Y que se encuentra en escala logarítmica, así mismo permite visualizar los valores de presión obtenidos en cada ensayo y diferenciar que entre cada escenario los niveles de presión incrementaban un 10% respectivamente.

Figura 136. Actividad energética en todos los escenarios de falla del recipiente 1



Fuente: Autores.

La primera comparación se establece entre los escenarios 1 y 2, los cuales corresponden a severidad de falla nula en el recipiente en cuestión, se diferencian en que el escenario 2 alcanza un nivel de presión 10% por arriba del escenario 1, y de ahí se desprende la primera observación acerca del efecto *Kaiser* observado entre dichos escenarios, es así que los pocos hits detectados en el segundo ensayo se logran cuando se llega a 575[psi], el cual supera el nivel de carga máximo anterior 526 [psi].

En segundo lugar se observa que al imponer fallas leves (escenario 3) se detectan cambios en la actividad acústica frente al ensayo predecesor (escenario 2), además la mayoría de los hits detectados en el escenario 3 se logran en **etapas de sostenimiento**, lo que implica la iniciación del proceso de degradación del material. En este punto aún se observa el efecto *Kaiser* ya que los primeros hits del escenario 3 se detectan a un nivel de presión de 632 [psi], el cual supera el nivel de presión máximo del anterior ensayo 575[psi], lo que se asocia a fallas insignificantes.²⁹

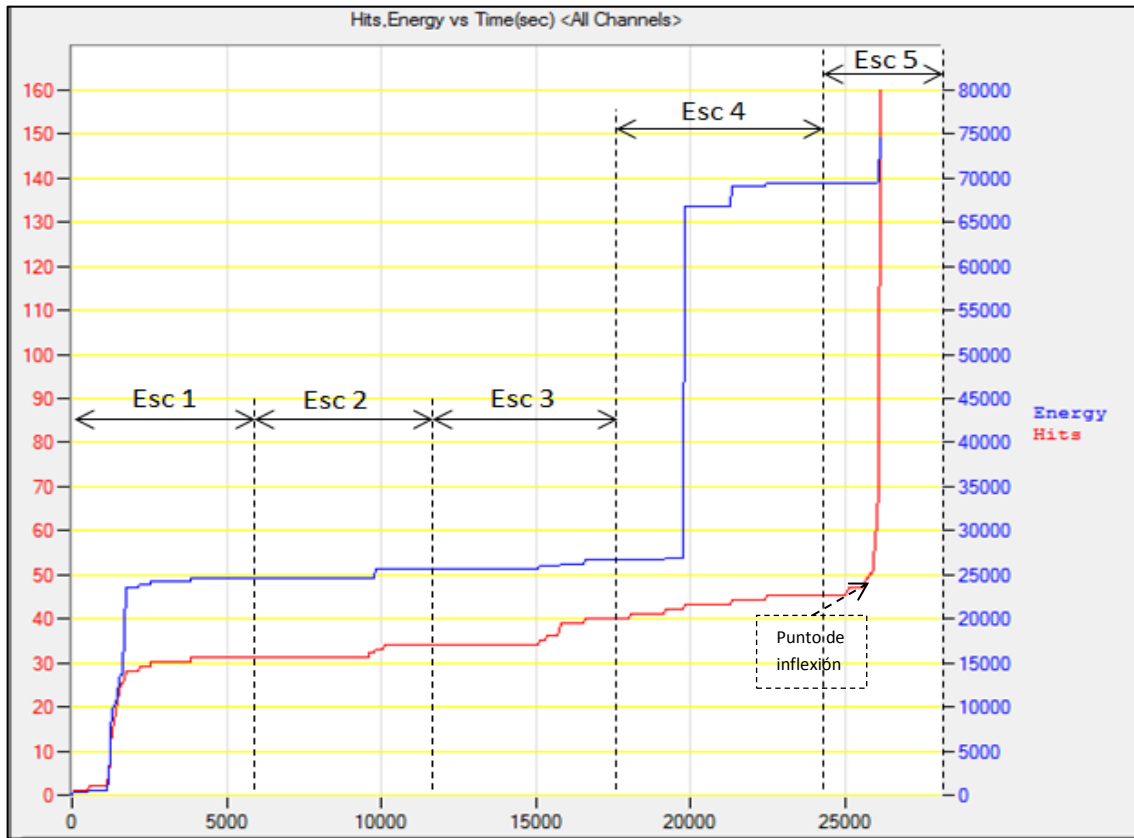
Es importante analizar el efecto *Felicity* presentado en el escenario 4, aquí las fallas impuestas catalogadas como intermedias conllevan a una actividad AE previo a alcanzar el nivel máximo anterior, lo que implica que las imperfecciones

realizadas afectaron significativamente la integridad del recipiente. Adicionalmente se detectan hits de mayor energía frente a los anteriores escenarios, asociando esta manifestación a la gravedad estructural mencionada.

Ahora bien, el escenario 5 muestra actividad acústica desde el inicio de la presurización, apareciendo nuevamente el efecto *Felicity*, además se logra mayor densidad de hits frente a los escenarios 2, 3, 4, confirmando que las fallas realizadas son de alta delicadeza, que en efecto permitieron lograr la ruptura del cilindro, justamente en dicha zona afectada. En adición, la falla del cilindro se logró a un nivel de presión muy bajo (341 [psi]) frente al valor mínimo de rotura del cilindro (960[psi]), como se observa en la anterior figura, esto repercute en la menor cantidad de energía medida en comparación con el escenario 1, el cual se realizó a niveles de presión más elevados, además mayor tiempo de medición, teniendo más oportunidad de recolectar parámetros característicos de las AE.

Por otro lado, es importante analizar el **comportamiento** que muestran las curvas acumulativas de hits y energía trazadas en la siguiente gráfica. Dichas curvas representan el historial de actividad AE del cilindro 1 desde que se realizó el primer AET (Esc 1), hasta que se logró la falla del mismo (Esc 5). Como primera observación se tiene que la acumulación energética hasta el escenario 3 (26057 [Und]) a pesar de ser significativa frente el global (74672 [Und]), presenta un crecimiento medido con concavidad negativa, demostrando que las fallas impuestas en el recipiente hasta ese momento, no eran de gravedad. Seguidamente, se tiene que el crecimiento pronunciado de las curvas en los escenarios 4 y 5, anuncian la presencia de serias afectaciones en el cilindro, en primer lugar porque se logra la mayor parte de la energía total detectada aproximadamente 65% de dicho valor máximo, y segundo como lo muestra la curva de hits acumulados, para el escenario 5 se presenta un punto de inflexión en el cual la curva adopta una concavidad positiva advirtiendo la destrucción del cilindro.

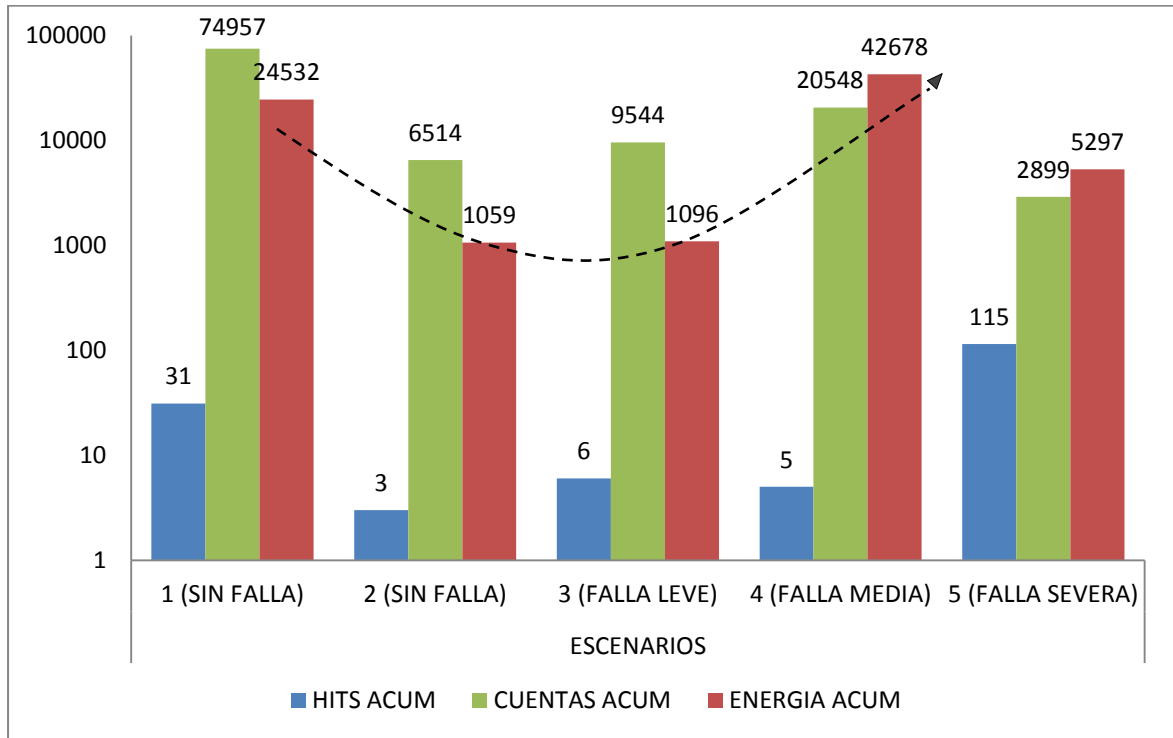
Figura 137. Historial de actividad acústica del cilindro 1



Fuente: Autores

Finalmente, se muestran los valores acumulativos de energía, hits, y cuentas, para cada escenario del cilindro 1. Recordando que la energía es un parámetro AE que asocia, todos los hits detectados, su amplitud, duración e implícitamente cuentas, en resumen es la **cuantificación de la actividad AE**, entonces se considera de gran importancia en el siguiente histograma, analizar su tendencia entre cada uno de los escenarios.

Figura 138. Energía, hits y cuentas acumuladas en cada escenario del cilindro 1



Fuente: Autores.

En primer lugar se observa un descenso energético entre el escenario 1 y 2, ambos caracterizados porque no se realizó ningún tipo de daño en el material, tal disminución de energía se asocia al efecto *Kaiser* como se mencionó en análisis anteriores, es así que al no imponerse nuevas imperfecciones en el material (Esc 2) la actividad AE tiende a disminuir, este comportamiento también se observa para la cantidad de hits y cuentas detectadas.

Ahora bien, las fallas leves logran ser detectadas ya que entre el escenario 2 y el 3 hay un cambio positivo, pasando de un valor de energía de 1059 a 1096, igualmente lo hacen la cantidad de hits y cuentas. Más grande es la variación de energía entre los escenarios 3 y 4, implicando que se aumentó de manera significativa la severidad de la falla, pasando de 1090 a 42678; es también importante analizar que aunque la cantidad de hits acumulados en el escenario 4

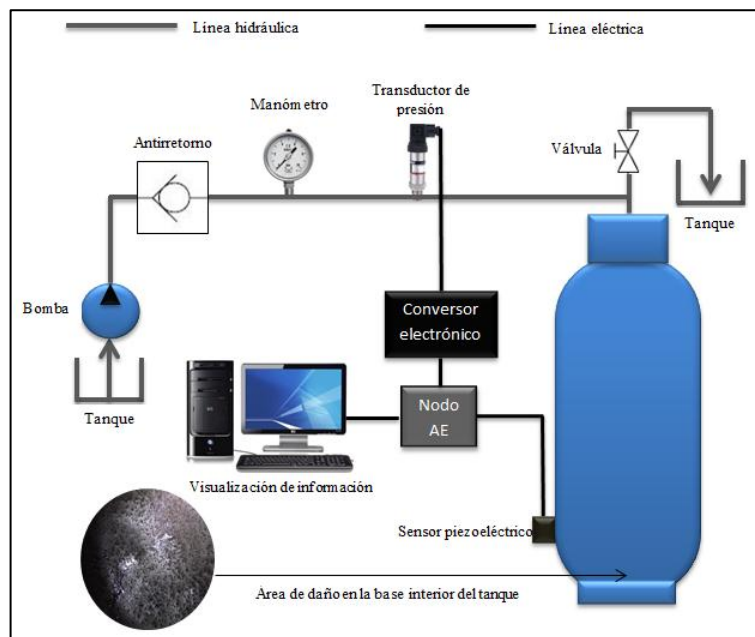
disminuyó (5 hits), las cuentas capturadas aumentaron drásticamente, influyendo como se mencionó en el valor elevado de energía de dicho escenario. Finalmente el escenario 5 no aumentó energéticamente frente al escenario 4, pero lo hizo en la cantidad de hits, el escenario 5 desmejoró completamente la integridad estructural del material, fallando a un nivel de presión bajo (344 [psi]), no obstante la gran aceleración con que se producen los hits como se analizó anteriormente es la que caracteriza la llegada de la falla.

5.3. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA - RECIPIENTE FALLAS INTERNAS

5.3.1. Montaje del sistema recipiente 2

El siguiente diagrama muestra el montaje del segundo tanque, es importante aclarar que los daños en este caso se realizaron en la base interior del recipiente como se muestra.

Figura 139. Montaje del sistema, recipiente con fallas internas



Fuente: Autores.

5.3.2. Verificación de la respuesta acústica del sensor y desempeño del sistema recipiente 2

Este pasó en el procedimiento seguido para la obtención de datos producto de la actividad microsismica durante la presurización de un cilindro de GLP, se realiza para cada uno de los escenarios con objeto de comprobar la respuesta acústica del sensor y desempeño del sistema, a continuación se muestra una de las verificaciones que se hicieron, se puede observar la similitud en los valores para cada parámetro producto del rompimiento del grafito.

Tabla 25. Verificación de desempeño recipiente 2

Rompimiento	1	2	3	4	5	promedio
Energía	2442	2599	2393	3033	3247	2742.8
Amplitud	86	87	88	88	88	87.4
Duración	32296	32432	31223	33574	33576	32620.2
Counts	1055	972	1012	1004	948	998.2

Fuente: Autores.

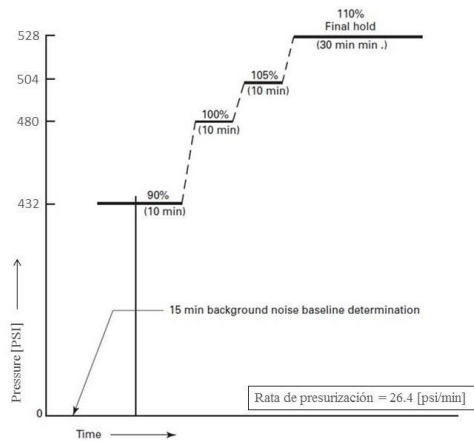
5.3.3. Determinación del ruido de fondo recipiente 2

La eliminación del ruido de fondo para cada uno de los escenarios, como se mencionó en el apartado 5.2.3 es de suma importancia, datos limpios permiten una interpretación clara y verídica de los ensayos, por tal razón, nuevamente se realiza un filtrado de la información para cada uno de los escenarios y se analizan como se expone más adelante.

5.3.4. Secuencias de presurización recipiente 2

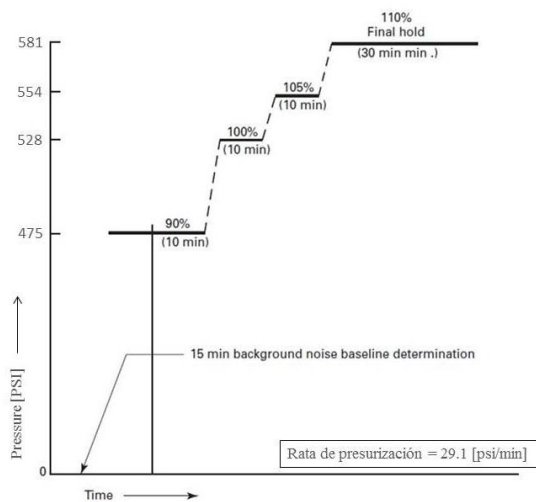
Nuevamente, al igual que para el recipiente 1 se listan a continuación las secuencias y ratas de presurización con las que se hará el llenado del cilindro. Una correcta secuencia de presurización y los cuidados necesarios del caso, garantizan la seguridad de la operación.

Figura 140. Secuencia de presurización escenario 6



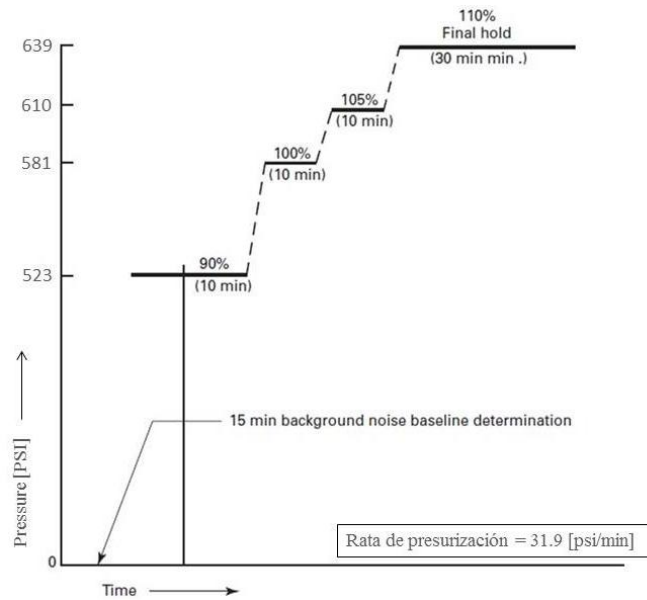
Fuente. ASME modificado por Autores.

Figura 141. Secuencia de presurización escenario 7.



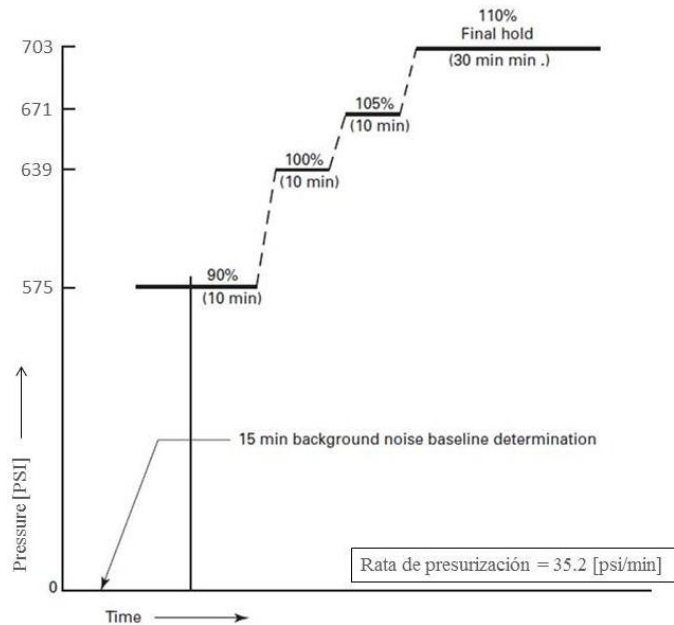
Fuente. ASME modificado por Autores.

Figura 142. Secuencia de presurización escenario 8.



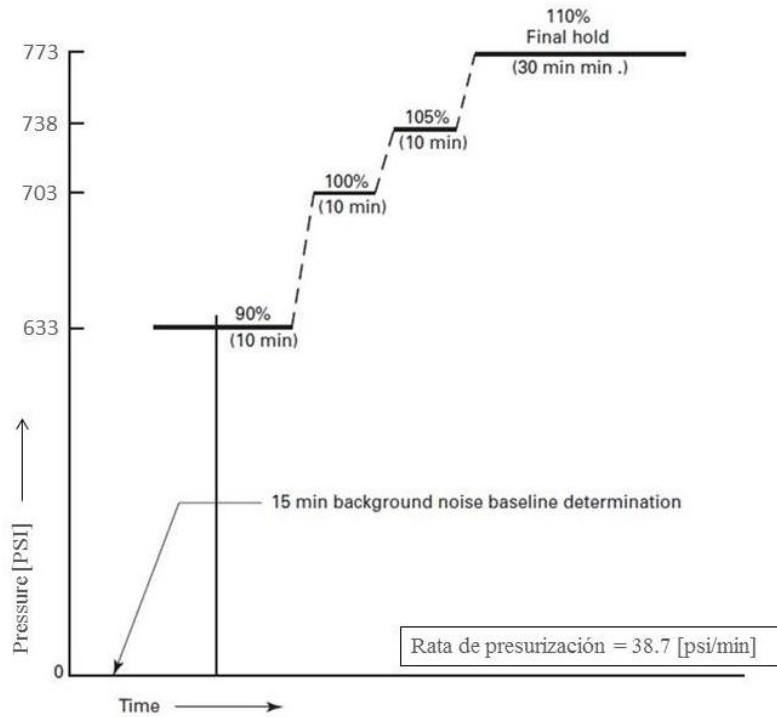
Fuente. ASME modificado por Autores.

Figura 143. Secuencia de presurización escenario 9.



Fuente. Autores.

Figura 144. Secuencia de presurización escenario 10.



Fuente. ASME modificado por Autores.

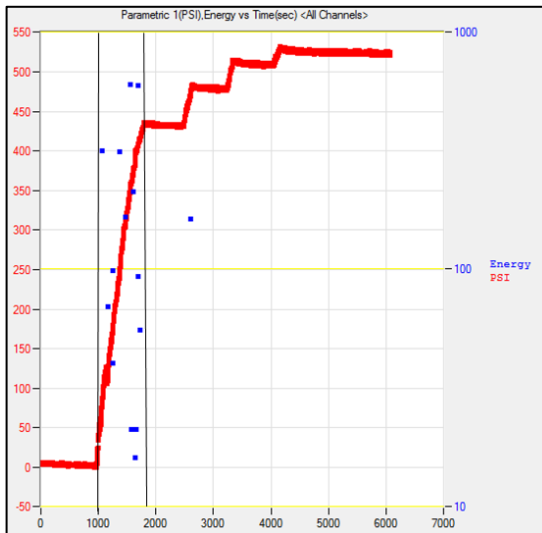
5.3.5. Reporte y análisis de resultados recipiente 2

5.3.5.1. Resultados escenario 6

De igual manera como se realizó con el escenario 1 se detectan AE en un segundo recipiente sin imponer falla alguna, una vez filtrado el ruido de fondo, se observa que la mayor parte de la actividad microsismica, con niveles bajos y altos de energía, nuevamente tuvo lugar durante la primera etapa de presurización (ver figura 145). Como se esperaba, la rata de producción de hits aumento al iniciar la secuencia de presurización inicial, una vez esta finaliza se observó poca actividad acústica con niveles bajos de energía, esta característica es indicativa de un recipiente en buen estado. La teoría y los resultados del ensayo señalan que el crecimiento abrupto o producción anormal de la actividad acústica indican la presencia de una falla, este comportamiento no se puede ver en este escenario, y

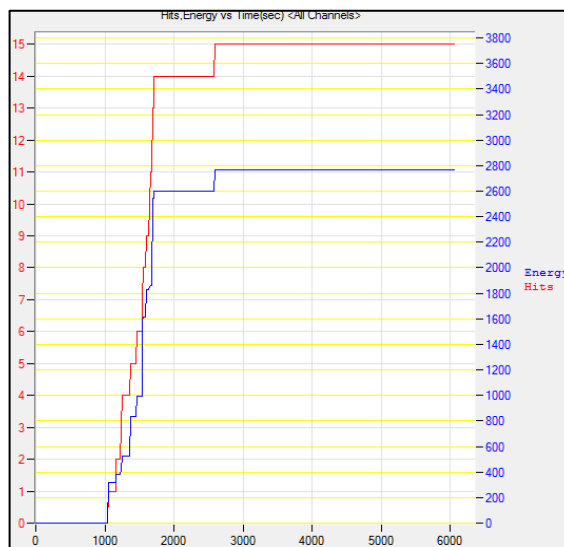
la tendencia de las curvas a tener una concavidad negativa es uno de los indicios para determinar que el recipiente se encuentra en buenas condiciones (ver figura 146).

Figura 145. Presión-Energía Vs Tiempo, escenario 6



Fuente. Autores.

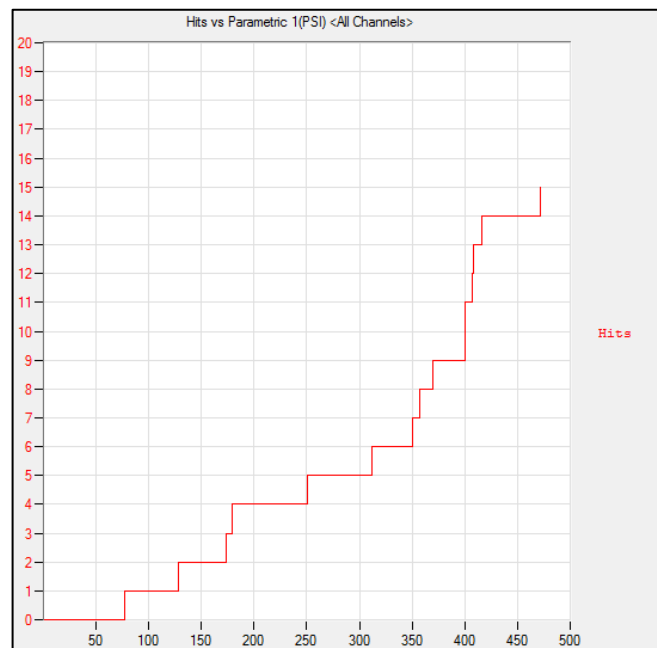
Figura 146. Energía y hits acumulados Vs Tiempo, escenario 6



Fuente. Autores.

Los defectos son señalados por un incremento desproporcionado en la actividad durante la carga como se produjo en los escenarios 5, y “b”. Dichos incrementos en la producción de hits podrían indicar el momento en el que el material desiste ante los esfuerzos a los que está siendo sometido. Por el contrario, como se observa en la siguiente figura, durante el ensayo, la actividad acústica que se representa como el cambio en la linealidad de la curva (hits vs tiempo), permaneció sin alteraciones significativas, lo que indica el buen estado del recipiente.

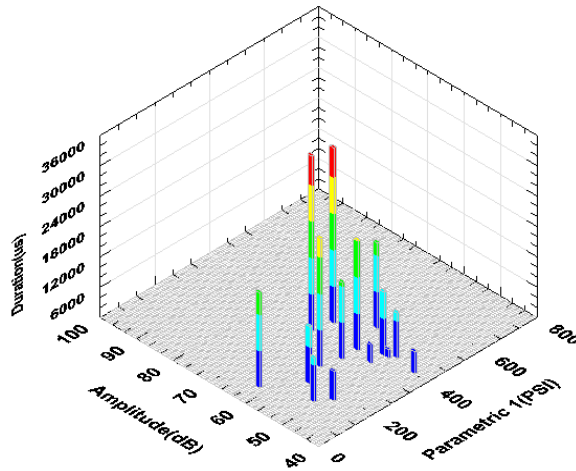
Figura 147. Hits acumulados Vs Presión, escenario 6



Fuente. Autores.

De la siguiente grafica se contempla que la amplitud de los hits detectados por el sistema es más grande en la medida en que la presión crece, esta tendencia de crecimiento conforme aumenta el estímulo sobre el material del recipiente, también se observa con el crecimiento de la duración de los hits.

Figura 148. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 6



Fuente. Autores.

Para concluir con este escenario se cuantifican los parámetros obtenidos durante el censo, tabulando sus valores mínimos, máximos, promedios y su respectiva desviación estándar.

Tabla 26. Estadísticas de AET en el escenario 6

HIT DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev
Risetime	1	67.0000	1494.0000	505.8000	314.0633
CountsPeak	1	3.0000	250.0000	46.0667	57.4450
Counts	1	24.0000	3644.0000	1092.3334	1192.3265
Energy	1	16.0000	597.0000	184.2667	185.9156
Duration	1	1773.0000	34758.0000	15027.5996	10142.2420
Amplitude	1	44.0000	68.0000	55.9333	6.4236
Asl	1	18.0000	36.0000	25.6667	6.1283
Threshold	1	40.0000	40.0000	40.0000	0.0000
AvgFreq	1	7.0000	104.0000	51.7333	32.0717
Rms	1	0.0006	0.0046	0.0017	0.0013
RevFreq	1	7.0000	105.0000	51.5333	32.4384
InitFreq	1	24.0000	167.0000	73.4000	36.4249
SigStrength	1	100701.8516	3733163.2500	1152960.0000	1161673.7339
AbsEnergy	1	668.3438	104338.8281	23101.0273	33162.0906
Parametric1	1	76.9352	472.0889	313.7101	117.5704
TIME DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev
Parametric1	1	-0.4292	531.6000	385.4824	194.3988

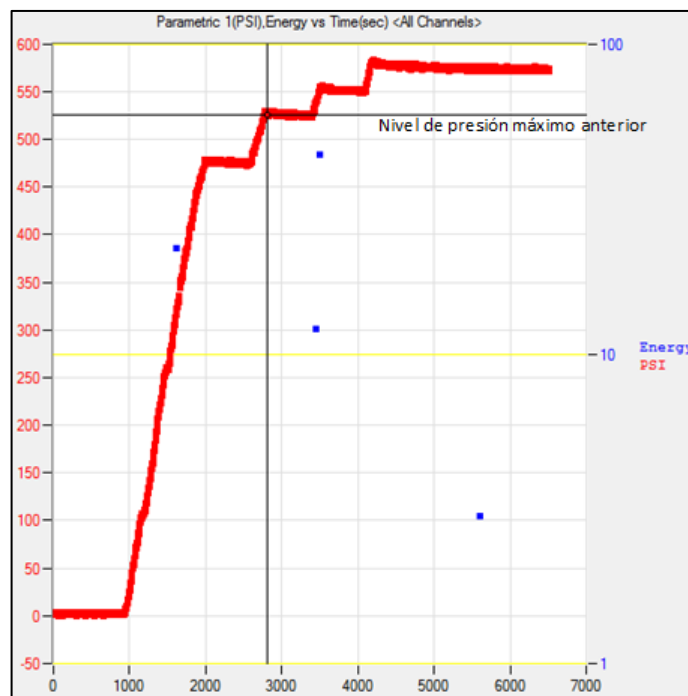
Fuente. Autores.

5.3.5.2. Resultados escenario 7

En este escenario a diferencia del anterior se detectaron solo 4 hits, tres de estos solo hasta superar el nivel de presión máximo al cual fue sometido el recipiente durante la anterior presurización y uno durante la etapa de presurización inicial. Se observaron bajos niveles de energía que no superarían las 81 unidades, asociados a hits detectados en un nivel de presión superior al nivel máximo del escenario anterior, lo que confirma nuevamente el efecto *Kaiser* (ver figura 149).

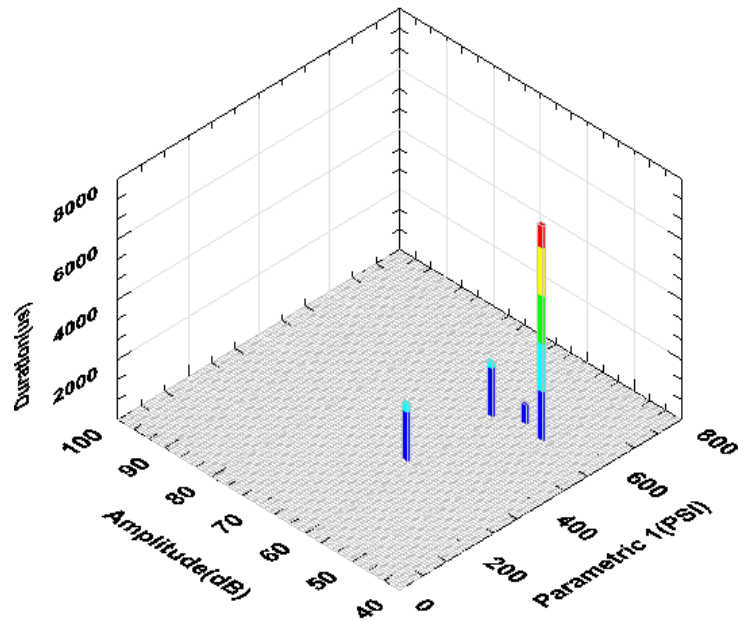
Adicionalmente, en el histograma 3-D (figura 150) que relaciona diversos parámetros AE, no se detectó actividad acústica importante, los estallidos presentaron niveles bajos de amplitud entre 50 y 60 [dB] y una duración promedio de 2930 [μ s].

Figura 149. Presión-Energía Vs Tiempo, escenario 7



Fuente. Autores.

Figura 150. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 7



Fuente. Autores.

Concluyendo, las estadísticas obtenidas en el AET se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 27. Estadísticas de AET en el escenario 7

HIT DRIVEN DATA:						
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev	
Risetime	1	8.0000	583.0000	174.2500	238.8351	
CountsPeak	1	3.0000	80.0000	22.5000	33.2002	
Counts	1	20.0000	331.0000	108.0000	129.0601	
Energy	1	3.0000	44.0000	20.2500	15.2705	
Duration	1	635.0000	7150.0000	2882.0000	2515.5492	
Amplitude	1	51.0000	62.0000	57.5000	4.3875	
Asl	1	14.0000	22.0000	18.0000	3.1623	
Threshold	1	40.0000	40.0000	40.0000	0.0000	
AvgFreq	1	19.0000	46.0000	29.7500	10.3290	
Rms	1	0.0004	0.0008	0.0006	0.0002	
RevFreq	1	19.0000	39.0000	27.5000	7.7621	
InitFreq	1	40.0000	375.0000	231.7500	147.2980	
SigStrength	1	20090.3496	276610.5938	128109.1484	95722.7410	
AbsEnergy	1	270.2125	3256.4678	1636.2916	1113.1953	
Parametric1	1	318.5503	575.6382	496.7860	103.7830	
TIME DRIVEN DATA:						
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev	
Parametric1		-0.4292	583.9698	420.8140	213.8249	

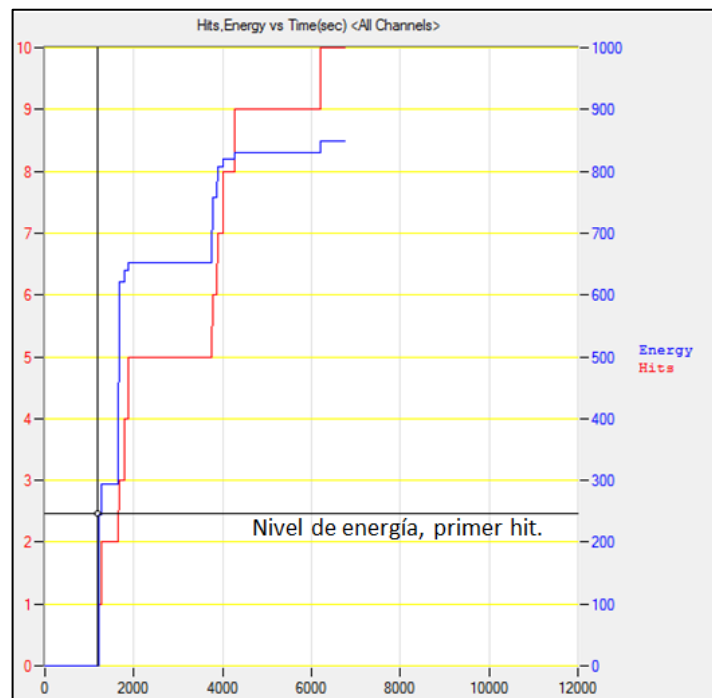
Fuente. Autores.

5.3.5.3. Resultados escenario 8

En este escenario se imponen fallas con severidad leve sobre el recipiente y se detecta la actividad microsismica observándose como consecuencia de esto estallidos durante la etapa de presurización con altos niveles energéticos que superan el acumulado de energía del anterior ensayo (ver figura 151).

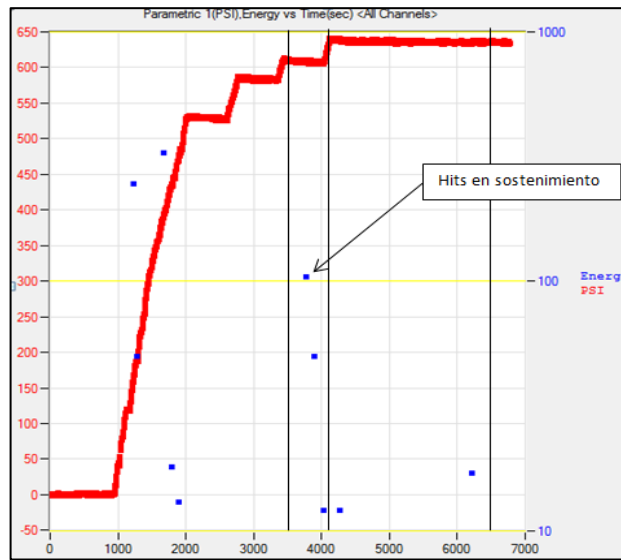
Como se observa en la figura 152, la producción de emisiones por debajo del nivel de presión máximo del escenario anterior (figura 149) y durante periodos de sostenimiento de carga, indica el efecto de los daños impuestos sobre el material, adicional a esto hay un aumento en la cantidad de estallidos detectados sobre el escenario anterior.

Figura 151. Energía y hits acumulados Vs tiempo, escenario 8



Fuente. Autores.

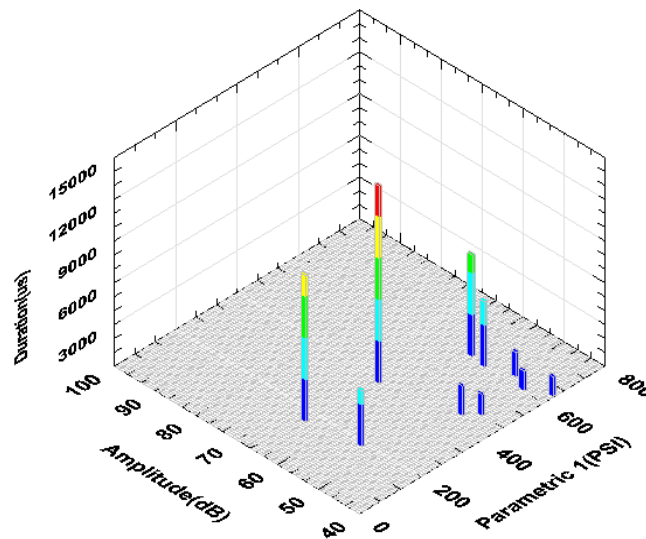
Figura 152. Presión-Energía Vs tiempo, escenario 8



Fuente. Autores.

Se advierten, al igual que en los ensayos anteriores, incrementos en la duración de los hits en proporción a la amplitud detectada. Hits más duraderos se producen a elevados niveles de presión y con amplitudes entre 60 y 100 [dB], como se muestra a continuación.

Figura 153. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 8



Fuente. Autores.

Finalmente, se cuantifican los parámetros AE medidos para este escenario.

Tabla 28. Estadísticas de AET en el escenario 8

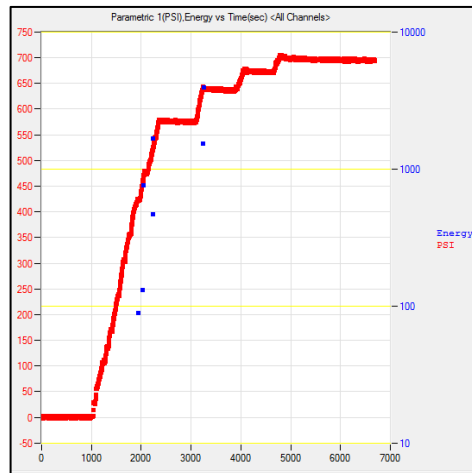
HIT DRIVEN DATA:						
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev	
Risetime	1	37.0000	455.0000	254.2000	174.6321	
CountsPeak	1	1.0000	21.0000	7.9000	7.1056	
Counts	1	1.0000	361.0000	93.4000	106.1275	
Energy	1	12.0000	327.0000	84.8000	105.7968	
Duration	1	1454.0000	14201.0000	4928.5000	4201.8754	
Amplitude	1	40.0000	66.0000	52.7000	8.2225	
Asl	1	16.0000	34.0000	22.1000	6.8476	
Threshold	1	40.0000	40.0000	40.0000	0.0000	
AvgFreq	1	0.0000	25.0000	14.6000	6.7557	
Rms	1	0.0004	0.0038	0.0013	0.0012	
RevFreq	1	1.0000	26.0000	14.4000	6.3435	
InitFreq	1	2.0000	88.0000	41.6000	24.2660	
SigStrength	1	78296.5469	2043286.5000	532347.3125	660051.5750	
AbsEnergy	1	642.0831	73969.3516	16079.2939	26199.5520	
Parametric1	1	163.8215	638.7200	473.6436	171.3000	
TIME DRIVEN DATA:						
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev	
Parametric1		-1.6194	641.1004	473.1181	232.3430	

Fuente. Autores.

5.3.5.4. Resultados escenario 9

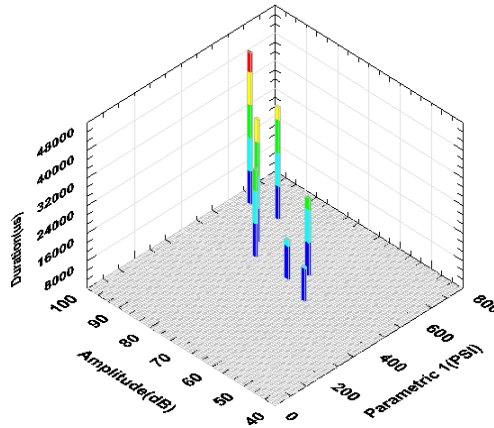
Se realizan daños sobre el material aumentando la severidad hasta un nivel medio obteniéndose hits durante gran parte del ensayo con niveles de energía cada vez más altos, esta vez, el acumulado fue 8634 unidades. La producción de hits durante el periodo de presurización inicial, debido a la ausencia del efecto *Kaiser*, señala los defectos impuestos (ver figura 154).

Figura 154. Presión-Energía Vs tiempo, escenario 9



Fuente. Autores.

Figura 155. Histograma 3-D, amplitud, presión y duración de hits, escenario 9



Fuente. Autores.

En la figura 155, se observa un rango de amplitudes entre 62 y 96 [dB], a este punto la severidad de la falla, así como el aumento de la presión, influyen de manera positiva en los valores de energía de los hits, su duración y amplitud.

Para concluir la visualización de los datos obtenidos en el ensayo, estos son cuantificados y tabulados a continuación:

Tabla 29. Estadísticas de AET en el escenario 9

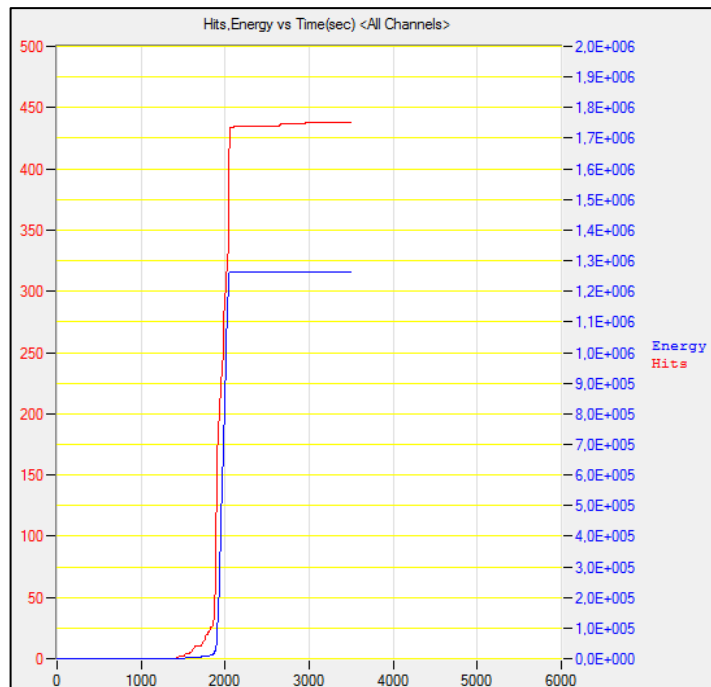
HIT DRIVEN DATA:						
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev	
Risetime	1	5.0000	109.0000	67.2857	37.7386	
CountsPeak	1	2.0000	41.0000	24.5714	13.8652	
Counts	1	921.0000	6299.0000	3541.7144	1877.6369	
Energy	1	89.0000	3964.0000	1233.4286	1258.2984	
Duration	1	9992.0000	43925.0000	25909.4277	11528.5900	
Amplitude	1	62.0000	96.0000	78.8571	11.2685	
Asl	1	24.0000	56.0000	40.5714	10.5946	
Threshold	1	40.0000	40.0000	40.0000	0.0000	
AvgFreq	1	92.0000	147.0000	127.5714	21.8296	
Rms	1	0.0012	0.0452	0.0140	0.0143	
RevFreq	1	90.0000	147.0000	127.7143	22.5750	
InitFreq	1	272.0000	529.0000	386.7143	73.9589	
SigStrength	1	561669.6875	24764514.0000	7707799.0000	7859681.4620	
AbsEnergy	1	7440.1133	10243322.0000	1998018.3750	3428103.2628	
Parametric1	1	423.2899	641.1004	525.3088	79.3257	
TIME DRIVEN DATA:						
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev	
Parametric1		-1.6194	704.2566	487.7510	262.0855	

Fuente. Autores.

5.3.5.5. Resultados escenario 10

Para este escenario se impusieron daños con severidad alta lo que **ocasiono la falla del recipiente** durante la presurización, se observa en la figura 156, el drástico incremento en la producción de energía y cantidad de hits lo que permite predecir una falla inminente. Al igual que en el escenario 5 donde el recipiente es llevado hasta la rotura, también se generó una falla radical con diferencia en que se ocasiona una fuga debido a una pequeña grieta en la zona dañada, la propagación de esta grieta genera alta producción de actividad microsismica y energía.

Figura 156. Hits-energía acumulados vs tiempo, escenario 10

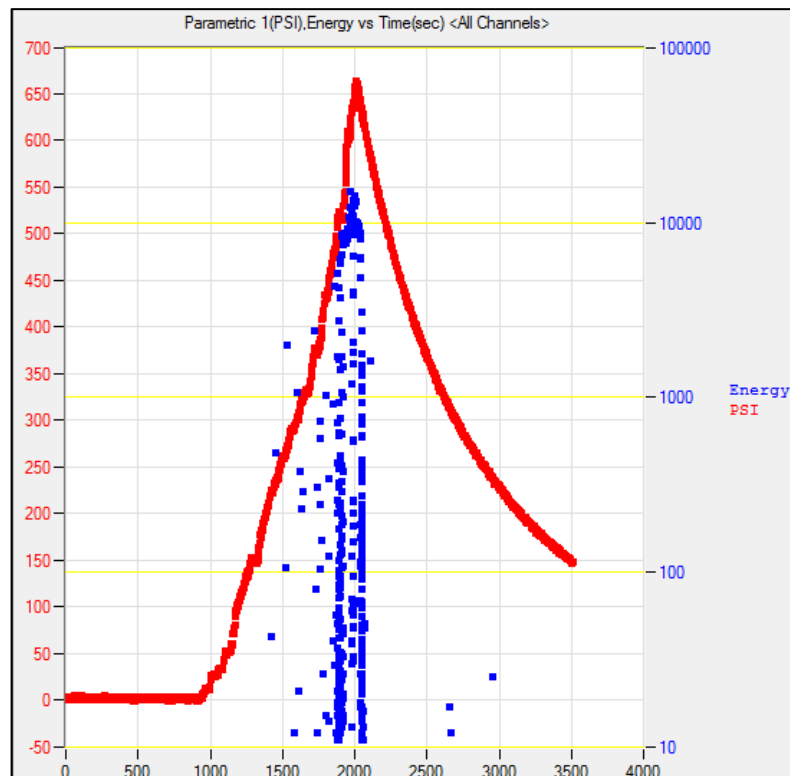


Fuente. Autores.

Una vez es alcanzado el nivel de presurización 664 [psi] y es iniciado el periodo de sostenimiento, se confirma la presencia de una fuga en el recipiente debido a la caída en la presión, sin embargo es en ese punto donde finaliza la producción

drástica de estallidos con gran energía, por lo tanto, se descarta que la actividad acústica haya sido producida por el goteo de agua. Se observa la liberación rápida de energía producto de la actividad microsísmica durante la expansión de una grieta.

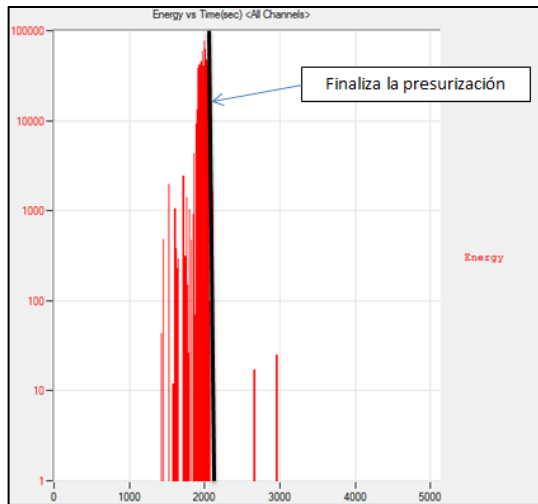
Figura 157. Presión-Energía Vs tiempo, escenario 10



Fuente. Autores.

En la siguiente figura se visualiza la intensa actividad acústica al finalizar la primera etapa de presurización, debido a la expansión de una grieta; finalizada la presurización, la actividad acústica se reduce casi por completo presentándose dos hit de baja energía durante el periodo de despresurización debido a la fuga.

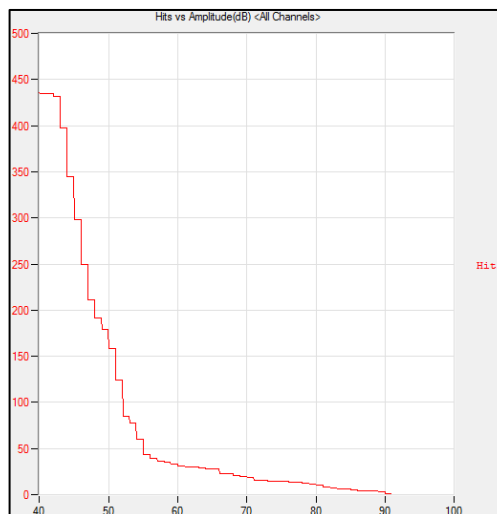
Figura 158. Energía Vs Tiempo, escenario 10



Fuente. Autores.

Otro indicio de la expansión de la grieta durante la presurización se muestra en el amesetamiento de la curva de la siguiente figura; se puede observar el incremento en la cantidad de hits de alta amplitud producidos durante la expansión del defecto.

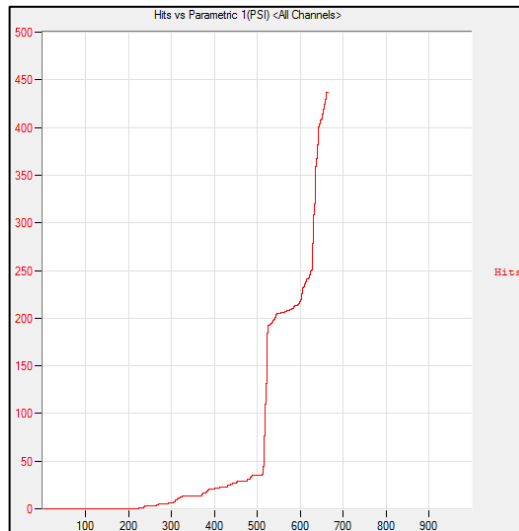
Figura 159. Distribución de Hits Vs amplitud, escenario 10



Fuente. Autores.

Al verificar la cantidad de hits producidos en función de la presión, se pueden ver los incrementos drásticos empezando en 200 [psi] con el anuncio de la falla, posteriormente una elevación pronunciada indica la propagación de la grieta.

Figura 160. Hits acumulados Vs Presión, escenario 10



Fuente. Autores.

Los datos obtenidos durante la realización del ensayo se muestran a continuación

Tabla 30. Estadísticas de AET en el escenario 10

HIT DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev
Risetime	1	1.0000	6523.0000	2545.5457	1921.4066
CountsPeak	1	1.0000	32415.0000	4763.2739	8381.4310
Counts	1	1.0000	32614.0000	5838.1255	9066.5871
Energy	1	11.0000	15118.0000	2884.9270	4164.8581
Duration	1	1509.0000	1000000.0000	311681.2188	431215.4844
Amplitude	1	39.0000	91.0000	49.8790	8.2753
Asl	1	16.0000	55.0000	36.8927	4.8262
Threshold	1	40.0000	40.0000	40.0000	0.0000
AvgFreq	1	0.0000	169.0000	20.9521	27.2292
Rms	1	0.0004	0.0404	0.0057	0.0038
RevFreq	1	0.0000	14485.0000	509.9269	1593.0741
InitFreq	1	0.0000	48203.0000	2539.0776	6025.6305
SigStrength	1	69555.2500	94435712.0000	18023736.0000	26015451.6398
AbsEnergy	1	340.4553	8152147.5000	229940.8281	553931.9581
Parametric1	1	223.3326	663.7147	567.7810	81.8018
TIME DRIVEN DATA:					
Feature	Chan	Minimum	Maximum	Average	Std Dev
Parametric1	1	-1.6194	663.7147	216.3708	189.1348

Fuente. Autores.

5.3.6. Análisis global de resultados recipiente 2

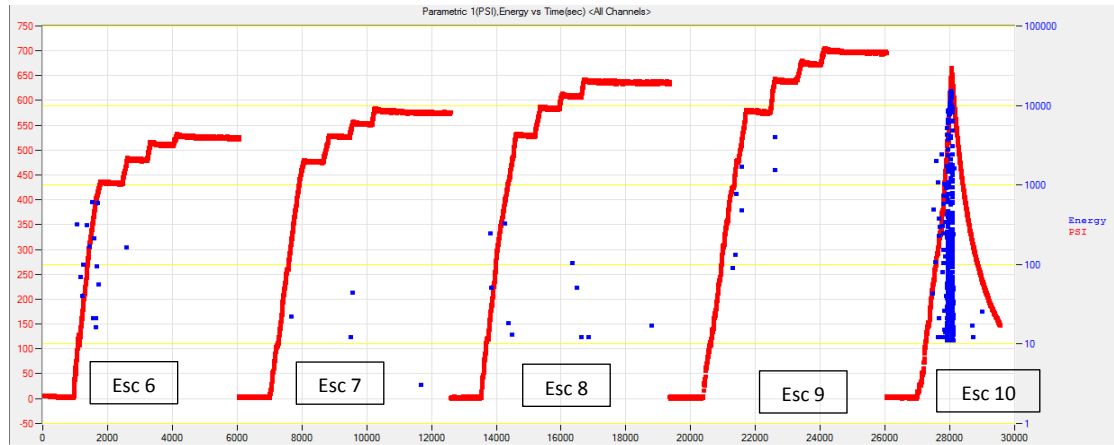
La figura 161, muestra comparativamente el comportamiento acústico en los diferentes escenarios falla, en esta gráfica se muestran las secuencias de presurización (curvas rojas), que aumentan aproximadamente un 10 % frente al valor de presión máximo del escenario predecesor, además cada grupo de hits (puntos azules) se les asocia un valor de energía en el eje Y que se encuentra en escala logarítmica.

La primera observación se da con el efecto *Kaiser* entre los escenarios 6 y 7, ya que en este último ensayo la mayoría de los hits detectados aparecen en un nivel de presión (534 [psi]) superior al nivel de presión máximo del sexto escenario (531 [psi]). Así mismo se observa entre estos ensayos una disminución en la actividad AE ya que los hits detectados en el escenario 7 son menores en cantidad y en energía que los obtenidos en el sexto.

Seguidamente, se detectó un cambio entre los escenarios octavo y séptimo, la actividad acústica del escenario 8 inició durante la primera etapa de presurización, presentándose el efecto *Felicity*, fenómeno antagónico al efecto *Kaiser*, además que los hits detectados mostraron más energía lo que confirma que en este escenario el tanque sufrió afectación por las fallas leves. El escenario 9, muestra respecto al escenario 8, hits de mayor energía, lo que comprueba que efectivamente los daños impuestos fueron significativos, además también se observa el efecto *Felicity* pues hay detección de hits en la primera etapa de presurización previo a alcanzar el nivel máximo de presión del escenario octavo.

Finalmente, el escenario 10 muestra la mayor actividad acústica de todos los ensayos del recipiente en estudio, este ensayo se caracterizó por provocar fugas en la base del mismo, detectándose hits cada vez con mayor energía (al aumentar la presión), provenientes de la propagación de las grietas en la zona afectada.

Figura 161. Actividad energética en todos los escenarios de falla del cilindro 2

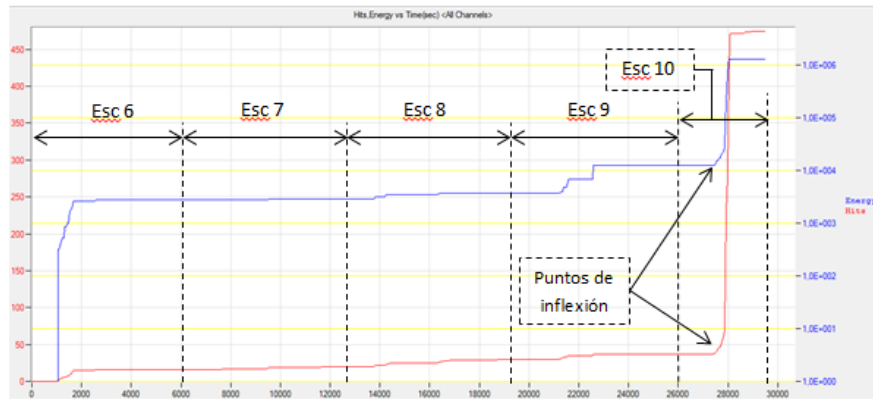


Fuente: Autores.

En la siguiente figura se observa la historia de actividad acústica registrada para el cilindro 2, y con ella es posible analizar el avance de la degradación del material tras el aumento de la severidad de la falla. Es notable el amesetamiento que sufren las curvas acumulativas de energía (azul) y hits (roja) en los escenarios 6, 7, 8, y 9, lo cual implica que hasta ese último ensayo no se ha afectado significativamente el material del recipiente.

Por otro lado el escenario 10 presenta para ambas curvas un punto de inflexión, disparándose de manera acelerada la acumulación de hits y su respectiva energía durante los primeros minutos de dicho ensayo, anunciando el colapso del material, particularmente la aparición de una fuga. No obstante en este último escenario se observan segmentos de pendiente nula al final de ambas curvas, este cambio tan notable se da en el momento en que se alcanza el primer nivel de presión (662 [psi]) instante en el cual se detiene la presurización, y debido a la fuga originada se inicia la caída de la presión en el recipiente, por tanto como no hay propagación de la grieta en ese tiempo no hay actividad acústica significativa.

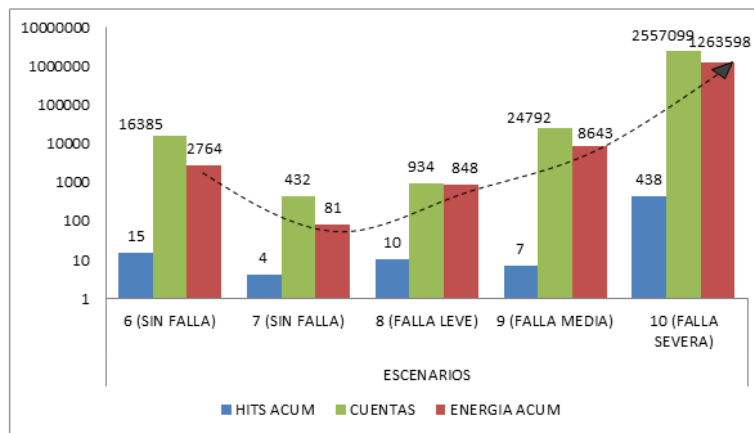
Figura 162. Historial de actividad acústica del cilindro 2



Fuente: Autores.

El siguiente histograma permite analizar en términos de energía y otros parámetros AE, la actividad acústica en cada escenario de falla del recipiente 2, y observar las tendencias de crecimiento de tales variables tras la imposición de las fallas. De manera general se observa que al no imponer fallas la actividad acústica va a disminuir como se muestra entre los escenarios 6 y 7, por otro lado la imposición de fallas cada vez más severas, tienden a aumentar los valores de los parámetros característicos de las AE, en términos globales la energía.

Figura 163. Historial de actividad acústica del cilindro



Fuente: Autores.

6. CONCLUSIONES

La implementación de la técnica de emisiones acústicas permitió detectar los cambios impuestos sobre la estructura de los recipientes bajo prueba. Observándose que en la medida que se aumentaba la severidad de la falla, los parámetros característicos cuantificados de este ensayo no destructivo, tales como energía, cantidad de hits, y cuentas etc. también manifestaban una tendencia de crecimiento.

Se experimentó el fenómeno asociado al efecto *Kaiser*, comprobándose que entre escenarios consecutivos donde el cilindro no sufría degradación en su estructura (falla nula), se detectaban emisiones acústicas en niveles de presión superiores al valor máximo usado en el escenario de falla predecesor. Escenario 1 y 2, y escenarios 6 y 7 respectivamente.

Se comprobó que en escenarios en que se imponían nuevas fallas, el efecto *Felicity* tomaba lugar, pues se detectaba actividad acústica antes de alcanzar el nivel de presión máximo del escenario predecesor.

La evolución de la actividad microsismica durante los diferentes escenarios de falla tanto para el cilindro con daños internos como para el recipiente con defectos externos, determina la integridad estructural de estos.

Es posible, usando el historial de actividad acústica, determinar la presencia de fallas que comprometen seriamente la integridad estructural del recipiente, principalmente aquellas que lo llevarían a su destrucción, ya que como se observó en las figura 136 y figura 162, previo a producirse la falla, las curvas de hits y valores de energía acumulados, evolucionan de manera exponencial, diferente al comportamiento de estas cuando las fallas eran de severidad leve, el cual se caracterizaba por tener un crecimiento mesurado, y con concavidad negativa.

Se siguieron las pautas sobre AET en recipientes a presión, que se exponen en la norma ASME sección V, artículo 12, comprobándose que los lineamientos establecidos en este estándar apuntan a la obtención de magníficos resultados tras la implementación de esta tecnología.

El sistema mecánico de presurización construido en este proyecto, cumplió con los requerimientos de los estándares NTC 5171 y NTC 522-2, los cuales establecen que en una prueba tipo hidrostática de cilindros de gas comprimido, se deben soportar los niveles de presión máximos del ensayo, así como la eliminación total del aire de la línea hidráulica, y garantizar que no existieran fugas en el sistema.

Una correcta caracterización, y filtrado del ruido de fondo son procesos de gran importancia para el análisis de resultados obtenidos tras la ejecución del AET, sin esta etapa señales de ruido podrían interpretarse como emisiones acústicas, afectando la interpretación de los datos.

Mediante una correcta configuración de los parámetros del hardware, tales como HDT, PDT, Sample Rate, Threshold, entre otros, se logra agudizar el proceso de filtrado para la detección de actividad acústica representativa.

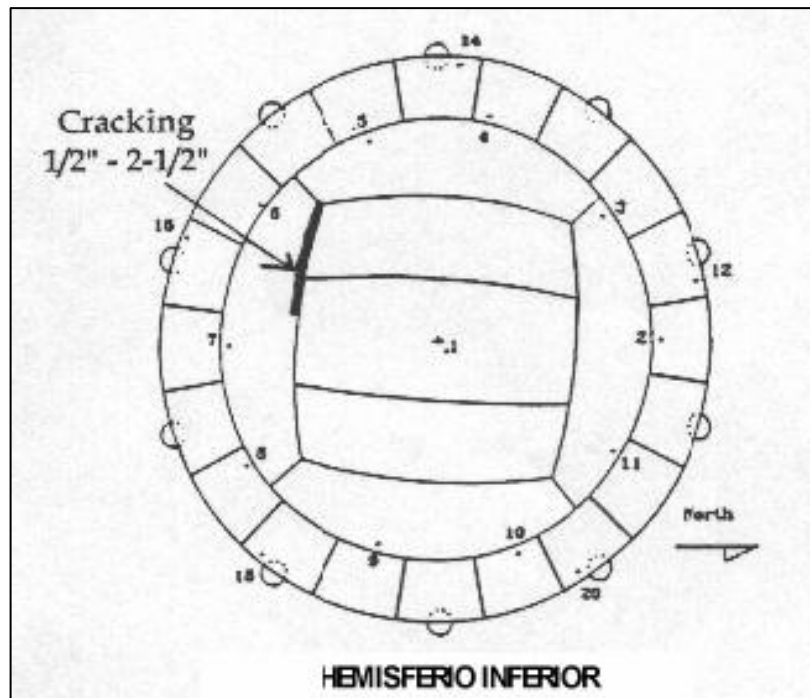
La utilización de las diferentes tipos de gráficas (calidad, acumulativas, intensidad) permite ver fácilmente las emisiones acústicas detectadas, contribuyendo a un excelente monitoreo del recipiente, y una correcta evaluación de los datos adquiridos.

7. OPORTUNIDADES DE INVESTIGACION Y DESARROLLO CON EL USO DE AE PARA LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

7.1. LOCALIZACIÓN DE FALLAS

La determinación del lugar exacto desde el cual se está registrando actividad micro-sísmica es una de las bondades de la tecnología, permite hacer una evaluación rápida y directa de la situación y actuar en el momento exacto y acertadamente sobre el caso. El uso de esta técnica para la determinación de emisiones producidas por fallas como el agrietamiento y la corrosión es de importante interés para la industria.

Figura 164. Localización de falla en esfera de GLP



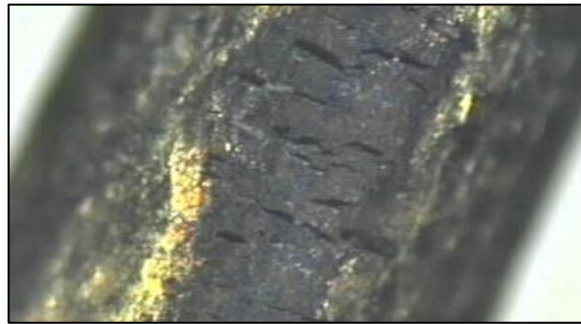
Fuente: Documento técnico, *Quality services laboratories*.

7.2. ESTUDIO DE FENÓMENOS DE AGRIETAMIENTO EN MEDIOS CORROSIVOS

La resistencia de un material metálico a medios corrosivos es una propiedad intrínseca del material, pero no invariante. Esta propiedad en muchos casos se ve fuertemente alterada tras someter el material a altas temperaturas u esfuerzos como las que tienen durante el proceso de unión por fusión del material. Evaluar la resistencia a la corrosión de un material metálico o unión soldada metálica es vital de cara a validar su utilización en determinadas ambientes o situaciones.

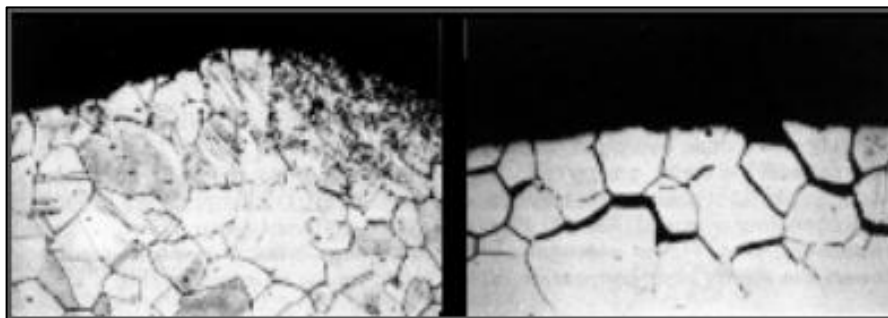
Algunos de los casos de estudio son la corrosión bajo tensión tras-granular y corrosión bajo tensión inter-granular mostrados a continuación:

Figura 165. Corrosión bajo tensión tras-granular



Fuente: <http://www.materia.coppe.ufrj.br>

Figura 166. Corrosión intergranular



Fuente: <http://spanish.metalimprovement.com>

7.3. EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE TRABAJO DE UNA TUBERÍA

La integridad estructural de cualquier bien en una planta de producción, su correcto mantenimiento y el cuidado de su vida útil garantiza la permanencia en estado productivo de la industria, las emisiones acústicas son una técnica que se puede usar como método predictivo para tal fin.

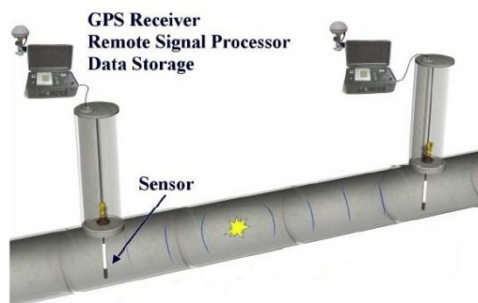
Figura 167. Inspección de tubería



Fuente: <http://abcprecisions.com>

Debido a que la tecnología ofrece un análisis tipo global a los elementos inspeccionados y la localización de la falla en servicio, la relación beneficio costo de la evaluación de tubería bajo tierra se hace atractiva y esto a su vez se convierte en una oportunidad de desarrollo importante.

Figura 168. Detección de fallas en tubería bajo superficie



Fuente: *Pressure Pipe Inspection Company – AET*

7.4. INSPECCIÓN DE FONDO DE TANQUES EN SERVICIO

El fondo de los tanques de almacenamiento de fluidos es fuertemente atacado por agentes corrosivos lo que hace que se tenga especial cuidado con este elemento, hacer un monitoreo permanente puede anunciar el momento exacto en el que se debe hacer alguna corrección lo que puede reducir costos al hacer una programación adecuada.

Figura 169. Tanques atmosféricos de almacenamiento



Fuente: <http://petrogroupcompany.com>

7.5 MONITOREO DE ENFRIAMIENTO O ESTUDIO DE FUENTES TÉRMICAS

Durante el enfriamiento de piezas sometidas a cambios de temperatura como los tratamientos térmicos o trabajo en altas temperaturas se emiten vibraciones Microsismico que pueden ser evaluadas para verificar la integridad estructural de dichas piezas, se podrían desarrollar más y mejores procesos al estudiar estos fenómenos con la tecnología de AE.

Figura 170. Inspección de soldadura en tubería



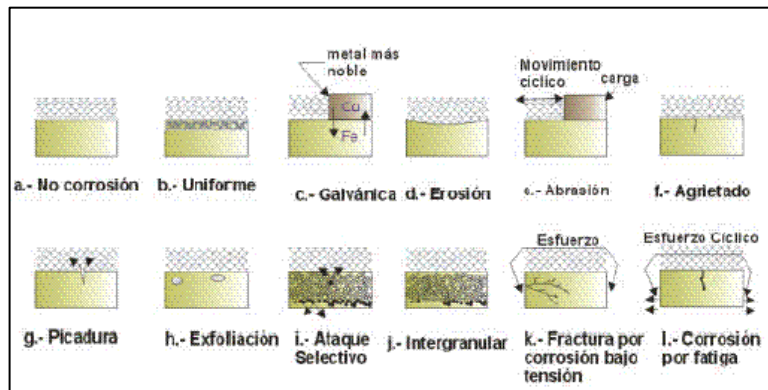
Fuente: *GE Inspection Technologies.*

Como se menciona antes, los procesos térmicos producen tensiones sobre las estructuras, evaluando la forma en que los elementos se comportan a estos esfuerzos mediante un AET, se puede determinar la calidad de una unión soldada.

7.6 CARACTERIZACIÓN DEL TIPO DE FALLA

Un estudio detallado de las características o parámetros que identifican una emisión acústica o hit al momento de evaluar una falla, podría determinar las diferencias entre una corrosión, una fisura, erosión, stress térmico entre otros estados en los que podría hallarse los elementos de una maquina o estructura y de esta manera generar un plan de acción para interactuar con las circunstancias.

Figura 171. Diferentes tipos de corrosión



Fuente: <http://www.monografias.com>

7.7. ENSAYOS A TRACCIÓN Y COMPRESIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN

La determinación de la resistencia y la dureza entre otras propiedades evaluadas en los ensayos sobre probetas de hormigón ayudan a crear mejores mezclas, mejores materiales para las aplicaciones necesarias en la actualidad, las emisiones acústicas generadas en el momento en que el material está llegando al punto de fluencia y el estudio de los parámetros de la emisión dan idea del comportamiento de la estructura cristalina lo que puede ayudar en las investigaciones sobre hormigón.

Figura 172. Ensayo a tensión de probetas de hormigón



Fuente: <http://materialesaljadaajp.blogia.com/>

7.8. INSPECCIÓN DE PUENTES

La tecnología de detección de fallas mediante el censado de emisiones acústicas ya es usada en la inspección de grandes puentes alrededor de todo el mundo, PAC ya es una entidad que presta los servicios en este tema pero en Colombia aún no se desarrollan estos métodos de inspección lo que queda como una oportunidad no solo por el monitoreo de estructuras como los puentes sino

también en la inspección de diques, represas, elementos de máquinas entre otros. Del desarrollo de la tecnología saldrán sus aplicaciones.

Figura 173. Inspección de puentes



Fuente: Proceso de la emisión acústica. Web.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda la adquisición de un nodo AE, para realizar la localización lineal de las fallas, o dos para la localización planar, y ampliar la licencia del software para habilitar opciones que se implementan en la ubicación de defectos en recipientes.
- ✓ Crear escenarios de experimentación que permitan determinar parámetros que caractericen el tipo de falla que afecta el material, tales como corrosión (galvánica, picadura, intergranular), grietas (apertura y propagación), imperfecciones de fabricación, inclusiones en soldaduras o materiales base.
- ✓ se recomienda realizar la misma inspección usando una bomba hidráulica de flujo continuo y analizar el comportamiento de la actividad AE, variando las ratas de presurización.

BIBLIOGRAFIA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors. E650. Pennsylvania: ASTM, 2007. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Examination of Seamless, Gas-Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission. E1419. Pennsylvania: ASTM, 2009. 7 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Terminology for Nondestructive Examinations. E1316. 3 ed. Pennsylvania: ASTM, 2011. p.3-7.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and pressure vessel code: Section V, Article 12: Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing. New York: ASME, 2010. p.214-228.

ASOCIACION MERCOSUR DE NORMALIZACION. Ensayos no destructivos: Ensayos de cilindros de acero sin costura por emisión acústica. NM 304. Argentina: CSM 24, 2005. 14p. .

GELVEZ DIAZ, Diego Roberto y MARTELO PARADA, Jhony Alexander. Banco de pruebas para el análisis de la cavitación en una bomba centrífuga mediante el análisis de emisiones acústicas. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2010. p.60-71.

HELLIER, Charles. Chapter 10: Acoustic Emission Testing. En: Handbook of Nondestructive Evaluation. New York: McGraw-Hill, 2001. p. 1-38.

JUÁREZ, Ricardo E. y ORTEGA, Carlos M. Análisis del informe de resultados de ensayo de Emisión Acústica en base a lo establecido en el código ASME Boilers and Pressure

Vessels Code (BPVC) Sección V Artículo 12 2007. En: Congreso Regional de Ende (7: 11-13, Noviembre, 2009: Rosario, Argentina). Memorias. Rosario: AANDE, 2009. 9 p.

LAPITZ, Patricia A. Aplicación de la Técnica de Emisión Acústica al Estudio de Corrosión Bajo Tensión. Trabajo de grado Doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales. Buenos Aires: Instituto de Tecnología Jorge Sabato, 2005. 12p.

LARA MAGALLANEZ, Juan A. y SÁNCHEZ, Martín. Emisión Acústica: Método de Inspección No Destructivo Para La Evaluación De Componentes Soldados [online]. Saltillo: COMIMSA, 2001 [ca] [citado 25 Noviembre 2011]. Disponible de internet: <http://pndmx.comze.com/articulos/AE_soldadura_2001.pdf>

MURAVIN, Boris. Acoustic Emission Method: History, Fundamentals, Applications [online]. San Francisco: Muravin, 2011 [citado 20 Enero 2012]. Disponible en internet: <<http://www.muravin.com/>>.

MURAVIN, Boris; MURAVIN, Gregory y LEZVINSKY, Ludmila. The Fundamentals of Structural Health Monitoring by the Acoustic Emission Method. En: International Acoustic Emission Symposium (20: 17-19, Noviembre, 2010: Kumamoto, Japón). Memorias. Netanya: Margan Physical Diagnostics Lt., 2010. p. 253-258.

PEDRAZA RAMIREZ, Camilo Andrés y USGAME SANDOVAL, Héctor Mauricio. Detección de Fallas Tempranas en Rodamientos Cónicos Usando Acoustic Emissions (AE). Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2011. p.34-61.

VALLEN SYSTEME GMBH. AE Testing: Fundamentals, Equipment, Data Analysis [online]. Munich: Vallen Systeme, 2010 [ca] [citado 16 Octubre 2011]. Disponible de internet: <<http://www.vallen.de/zdownload/pdf/sea204E.pdf>>

ARTICLE 12

ACOUSTIC EMISSION EXAMINATION OF METALLIC VESSELS DURING PRESSURE TESTING

T-1210 SCOPE

This Article describes methods for conducting acoustic emission (AE) examination of metallic pressure vessels during acceptance pressure testing when specified by a referencing Code Section. When AE examination in accordance with this Article is specified, the referencing Code Section shall be consulted for the following specific requirements:

- (a) personnel qualification/certification requirements
- (b) requirements/extent of examination and/or volume(s) to be examined
- (c) acceptance/evaluation criteria
- (d) standard report requirements
- (e) content of records and record retention

When this Article is specified by a referencing Code Section, the AE method described in the Article shall be used together with Article 1, General Requirements. Definitions of terms used in this Article may be found in Mandatory Appendix III of this Article.

T-1220 GENERAL

-) **T-1220.1** The principal objectives of AE examination are to detect, locate, and assess emission sources caused by surface and internal discontinuities in the vessel wall, welds, and fabricated parts and components.

T-1220.2 All relevant indications caused by AE sources shall be evaluated by other methods of nondestructive examination.

-) **T-1221 Vessel Stressing**

Arrangements shall be made to stress the vessel using internal pressure as specified by the referencing Code Section. The rate of application of pressure shall be specified in the examination procedure and the pressurizing rate shall be sufficient to expedite the examination with minimum extraneous noise. Provisions shall be made for holding the pressure at designated hold points.

For in-service vessels, the vessel pressure history shall be known prior to the test.

T-1222 Noise Reduction

External noise sources such as rain, foreign objects contacting the vessel, and pressurizing equipment noise must be below the system examination threshold.

T-1223 Sensors

T-1223.1 Sensor Frequency. Selection of sensor frequency shall be based on consideration of background noise, acoustic attenuation, and vessel configuration. Frequencies in the range of 100 kHz–400 kHz have been shown to be effective. (See Nonmandatory Appendix B.)

T-1223.2 Sensor Mounting. The location and spacing of the sensors are referenced in T-1243. The sensors shall be acoustically coupled using couplant specified in the written procedure. Suitable couplants include adhesive systems whose bonding and acoustic coupling effectiveness have been demonstrated.

When examining austenitic stainless steels, titanium, or nickel alloys, the need to restrict chloride/fluoride ion content, total chlorine/fluorine content, and sulfur content in the couplant or other materials used on the vessel surface shall be considered and limits agreed upon between contracting parties.

The sensor shall be held in place utilizing methods of attachment, as specified in the written procedure.

The signal cable and preamplifier shall be supported such that the sensor does not move during testing.

T-1223.3 Surface Contact. Sensors shall be mounted directly on the vessel surface, or on integral waveguides.

T-1224 Location of Acoustic Emission Sources

T-1224.1 Sources shall be located to the specified accuracy by multichannel source location, zone location, or both, as required by the referencing Code Section. All hits detected by the instrument shall be recorded and used for evaluation.

T-1224.2 Multichannel source location accuracy shall be within a maximum of 2 component wall thicknesses or 5% of the sensor spacing distance, whichever is greater.

A drawing showing actual sensor locations with dimensions shall be provided and form part of the report.

T-1225 Procedure Requirements

Acoustic emission examination shall be performed in accordance with a written procedure. Each procedure shall include at least the following information, as applicable:

- (a) material and configurations to be examined, including dimensions and product form;
- (b) background noise measurements;
- (c) sensor type, frequency, and Manufacturer;
- (d) method of sensor attachment
- (e) couplant;
- (f) acoustic emission instrument type and filter frequency;
- (g) sensor locations;
- (h) method for selection of sensor locations;
- (i) description of system calibration(s);
- (j) data to be recorded and method of recording;
- (k) post-examination vessel cleaning;
- (l) report requirements; and
- (m) qualification/certification of the examiner(s).

T-1230 EQUIPMENT AND SUPPLIES

(a) The AE system consists of sensors, signal processing, display, and recording equipment (see Appendix I).

(b) Data measurement and recording instrumentation shall be capable of measuring the following parameters from each AE hit on each channel: counts above system examination threshold, peak amplitude, arrival time, rise time, duration, and Measured Area of the Rectified Signal Envelope (MARSE, which is a measure of signal strength or energy). Mixing or otherwise combining the acoustic emission signals of different sensors in a common preamplifier is not permitted except to overcome the effects of local shielding. (See Nonmandatory Appendix B.) The data acquisition system shall have sufficient channels to provide the sensor coverage defined in T-1243.4. Amplitude distribution, by channel, is required for source characterization. The instrumentation shall be capable of recording the measured acoustic emission data by hit and channel number. Waveform collection in support of source location and characterization may also be required.

(c) Time and pressure shall be measured and recorded as part of the AE data. The pressure shall be continuously monitored to an accuracy of $\pm 2\%$ of the maximum test pressure.

(1) Analog type indicating pressure gages used in testing shall be graduated over a range not less than $1\frac{1}{2}$ times nor more than 4 times the test pressure.

(2) Digital type pressure gages may be used without range restriction provided the combined error due to calibration and readability does not exceed 1% of the test pressure.

T-1240 APPLICATION REQUIREMENTS

T-1241 Equipment

(See T-1230 and Mandatory Appendix I.)

T-1242 System Calibration

(See Mandatory Appendix II.)

T-1243 Pre-Examination Measurements

T-1243.1 On-Site System Calibration. Prior to each vessel test or series of tests, the performance of each utilized channel of the AE instrument shall be checked by inserting a simulated AE signal at each main amplifier input.

A series of tests is that group of tests using the same examination system which is conducted at the same site within a period not exceeding 8 hr or the test duration, whichever is greater.

This device shall input a sinusoidal burst-type signal of measurable amplitude, duration, and carrier frequency. As a minimum, on-site system calibration shall be able to verify system operation for threshold, counts, duration, rise time, MARSE (signal strength or energy), and peak amplitude. Calibration values shall be within the range of values specified in Appendix I.

T-1243.2 Attenuation Characterization. An attenuation study is performed in order to determine sensor spacing. This study is performed with the test fluid in the vessel using a simulated AE source. For production line testing of identical vessels see Nonmandatory Appendix B.

The typical signal propagation losses shall be determined according to the following procedure: select a representative region of the vessel away from manways, nozzles, etc., mount a sensor, and strike a line out from the sensor at a distance of 10 ft (3 m) if possible. Break 0.3 mm (2H) leads next to the sensor and then again at 1 ft (0.3 m) intervals along this line. The breaks shall be done with the lead at an angle of approximately 30 deg to the surface and with a 0.1 in. (2.5 mm) lead extension.

T-1243.3 Sensor Location. Sensor locations on the vessel shall be determined by the vessel configuration and the maximum sensor spacing (see T-1243.4). A further consideration in locating sensors is the need to detect structural flaws at critical sections, e.g., welds, high stress areas, geometric discontinuities, nozzles, manways, repaired regions, support rings, and visible flaws. Additional consideration should be given to the possible attenuation effects of welds. See Nonmandatory Appendix B. Sensor location guidelines for zone location for typical vessel types are given in Nonmandatory Appendix A.

T-1243.4 Sensor Spacing

T-1243.4.1 Sensor Spacing for Zone Location. Sensors shall be located such that a lead break at any

location in the examination area is detected by at least one sensor and have a measured amplitude not less than as specified by the referencing Code Section. The maximum sensor spacing shall be no greater than $1\frac{1}{2}$ times the threshold distance. The threshold distance is defined as the distance from a sensor at which a pencil-lead break on the vessel has a measured amplitude value equal to the evaluation threshold.

T-1243.4.2 Sensor Spacing for Multichannel Source Location Algorithms. Sensors shall be located such that a lead break at any location in the examination area is detected by at least the minimum number of sensors required for the algorithms.

T-1243.5 Systems Performance Check. A verification of sensor coupling and circuit continuity shall be performed following sensor mounting and system hookup and again immediately following the test. The peak amplitude response of each sensor to a repeatable simulated acoustic emission source at a specific distance from each sensor should be taken prior to and after the test. The measured peak amplitude should not vary more than 4 dB from the average of all the sensors. Any channel failing this check should be investigated and replaced or repaired as necessary. If during any check it is determined that the testing equipment is not functioning properly, all of the product that has been tested since the last valid system performance check shall be reexamined.

Sensor performance and response may also be checked using electronic automatic sensor calibration programs if the system being used is able to also check sensor coupling and permanently record the results. This shall be done at the start of the test and at the completion of the test.

T-1244 Examination Procedure

T-1244.1 General Guidelines. The vessel is subjected to programmed increasing stress levels to a predetermined maximum while being monitored by sensors that detect acoustic emission caused by growing structural discontinuities.

If the vessel has been in service, maximum stress levels shall exceed the previous highest stress level the vessel has seen by a minimum of 5% but shall not exceed the vessel's maximum design pressure.

T-1244.2 Background Noise. Extraneous noise must be identified, minimized, and recorded.

T-1244.2.1 Background Noise Check Prior to Loading. Acoustic emission monitoring of the vessel during intended examination conditions is required to identify and determine the level of spurious signals following the completion of the system performance check and prior to stressing the vessel. A recommended monitoring period is

15 min. If background noise is above the evaluation threshold, the source of the noise shall be eliminated or the examination terminated.

T-1244.2.2 Background Noise During Examination. In the AE examiner's analysis of examination results, background noise shall be noted and its effects on test results evaluated. Sources of background noise include:

- (1) liquid splashing into a vessel;
- (2) a pressurizing rate that is too high;
- (3) pumps, motors, and other mechanical devices;
- (4) electromagnetic interference; and
- (5) environment (rain, wind, etc.).

Leaks from the vessel such as valves, flanges, and safety relief devices can mask AE signals from the structure. Leaks must be eliminated prior to continuing the examination.

T-1244.3 Vessel Pressurization

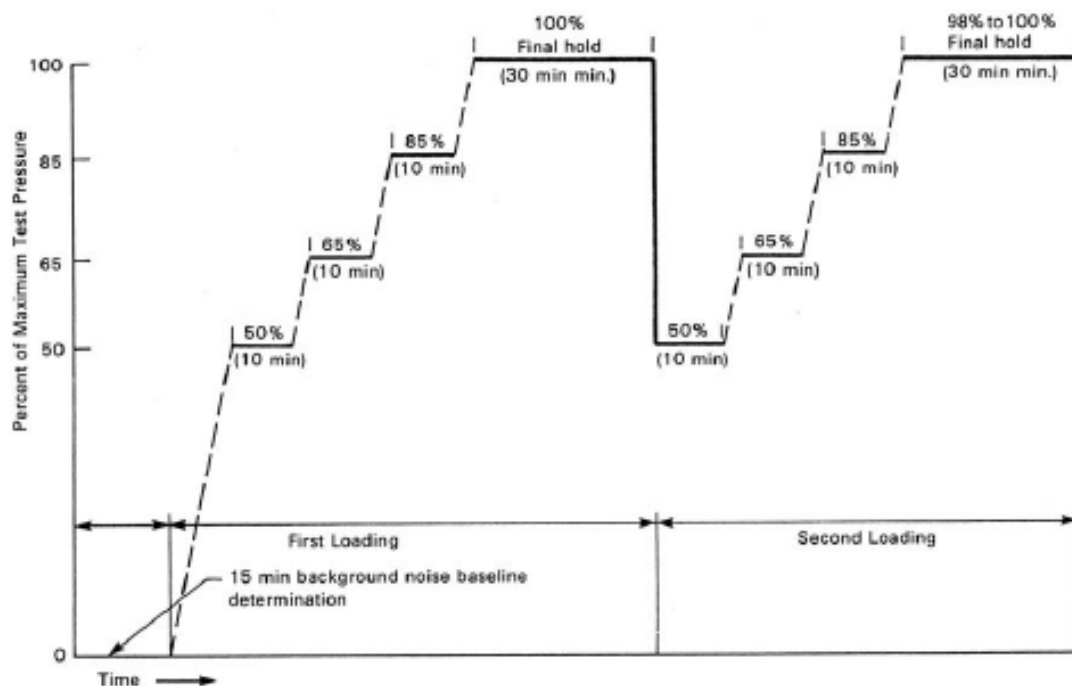
T-1244.3.1 Rates of pressurization, pressurizing medium, and safety release devices shall be as specified by the referencing Code Section. The pressurization should be done at a rate that will expedite the test with a minimum of extraneous noise.

T-1244.3.2 Pressurization Sequence

T-1244.3.2.1 Pressurization Sequence for New Vessels. The examination shall be done in accordance with the referencing Code Section. Pressure increments shall generally be to 50%, 65%, 85%, and 100% of maximum test pressure. Hold periods for each increment shall be 10 min and for the final hold period shall be at least 30 min. (see Fig. T-1244.3.2.) Normally, the pressure test will cause local yielding in regions of high secondary stress. Such local yielding is accompanied by acoustic emission which does not necessarily indicate discontinuities. Because of this, only large amplitude hits and hold period data are considered during the first loading of vessels without post-weld heat treatment (stress relief). If the first loading data indicates a possible discontinuity or is inconclusive, the vessel shall be repressurized from 50% to at least 98% of the test pressure with intermediate load holds at 50%, 65%, and 85%. Hold periods for the second pressurization shall be the same as for the original pressurization.

T-1244.3.2.2 Pressurization Sequence for In-Service Vessels. The examination shall be done in accordance with the referencing Code Section. Load (where load is the combined effect of pressure and temperature) increments shall generally be to 90%, 100%, 105%, and (if possible) 110% of the maximum operating load. Hold periods for each increment shall be 10 min and for the final hold period shall be at least 30 min. (See Fig. T-1244.3.3.) The maximum test load shall not be less than 105% of the maximum operating value during the past 6 months of operation or since the last test, whichever

FIG. T-1244.3.2 AN EXAMPLE OF PRESSURE VESSEL TEST STRESSING SEQUENCE



GENERAL NOTE:
During loading, increases in pressure/load levels should not exceed 10% of the maximum test pressure in 2 min.

is less. Loading rates shall not exceed 10% of the maximum test load over 2 min.

T-1244.3.3 Test Termination. Departure from a linear count or MARSE vs. load relationship should signal caution. If the AE count or MARSE rate increases rapidly with load, the vessel shall be unloaded and either the test terminated or the source of the emission determined and the safety of continued testing evaluated. A rapidly (exponentially) increasing count or MARSE rate may indicate uncontrolled, continuing damage indicative of impending failure.

T-1260 CALIBRATION

(See Mandatory Appendix II.)

T-1280 EVALUATION

T-1281 Evaluation Criteria

The AE criteria shown in Table T-1281 are set forth as one basis for assessing the significance of AE indications. These criteria are based on a specific set of AE monitoring

conditions. The criteria to be used shall be as specified in the referencing Code Section.

T-1290 DOCUMENTATION

T-1291 Written Report

The report shall include the following:

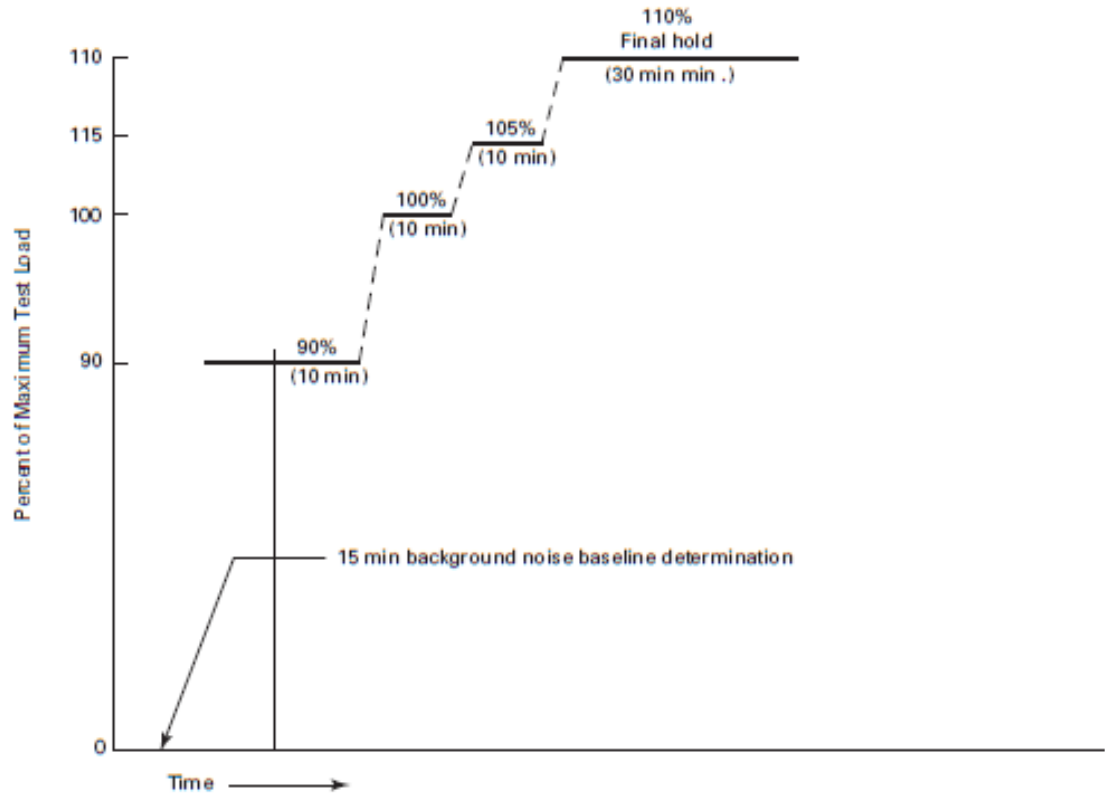
- (a) complete identification of the vessel, including material type, method of fabrication, Manufacturer's name, and certificate number;
- (b) vessel sketch of Manufacturer's drawing with dimensions and sensor locations;
- (c) test medium employed;
- (d) test medium temperature;
- (e) test sequence load rate, hold times, and hold levels;
- (f) attenuation characterization and results;
- (g) record of system performance verifications;
- (h) correlation of test data with the acceptance criteria;
- (i) a sketch or Manufacturer's drawings showing the location of any zone not meeting the evaluation criteria;
- (j) any unusual effects or observations during or prior to the test;
- (k) date(s) of test(s);

TABLE T-1.281
AN EXAMPLE OF EVALUATION CRITERIA FOR ZONE LOCATION

	Emission During Load Hold	Count Rate	Number of Hits	Large Amplitude Hits	MARSE or Amplitude	Activity	Evaluation Threshold dB
(First Loading) Pressure vessels without full postweld heat treatment	Not more than E_H hits beyond time T_H	Not applied	Not applied	Not more than E_A hits above a specified amplitude	MARSE or amplitudes do not increase with increasing load.	Activity does not increase with increasing load.	V_{TW}
Pressure vessels other than those covered above	Not more than E_H hits beyond time T_H	Less than M_T counts per sensor for a specified load increase	Not more than E_T hits above a specified amplitude	Not more than E_A hits above a specified amplitude	MARSE or amplitudes do not increase with increasing load.	Activity does not increase with increasing load.	V_{TW}

GENERAL NOTES:
 (a) E_H , M_T , E_T , and E_A are specified acceptance criteria values specified by the referencing Code Section.
 (b) V_{TW} is the specified evaluation threshold.
 (c) T_H is the specified hold time.

FIG. T-1244.3.3 AN EXAMPLE OF IN-SERVICE, PRESSURE VESSEL, TEST LOADING SEQUENCE



(l) name(s) and qualifications of the test operator(s); and
 (m) complete description of AE instrumentation including Manufacturer's name, model number, sensor type, instrument settings, calibration data, etc.

(2) total counts or MARSE (signal strength or energy) vs time and/or pressure, and
 (3) written reports

(b) The AE data shall be maintained with the records of the vessel.

T-1292 Record

(a) A permanent record AE data includes

(1) AE hits above threshold vs time and/or pressure for zones of interest

ARTICLE 12

MANDATORY APPENDICES

APPENDIX I — INSTRUMENTATION PERFORMANCE REQUIREMENTS

I-1210 ACOUSTIC EMISSION SENSORS

I-1210.1 General. Acoustic emission sensors in the range of 100 kHz–400 kHz shall be temperature-stable over the range of intended use, and shall not exhibit sensitivity changes greater than 3 dB over this range as guaranteed by the Manufacturer. Sensors shall be shielded against radio frequency and electromagnetic noise interference through proper shielding practice and/or differential (anticoincident) element design. Sensors shall have a frequency response with variations not exceeding 4 dB from the peak response.

I-1210.2 Sensor Characteristics. Sensors shall have a resonant response between 100 kHz–400 kHz. Minimum sensitivity shall be –80 dB referred to 1 volt/microbar, determined by face-to-face ultrasonic test.

NOTE: This method measures relative sensitivity of the sensor. Acoustic emission sensors used in the same test should not vary in peak sensitivity more than 3 dB from the average.

I-1220 SIGNAL CABLE

The signal cable from sensor to preamplifier shall not exceed 6 ft (1.8 m) in length and shall be shielded against electromagnetic interference.

I-1230 COUPLANT

Couplant selection shall provide consistent coupling efficiency during a test. Consideration should be given to testing time and the surface temperature of the vessel. The couplant and method of sensor attachment shall be specified in the written procedure.

I-1240 PREAMPLIFIER

The preamplifier shall be mounted in the vicinity of the sensor, or in the sensor housing. If the preamplifier is of differential design, a minimum of 40 dB of common-mode

noise rejection shall be provided. Frequency response shall not vary more than 3 dB over the operating frequency and temperature range of the sensors.

I-1250 FILTER

Filters shall be of the band pass or high pass type and shall provide a minimum of 24 dB/octave signal attenuation. Filters shall be located in preamplifier. Additional filters shall be incorporated into the processor. Filters shall insure that the principal processing frequency corresponds to the specified sensor frequency.

I-1260 POWER-SIGNAL CABLE

The cable providing power to the preamplifier and conducting the amplified signal to the main processor shall be shielded against electromagnetic noise. Signal loss shall be less than 1 dB per 100 ft (30 m) of cable length. The recommended maximum cable length is 500 ft (150 m) to avoid excessive signal attenuation.

I-1270 POWER SUPPLY

A stable grounded electrical power supply, meeting the specifications of the instrumentation, shall be used.

I-1280 MAIN AMPLIFIER

The gain in the main amplifier shall be linear within 3 dB over the temperature range of 40°F–125°F (5°C–50°C).

I-1290 MAIN PROCESSOR

I-1291 General

The main processor(s) shall have processing circuits through which sensor data will be processed. It shall be capable of processing hits, counts, peak amplitudes, duration, rise time, waveforms, and MARSE (signal strength or energy) on each channel.

(a) *Threshold.* The AE instrument used for examination shall have a threshold control accurate to within ± 1 dB over its useful range.

(b) *Counts.* The AE counter circuit used for examination shall detect counts over a set threshold within an accuracy of $\pm 5\%$.

(c) *Hits.* The AE instrument used for examination shall be capable of measuring, recording, and displaying a minimum of 40 hits/sec total for all channels for a minimum period of 10 sec and continuously measuring, recording, and displaying a minimum of 40 hits/sec total for all channels. The system shall display a warning if there is greater than a 5 sec lag between recording and display during high data rates.

(d) *Peak Amplitude.* The AE circuit used for examination shall measure the peak amplitude with an accuracy of ± 2 dB.

(e) *Energy.* The AE circuit used for examination shall measure MARSE (signal strength or energy) with an accuracy of $\pm 5\%$. The usable dynamic range for energy shall be a minimum of 40 dB.

(f) *Parametric Voltage.* If parametric voltage is measured by the AE instrument, it should measure to an accuracy of 2% of full scale.

I-1292 Peak Amplitude Detection

Comparative calibration must be established per the requirements of Appendix II. Usable dynamic range shall be a minimum of 60 dB with 1 dB resolution over the frequency band width of 100 kHz to 400 kHz, and the temperature range of 40°F–125°F (5°C–50°C). Not more than 2 dB variation in peak detection accuracy shall be allowed over the stated temperature range. Amplitude values shall be stated in dB, and must be referenced to a fixed gain output of the system (sensor or preamplifier).

APPENDIX II — INSTRUMENT CALIBRATION AND CROSS-REFERENCING

II-1210 MANUFACTURER'S CALIBRATION

Acoustic emission system components will be provided from the Manufacturer with certification of performance specifications and tolerances.

II-1211 Annual Calibration

The instrument shall have an annual comprehensive calibration following the guidelines provided by the Manufacturer using calibration instrumentation meeting the requirements of a recognized national standard.

II-1220 INSTRUMENT CROSS-REFERENCING

The performance and threshold definitions vary for different types of AE instrumentation. Parameters such as counts, amplitude, energy, etc., vary from Manufacturer to Manufacturer and from model to model by the same Manufacturer. This section of appendix describes techniques for generating common baseline levels for the different types of instrumentation.

The procedures are intended for baseline instrument calibration at 60°F to 80°F (16°C to 27°C). For field use, small portable signal generators and calibration transducers can be carried with the equipment and used for periodic checking of sensor, preamplifier, and channel sensitivity.

II-1221 Sensor Characterization

Threshold of acoustic emission detectability is an amplitude value. All sensors shall be furnished with documented performance data. Such data shall be traceable to NBS standards. A technique for measuring threshold of detectability is described in Article XI, Appendix II.

APPENDIX III — GLOSSARY OF TERMS FOR ACOUSTIC EMISSION EXAMINATION OF METAL PRESSURE VESSELS

III-1210 SCOPE

This Mandatory Appendix is used for the purpose of establishing standard terms and definitions of terms relating to metal pressure vessel examination with acoustic emission.

III-1220 GENERAL REQUIREMENTS

(a) The Standard Terminology for Nondestructive Examinations (ASTM E 1316) has been adopted by the Committee as SE-1316.

(b) SE-1316 defines the terms that are used in conjunction with this Article.

(c) For general terms, such as *Interpretation*, *Flaw*, *Discontinuity*, *Evaluation*, etc., refer to Article I, Mandatory Appendix I.

(d) In addition to those terms listed in SE-1316, the terms listed in III-1230 are also applicable.

III-1230 REQUIREMENTS

The following Code terms are used in conjunction with this Article:

dB scale: a relative logarithmic scale of signal amplitude defined by $\text{dB } V = 20 \log V^0/V^{\text{ref}}$. The reference voltage is defined as 1 volt out of the sensor and V is measured amplitude in volts.

electronic waveform generator: a device which can repeatedly induce a transient signal into an acoustic emission processor for the purpose of checking, verifying, and calibrating the instrument.

measured area of the rectified signal envelope: a measurement of the area under the envelope of the rectified linear voltage time signal from the sensor.

multi-channel source location: a source location technique which relies on stress waves from a single source

producing hits at more than one sensor. Position of the source is determined by mathematical algorithms using difference in time of arrival.

simulated AE source: a device which can repeatedly induce a transient elastic stress wave into the structure.

threshold of detectability: a peak amplitude measurement used for cross calibration of instrumentation from different vendors.

zone: the area surrounding a sensor from which AE sources can be detected.

zone location: a method of locating the approximate source of emission.

Anexo B. Certificados de calidad de los componentes del sistema mecánico.

7093-50200



DESCRIPTION	ATTRIBUTE VALUE
PRODUCT TYPE	INDUSTRIAL HOSE AIR & WATER
APPLICATION	Air, Water & Multi-Purpose
INSIDE DIAMETER	1/2 in. (12.7 mm)
REINFORCEMENT BRAIDS	2
OUTSIDE DIAMETER	0.813 in. (20.7 mm)
WEIGHT	21 lb. per 100 ft.
MINIMUM BEND RADIUS	4.5
MAX RECOMMENDED WORKING PRESSURE	200
MAX STEAM WORKING PRESSURE	
LENGTH	Exact length reels (+50 ft./-0 ft.), 90% 1 pc., 10% 2 pc. - 50 ft. min. length. 50 ft. cut lengths are coiled and tied in pallet boxes.
TUBE CORE MATERIAL	EPDM - Black
COVER MATERIAL	EPDM - Black
COVER COLOR	Black
REINFORCEMENT	Multiple textile spirals
TEMPERATURE RANGE	-40° F to +212°F
TRADE/BRAND NAME	GST II
BRANDING	Yes
BRAND DESCRIPTION	Ink Brand - White letter color
PRESSURE RATING	
VACUUM RATING	
SAFETY FACTOR	4:1
INDUSTRY SPECIFICATION	RMA class C medium oil resistance requirements (exceeds).
FITTING STYLE	
COUPLED ASSEMBLIES	
PACKAGING	
UNSPSC	
ADDITIONAL DETAIL	
SYNONYM	

© Parker Hannifin Corp 2012 [Privacy Policies](#) [Safety](#) [ParkerStore™](#) [Site Map](#)

Fuente: <http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem>.

8T7AA
FLEXOR 1SN - R1AT HF
EN 853 1SN - SAE 100 R1AT



- Tube :** OIL RESISTANT SYNTHETIC RUBBER
Reinforcement : ONE HIGH TENSILE STEEL BRAID (1B)
Cover : ABRASION, OZONE AND HYDROCARBON RESISTANT SYNTHETIC RUBBER
Application : HIGH PRESSURE HYDRAULIC LINES, FUEL OIL, ANTIFREEZE SOLUTIONS, AIR AND WATER.
Constant operation : -40°C +100°C (T max air = +70°C)
Ambient temperature : -40°C +80°C
Fittings : Consult fittings catalogue
Length : Random up to 1" - 40 m max over 1"
Branding : ALFAGOMMA FLEXOR 1AT/1SN ID... - WP ... MPa (... PSI) - SAE 100 R1AT - EN 853 1SN - DN ... - Q/yr
Note : MSHA cover available: Code 836AA

S.F.: 4:1

Code	ID mm	ID in	Dash	OD mm	OD in	WP Mpa	WP psi	BP Mpa	BP psi	BR mm	BR in	Weight kg/m	Weight lb/C ft
8T7AA00500ISB8	5	3/16	-3	11,6	0,46	25	3630	100	14520	90	3,6	0,18	12
8T7AA00600ISB8	6	1/4	-4	13,2	0,52	22,5	3270	90	13080	100	4	0,22	15
8T7AA00800ISB8	8	5/16	-5	14,7	0,58	21,5	3120	86	12480	115	4,6	0,26	17
8T7AA01000ISB8	10	3/8	-6	17,1	0,67	18	2610	72	10460	130	5,2	0,33	22
8T7AA01200ISB8	13	1/2	-8	20,2	0,8	16	2320	64	9280	180	7,2	0,42	28
8T7AA01600ISB8	16	5/8	-10	23,2	0,91	13	1890	52	7560	200	8	0,51	34
8T7AA02000ISB8	19	3/4	-12	27,4	1,08	10,5	1530	42	6120	240	9,6	0,62	42
8T7AA02500ISB8	25	1	-16	35,4	1,39	8,8	1280	35	5120	300	12	0,92	62
8T7AA0324417B8	32	1.1/4	-20	42,8	1,69	6,3	920	25	3680	420	16,8	1,2	80
8T7AA0385117B8	38	1.1/2	-24	49,9	1,96	5	730	20	2920	500	20	1,48	99
8T7AA0516417B8	51	2	-32	63,2	2,49	4	580	16	2320	630	25,2	2	134
815AA063791RA8	64	2.1/2	-40	79	3,11	5	720	20	2880	760	30,4	2,89	194
815AA076921RA8	76	3	-48	92	3,62	3,5	500	14	2000	900	36	3,43	230

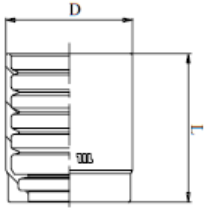
Fuente: <http://www.alfagomma.com/Catalogo.aspx>



MULTIFIT TYPE

WASH CLEANER HOSES

M03400



NO-SKIVE FERRULE FOR WIRE BRAID HOSES
 FERRUL SIN PELADO PARA MANGUERAS CON TRENZA DE ACERO

PART. REF.	HOSE BORE			DIMENSIONS mm					
	DN	inch	Size	D	L				
M03400-04	6	1/4"	-04	23,0	30,5				
M03400-05	8	5/16"	-05	24,0	30,0				
M03400-06	10	3/8"	-06	26,0	32,0				
M03400-08	12	1/2"	-08	29,0	34,0				

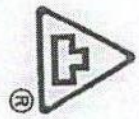
Fuente: <http://www.manuli-hydraulics.com/sap/its/eureka/AdvAcrobats/H02004.pdf>

MILL TEST & INSPECTION CERTIFICATE

ACCORDING TO EN 10204 : 2004 3.1

CUSTOMER :
 CERT. NO : 113854
 ORDER NO : 1249
 INVOICE NO : BR01110006190A

L/C NO :
 DATE : 11/03/2011
 PAGE : 4
 ORIGIN : TAIWAN



拾德鐵工股份有限公司
 高雄市仁武區基林里仁心路 303 號
BOH-WELL STEEL FITTINGS CO., LTD.
 NO.303, JEN-HSIN ROAD JEN-WU DISTRICT
 KAOSIUNG CITY, TAIWAN R.O.C. (81460)
 TEL: 886-7-371-0497, 371-1536, 372-0260
 web site: <http://www.bothwell.com.tw> e-mail: bothwell@bothwell.com.tw

An ISO 9001:2008 Registered Manufacturer

ITEM	HT. CD.	RAW MATERIAL	HEAT NO.	DESCRIPTION	QUANTITY	MATERIAL	FITTING	INSPECTION SURFACE	DIM.
128	3511	320984		45D ELBOW 1-1/2" 3000# NPT	51 PC	ASTM A105N -05	ASME B16.11 - 2009	GOOD	GOOD
130	3547	321652		HEX BUSHING 1/4"x1/8" 3000# NPT	300 PC	ASTM A105N -05			
131	3486	320065		HEX BUSHING 1/2"x1/4" 3000# NPT	200 PC	ASTM A105N -05			
133	3473	318291		HEX BUSHING 3/4"x1/2" 3000# NPT	2374 PC	ASTM A105N -05			
133	3531	320367		HEX BUSHING 3/4"x1/2" 3000# NPT	2340 PC	ASTM A105N -05			

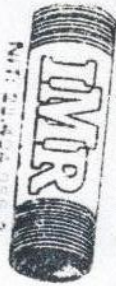
ITEM	HW	HT. CD.	CHEMICAL COMPOSITION (%)											N	Al	Ti	Zr	CE	
			C	Si	Mn	P	S	Ca	Cr	Ni	Mo	V	Co(Nb)						
Min			0.350	0.100	0.600	0.035	0.040	0.400	0.300	0.400	0.120	0.080	-	-	-	-	-	-	-
Max			0.350	0.350	1.050	0.035	0.040	0.400	0.300	0.400	0.120	0.080	-	-	-	-	-	-	-
128	3511		0.200	0.200	0.830	0.018	0.013	0.190	0.120	0.070	0.020	0.002	0.002	-	-	-	-	-	-
130	3547		0.200	0.210	0.850	0.018	0.013	0.130	0.060	0.070	0.020	0.002	0.002	-	-	-	-	-	-
131	3486		0.200	0.200	0.830	0.013	0.006	0.130	0.090	0.050	0.020	0.002	0.000	-	-	-	-	-	-
133	3473		0.190	0.180	0.830	0.021	0.018	0.150	0.100	0.060	0.010	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-
133	3531		0.200	0.230	0.820	0.014	0.011	0.180	0.090	0.080	0.020	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-

ITEM	HW	HT. CD.	MECHANICAL PROPERTIES				Charpy Impact			HEAT TREATMENT	ADDITIONAL TEST/REMARKS	
			T. S. (KSI)	Y. S. (KSI)	El. (%)	R of A (%)	Hardness (HB)(AVG)	F	I			0°C
Min			70.0	36.0	22.0	30.0	187	1	2	3	NORMALIZED	860°C A.C.
Max			70.0	36.0	22.0	30.0	187	1	2	3		
128	3511		75.7	50.1	34.6	66.4	141	142				
130	3547		75.5	51.3	33.6	64.5	144	143				
131	3486		76.4	48.4	35.4	63.6	141	141				
133	3473		77.6	42.6	33.0	65.0	143	143				
133	3531		76.1	47.2	31.0	68.0	141	142				

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED ABOVE HAS BEEN TESTED AND COMPLIES WITH THE TERMS OF THE ORDER CONTRACT.

C. C. Huang
 O. C. MANAGER
 CHEN CHI HUANG

Y. Y. Chang
 INSPECTOR
 YUAN YAO CHANG



BR-100839 REV. 1

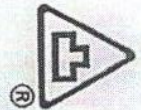
MILL TEST & INSPECTION CERTIFICATE

ACCORDING TO EN 10204 : 2004 3.1

CUSTOMER :
 CERT. NO. : 113854
 ORDER NO. : 1249
 INVOICE NO. : BR0110006190A

L/C NO. :
 DATE : 11/03/2011
 PAGE : 2 ORIGIN : TAIWAN

拾肆鐵工股份有限公司
 高雄赤仁武區高林里仁心路 303 號
BOTH-WELL STEEL FITTINGS CO., LTD.
 NO. 303, JEN-HSIN ROAD JEN-WU DISTRICT
 KAOSHUNG CITY, TAIWAN R.O.C. (81460)
 TEL: 886-7-371-0497, 371-1536, 372-0260
 FAX: 886-7-371-3864, 371-3882
 web site: <http://www.bothwell.com.tw> e-mail: bothwell@www.bothwell.com.tw



ITEM	HT. CD.	RAW MATERIAL HEAT NO.	DESCRIPTION	QUANTITY	MATERIAL SPECIFICATION FOR	FITTING	INSPECTION	
							SURFACE	DIM.
118	3489	320068	90D ELBOW 3/8" 3000# NPT	300 PC	ASTM A1029 - 05	ASME B16.11 - 2009	GOOD	GOOD
119	3178	308518	90D ELBOW 1/2" 3000# NPT	500 PC	ASME SA105N - A68			
120	3590	322766	90D ELBOW 3/4" 3000# NPT	500 PC				
122	3528	319757	90D ELBOW 2" 3000# NPT	300 PC				
123	3066	182330	90D ELBOW 3" 3000# NPT	60 PC				

ITEM	HT. CD.	CHEMICAL COMPOSITION (%)															
		C	Si	Mn	P	S	Ca	Cr	Ni	Mo	V	Cb(Nb)	N	Al	Ti	Zr	CE
118	3489	0.190	0.210	0.870	0.019	0.013	0.170	0.090	0.060	0.010	0.003	0.001	-	-	-	-	-
119	3178	0.200	0.190	0.820	0.017	0.013	0.150	0.130	0.070	0.020	0.002	0.001	-	-	-	-	-
120	3590	0.190	0.190	0.830	0.017	0.010	0.140	0.090	0.050	0.010	0.002	0.001	-	-	-	-	-
122	3528	0.200	0.200	0.850	0.019	0.010	0.210	0.090	0.070	0.010	0.002	0.001	-	-	-	-	-
123	3066	0.200	0.220	0.910	0.019	0.003	0.260	0.080	0.090	0.030	0.007	0.000	-	-	-	-	-

ITEM	HT. CD.	MECHANICAL PROPERTIES										HEAT TREATMENT	ADDITIONAL TEST / REMARKS
		T. S. (KSI)	Y. S. (KSI)	EL. (%)	R of A (%)	Hardness (HB)(AVG)	Charpy Impact (Joule)			BHN / AVG.			
118	3489	75.1	53.0	35.2	65.5	141	142	187	1	2	3	860°C A.C.	
119	3178	75.9	53.5	34.0	63.1	143	144						
120	3590	77.0	50.3	37.2	63.6	143	143						
122	3528	75.7	49.9	34.0	66.4	142	141						
123	3066	75.6	56.3	36.6	72.1	142	142						

WE HEREBY CERTIFY, THAT THE MATERIAL DESCRIBED ABOVE HAS BEEN TESTED AND COMPLIES WITH THE TERMS OF THE ORDER CONTRACT.

Q.C. MANAGER: *C.C. Huang*
 CHEN CHI HANG

INSPECTOR: *Y.Y. Chang*
 YUAN YAO CHANG



NO. T. 29.424.055-2

BW-100839 REV: 1

MILL TEST & INSPECTION CERTIFICATE

ACCORDING TO EN 10204 : 2004 3.1

CUSTOMER :
CERT. NO : 113616-2

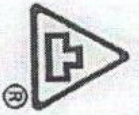
L/C NO :
DATE : 10/20/2011

ORDER NO : 1249

PAGE : 7 ORIGIN : TAIWAN

INVOICE NO : BW0110006190

Web site : <http://www.bothwell.com.tw> e-mail: bothwell@bothwell.com.tw or boothwell.com.tw



拾肆鐵工股份有限公司
高雄赤仁武區為林里仁心路 303 號
BOTH-WELL STEEL FITTINGS CO., LTD.
NO.303, JEN-HSIN ROAD, JEN-WU DISTRICT
KAOHSIUNG CITY, TAIWAN R.O.C. (81460)
TEL: 886-7-371-0497, 371-1536, 372-0260
FAX: 886-7-371-9864, 371-3882

An ISO 9001:2008 Registered Manufacturer
BUREAU VERITAS
Certification
ANAB
ASNT
SPECIALIST

ITEM	BW HT. CD.	RAW MATERIAL HEAT NO.	DESCRIPTION	QUANTITY	SPECIFICATION FOR MATERIAL	FITTING	INSPECTION SURFACE	INSPECTION DIM.
159	3587	322604	HEX PLUG 2" 3000# NPT	50 PC	ASTM A105N -05	ANSI B16.11 - 2009	GOOD	GOOD
162	3189	2C393	TEE 1/2" 3000# NPT	1000 PC	ASME SA105N -05			
165	3507	3209833	TEE 1-1/4" 3000# NPT	100 PC				
168	3545	320881	FLG CRG 1/2" 3000# NPT	1000 PC				
169	3556	321894	FLG CRG 3/4" 3000# NPT	1000 PC				

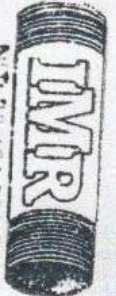
ITEM	BW HT. CD.	CHEMICAL COMPOSITION (%)											N	Al	Ti	Zr	CE	
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Cr(Nb)						
159	3587	0.350	0.100	0.600	0.035	0.040	0.400	0.300	0.400	0.120	0.080	-	-	-	-	-	-	-
162	3189	0.200	0.180	0.820	0.021	0.012	0.159	0.110	0.070	0.020	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-
165	3507	0.210	0.180	0.940	0.014	0.005	0.020	0.020	0.020	0.000	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-
168	3545	0.190	0.200	0.850	0.017	0.015	0.190	0.110	0.080	0.020	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-
169	3556	0.190	0.200	0.850	0.018	0.014	0.170	0.090	0.070	0.020	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-

ITEM	BW HT. CD.	MECHANICAL PROPERTIES					Charpy Impact			HEAT TREATMENT	ADDITIONAL TEST / REMARKS
		T. S. (KSI)	Y. S. (KSI)	EL. (%)	R of A (%)	Hardness (HRA)(AVG)	1	2	3		
159	3587	75.8	56.2	34.8	64.5	141	141	141	187	NORMALIZED 860°C A.C.	CONFORMS TO NACE MR0175-09 / MR0103-10 STEEL MAKING PROCESS : ELECTRIC FURNACE
162	3189	70.9	50.8	35.0	64.3	140	140	140			
165	3507	76.0	50.2	34.4	65.5	143	143	143			
168	3545	75.5	48.5	34.2	62.6	141	141	141			
169	3556	75.5	52.9	35.4	64.5	141	141	141			

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED ABOVE HAS BEEN TESTED AND COMPLIES WITH THE TERMS OF THE ORDER CONTRACT.

C.C. Huang
Q.C. MANAGER
GEN CHIH HUANG

Y.Y. Chang
INSPECTOR
YUAN YAO CHANG



NO. 7-29-404-056-2

BW-DO839 REV:1



无锡市华友特钢有限公司
Wuxi Huayou Special Steel Co., Ltd.
产品质量证明书
MILL TEST CERTIFICATE

证书号 (CERTIFICATE NO.)

13252102
Tel: 051083072086 Fax: 051083072086

订货单位 CUSTOMER		证书号 CERTIFICATE NO.	13252102	制造方法 MAKING METHOD	铸钢 CAST-STEEL
收货单位 RECEIVER		合同号 L/C NO.		交货状态 DELIVERY CONDITION	正火态 NORMALIZED
产品名称 PRODUCT	无锡钢管 COLD DRAWN SEAMLESS CARBON STEEL PIPE	合同号 CONTRACT NO.	1760	热处理工艺 HEAT TREATMENT	
规格 SPECIFICATION	ASTM A53/491 SL/A106	炉批号 GALVE	B	出票日期 DATE OF ISSUE	2012-05-21
外形 D.S.	21.3mm 1/2"	壁厚 W.T.	3.0mm	总重量 TOTAL WEIGHT (GMS)	2,000
		长度 LENGTH	6.0m	总件数 TOTAL PIECES (PCS)	415
		重量 WEIGHT	2000	总长度 TOTAL LENGTH (M)	2467

化学成分 (CHEMICAL COMPOSITION)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	TI	Bi	As	A	B	C	D
碳	0.20															
硅		0.10														
锰			0.30													
磷				0.009												
硫				0.008												
铬					0.005											
钼						0.004										
钒							0.003									
镍								0.001								

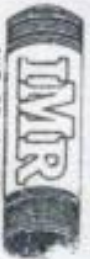
力学性能 (MECHANICAL PROPERTIES)

试验项目	试验方法	试验结果	试验温度
屈服强度 T.S.	MPa	415	20°C
抗拉强度 T.S.	MPa	570/295	20°C
伸长率 E.L.	%	30	20°C
断面收缩率 Z	%	40	20°C
冲击功 KCV	J	20	20°C
硬度 HB		115	

无损检测 (NON-DESTRUCTIVE TESTING)

检测项目	检测结果
超声波探伤 (ULTRASONIC TESTING)	合格 (PASS)
射线探伤 (RAY TESTING)	合格 (PASS)
磁粉探伤 (MAGNETIC PARTICLE TESTING)	合格 (PASS)
渗透探伤 (PENETRANT TESTING)	合格 (PASS)

注: 1. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。
2. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。
3. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。
4. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。
5. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。
6. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。
7. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。
8. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。
9. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。
10. 本证书 (CERTIFICATE) 分析 (ANALYSIS) 产品 (PRODUCT) 符合 (CONFORM) 下列 (THE FOLLOWING) 标准 (STANDARDS) 要求 (REQUIREMENTS)。



IMR



Inox-I-ek Ind. Co., Ltd.
P.O. BOX:35-27 TAICHUNG TAIWAN,R.O.C.
TEL : 886422336668 FAX : 8864-22312778



Certificate EN 10204-3.1

Kiant/customer:

Certificate number:IT-1118029

ORDER NO:3877

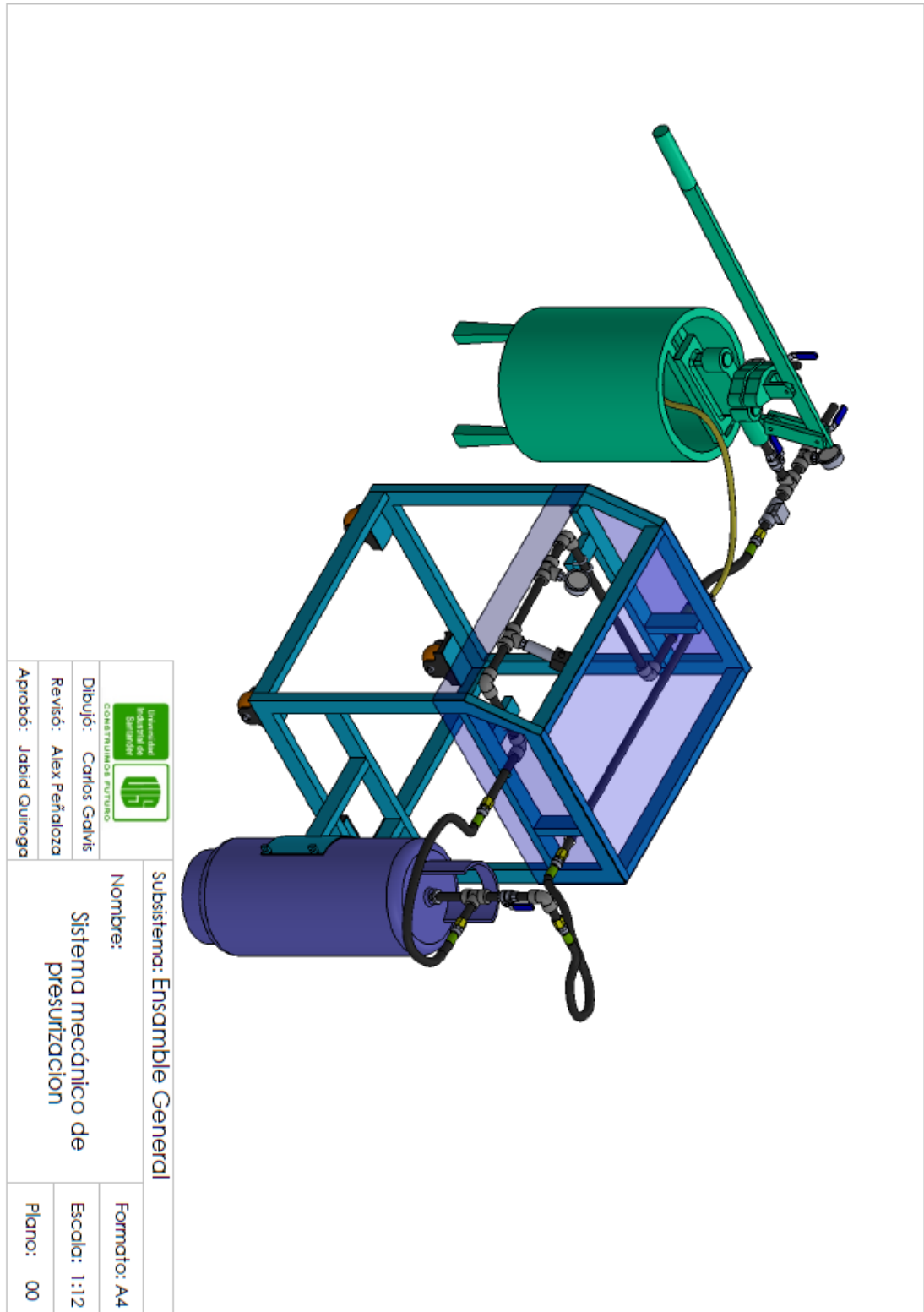
INVOICE NO:BI3877

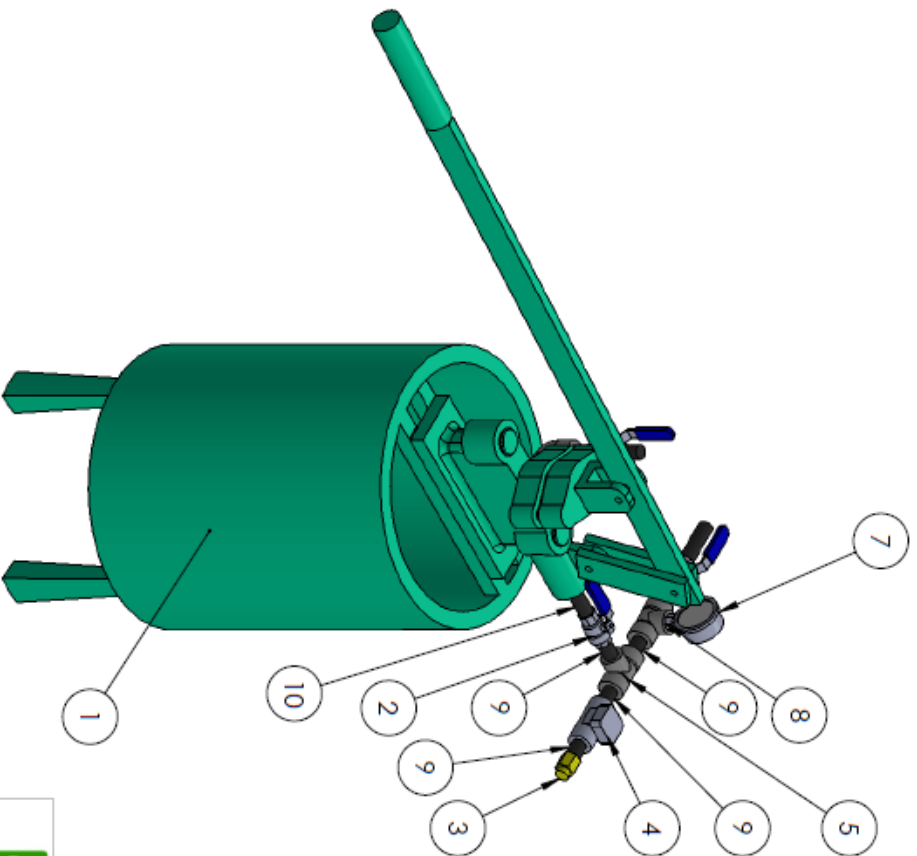
DATE:NOV.18,2009

Item	Qty	Description	Size	Rating	Conn.	Material body&cap	Mechanische eigenschappen/mechanical properties		
							Tensile strength (Mpa)	Yieldpoint (Mpa)	Elongation (%)
68	50	BODY&CAP(V2E)	1/2"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M	RM	Rp0.2	A
69	50	BODY&CAP(V2E)	1/2"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M	>=485	>=205	>=30
70	100	BODY&CAP(V2E)	1/2"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M	514	217	31.0
71	100	BODY&CAP(V2E)	1/2"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M	509	215	32.0
72	100	BODY&CAP(V2E)	1/2"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M	513	218	31.0
73	100	BODY&CAP(V2E)	1/2"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M	519	219	32.0
74	70	BODY&CAP(V2E)	1"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M			
75	70	BODY&CAP(V2E)	1"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M			
76	70	BODY&CAP(V2E)	1"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M			
77	70	BODY&CAP(V2E)	1"	1000 PSI	NPT END	ASTM-A351-CF8M			
Item	Part	Charge Nr.	Qty	Hydrostatic test	Mechanische eigenschappen/mechanical properties				
					Tensile strength (Mpa)	Yieldpoint (Mpa)	Elongation (%)		
68	BODY&CAP(V2E)	A15	50	1500 PSI	RM	Rp0.2	A		
69	BODY&CAP(V2E)	A11	50	1500 PSI	>=485	>=205	>=30		
70	BODY&CAP(V2E)	V33	100	1500 PSI	514	217	31.0		
71	BODY&CAP(V2E)	S11	100	1500 PSI	509	215	32.0		

Fuente: Base de datos ferreteria IMR


Anexo C. Planos de montaje del sistema mecánico de presurización.



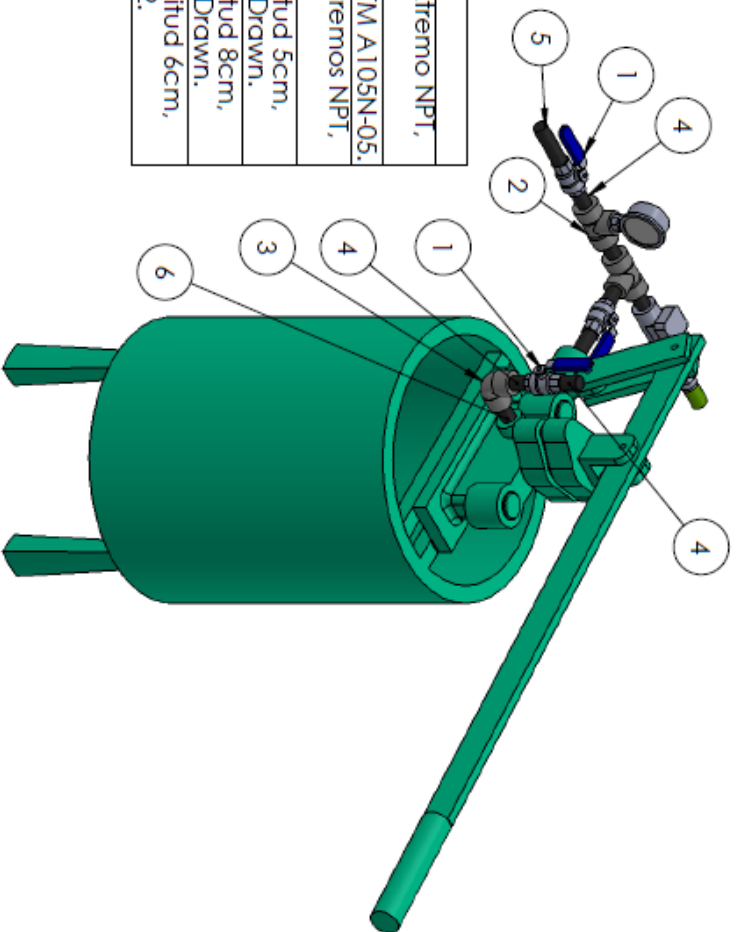




PIEZA	ESPECIFICACION
1	Bomba Hidraulica Manual para 1000 psi
2	Válvula Acero Inoxidable, 1/2"-1000psi, extremo NPT, ASTM-A351-CF8M
3	Adaptador 1/2" BSP macho a 1/2" BSP hembra
4	Valvula antiretorno.
5	Tee recta ϕ 1/2"-3000 Psi, extremos NPT, ASTM A105N-05.
7	Manómetro Andlogo x 1000Psi
8	Hex Bushing 1/2" x 1/4"-3000 psi-NPT.

COMPONENTES	Tuberias
ESPECIFICACION	Tubería ϕ 1/2", sin costura, sch 80, extremos NPT, según ASTM A53, Cold Drawn.
PIEZA	9
LONGITUD [cm]	8
	5

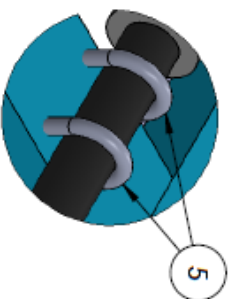
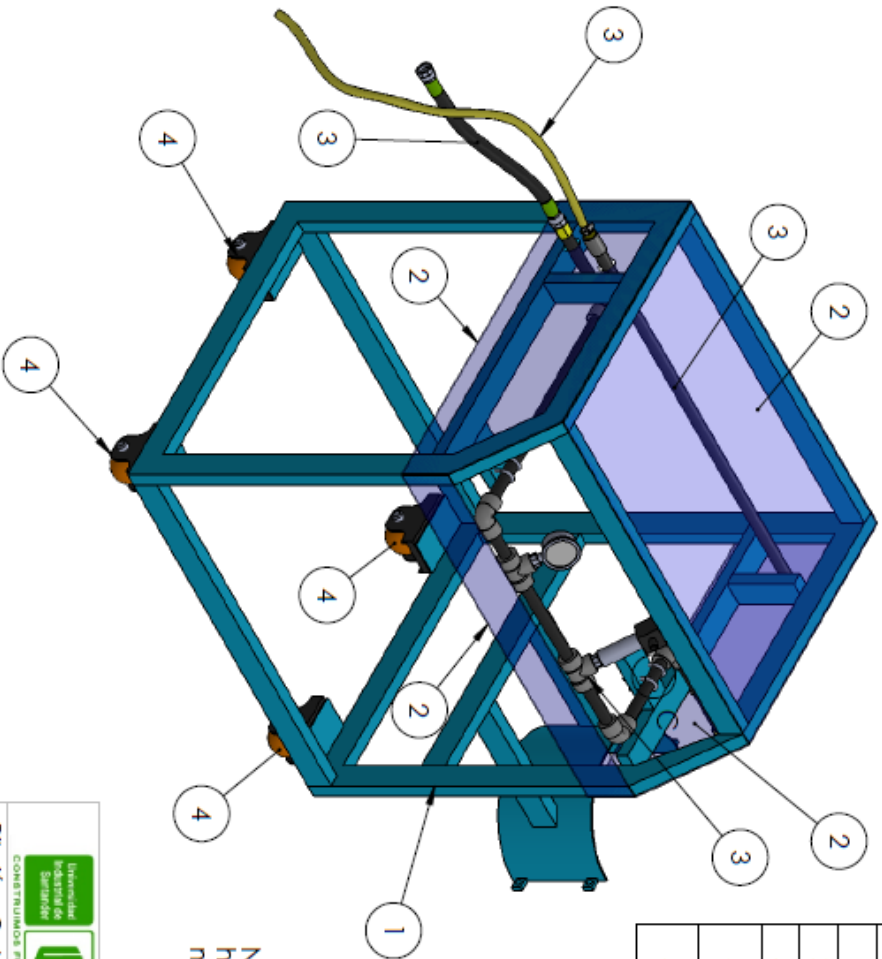
 Universidad Simón Bolívar CONSTRUYENDO FUTURO	Subsistema: Zona de Bombeo	
	Nombre:	Disposicion de los Componentes (1) de la Zona de Bombeo
Dibujó: Carlos Galvis	Formato: A4	
Revisó: Alex Peñaloza	Escala: 1:8	
Aprobó: Jaidi Quiroga	Plano: 01	

PIEZA	ESPECIFICACION
1	Válvula Acero Inoxidable, 1/2"-1000psi, extremo NPT, ASTM-A351-CF8M
2	Tee recta ϕ 1/2"-3000 Psi, extremos NPT, ASTM A105N-05.
3	Codo 90°- ϕ 1/2", radio corto, 3000 psi, extremos NPT, según ASTM A105N-05.
4	Tubería ϕ 1/2", sin costura, Sch 80, longitud 5cm, extremos NPT, según ASTM A53, Cold Drawn.
5	Tubería ϕ 1/2", sin costura, Sch 80, longitud 8cm, extremos NPT, según ASTM A53, Cold Drawn.
6	Tubería ϕ 1/2", sin costura, Sch 160, longitud 6cm, extremos NPT, según ASTM A312.




 Universidad Suriana CONSTRUYENDO FUTURO		Subsistema: Zona de Bombeo	
		Nombre:	Disposicion de los Componentes (2) de la Zona de Bombeo
Dibujó: Carlos Galvis		Formato: A4	
Revisó: Alex Peñalosa		Escala: 1:8	
Aprobó: Jabid Quiroga		Plano: 02	

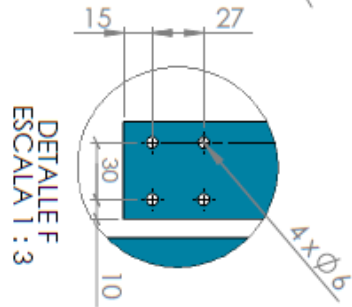
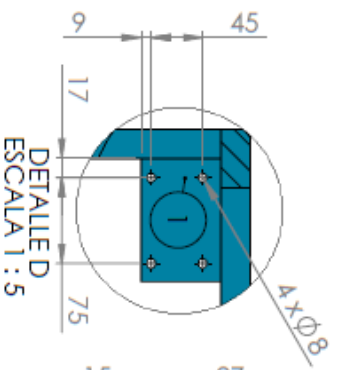
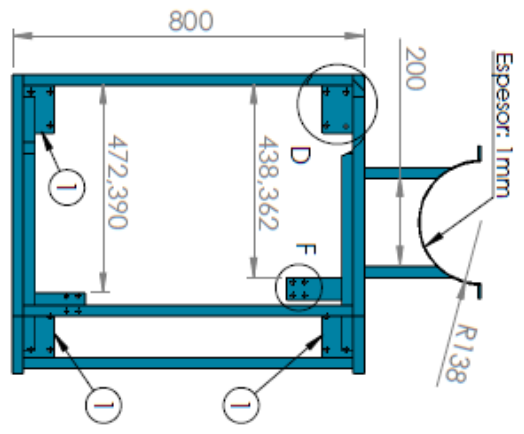
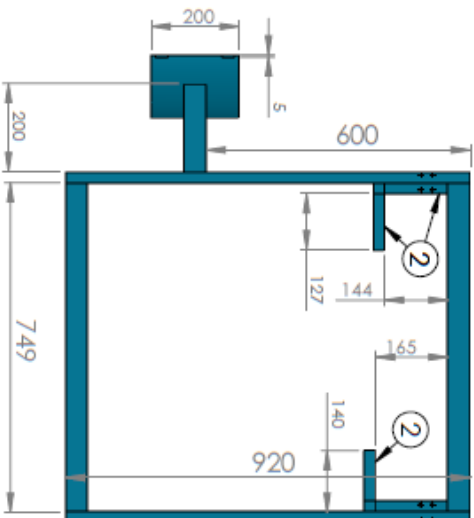
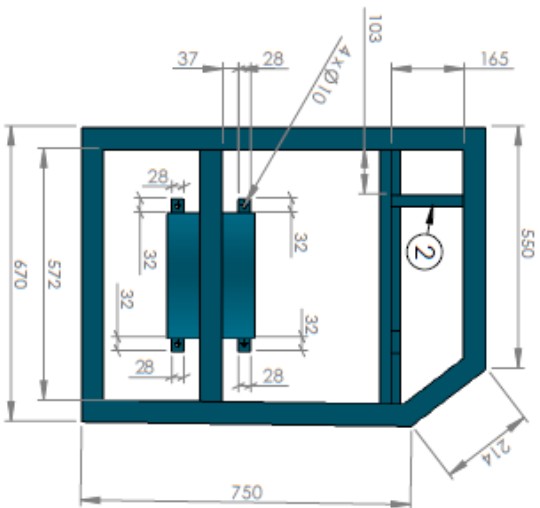
PIEZA	DESCRIPCION
1	Estructura
2	Tapas de la estructura
3	Elementos de la línea hidráulica
4	Rodachina naranja PG, \varnothing 2-1/2", WL 40Kg, marca Induruedas Ref: 2-1/2PG17A
5	Grapa metálica de 1/2"





DETALLE C
ESCALA 1 : 2

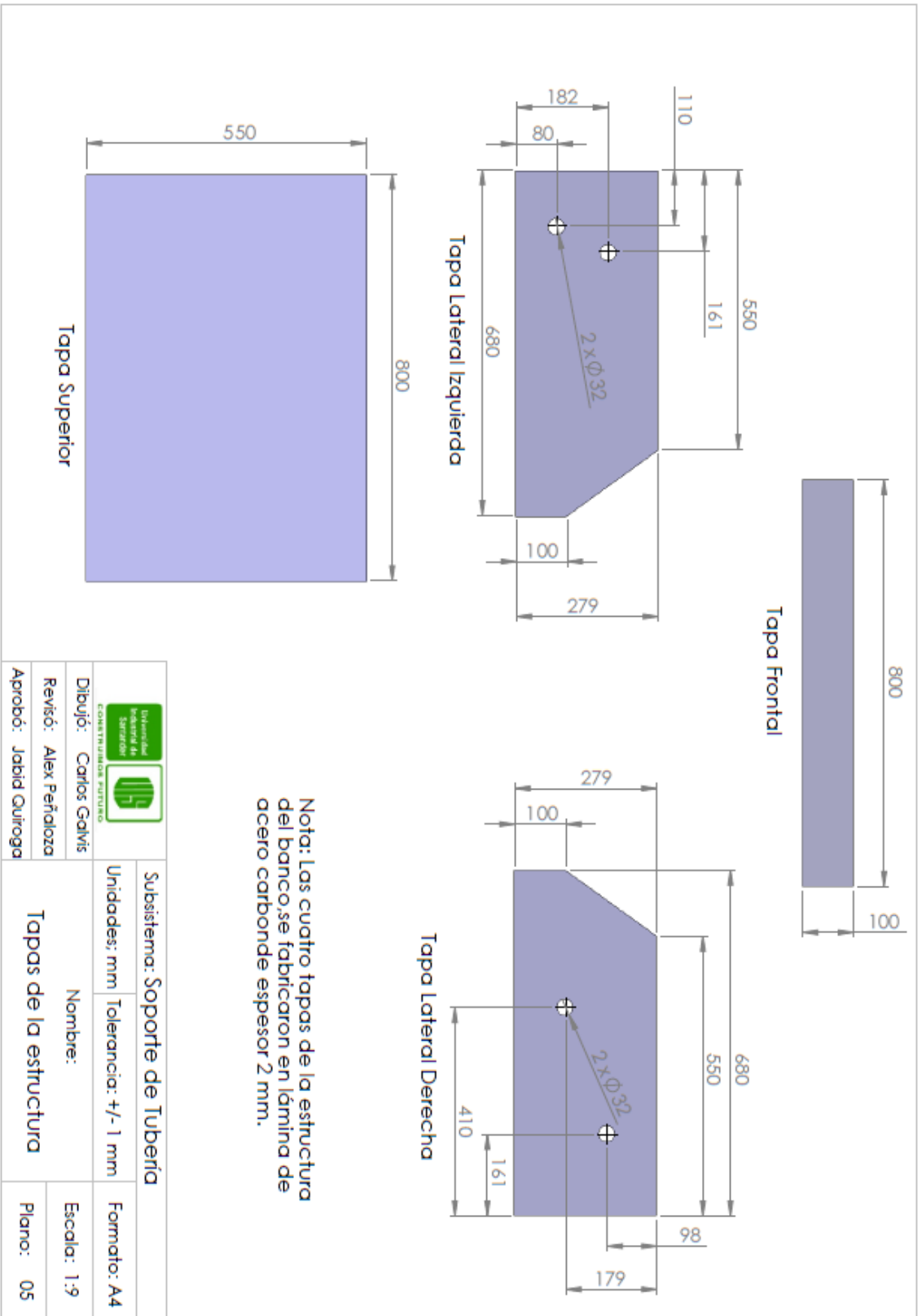
Nota: La sujeción de la tubería en la estructura se hace con dos grapas por cada apoyo como se muestra en la sección de detalle C

 Universidad Industrial de Santander CONSTRUYENDO FUTURO	Subsistema: Soporte de Tubería	
	Nombre:	Formato: A4
Dibujo: Carlos Galvis	Disponición de los Componentes del Soporte de Tubería	
Revisó: Alex Peñaloza	Escala: 1:10	Plano: 03
Aprobó: Jabid Quiroga		

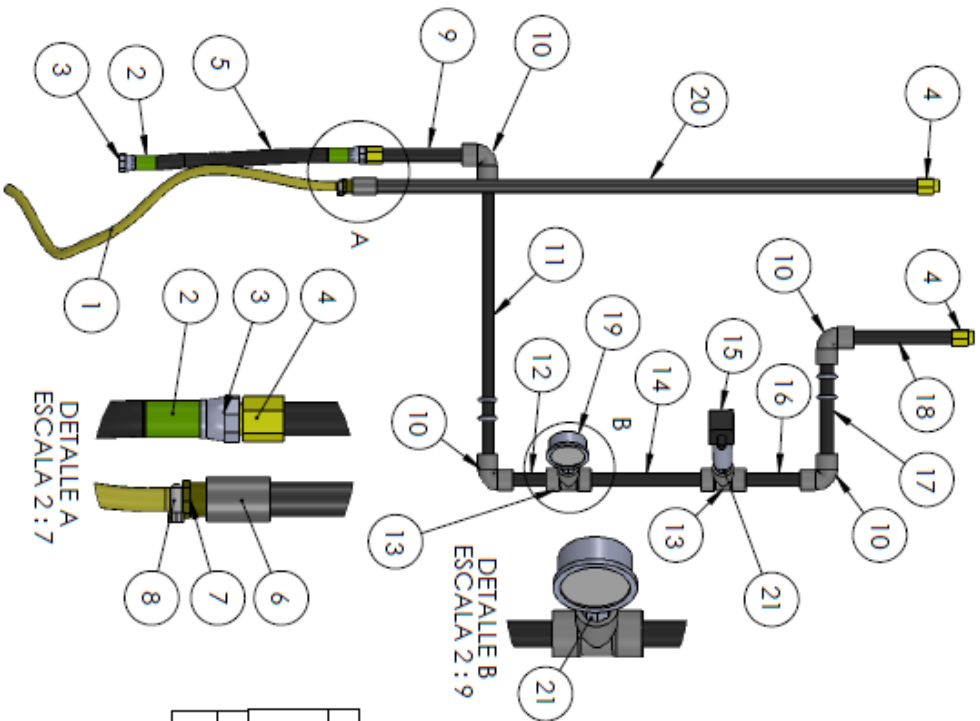


- Especificaciones:**
- Estructura con tubo de perfil rectangular de 1"X2", calibre 18.
 - El detalle D muestra la lámina de soporte para las ruedas, se ubican cuatro en la base de la estructura, cada una marcada con el #1. (Espesor: 4 mm).
 - El detalle F muestra la distribución de los agujeros para la ubicación de las grapas, se realiza este mismo arreglo para los tramos de perfil marcados en el plano con el #2.


 	Subsistema: Soporte de Tubería		
	Sistema: DIN	Unidades: mm	Formato: A4
Dibujó: Carlos Galvis	Nombre: Estructura		Escala: 1:13
Revisó: Alex Peñalosa			Plano: 04
Aprobó: Jabid Quiroga			

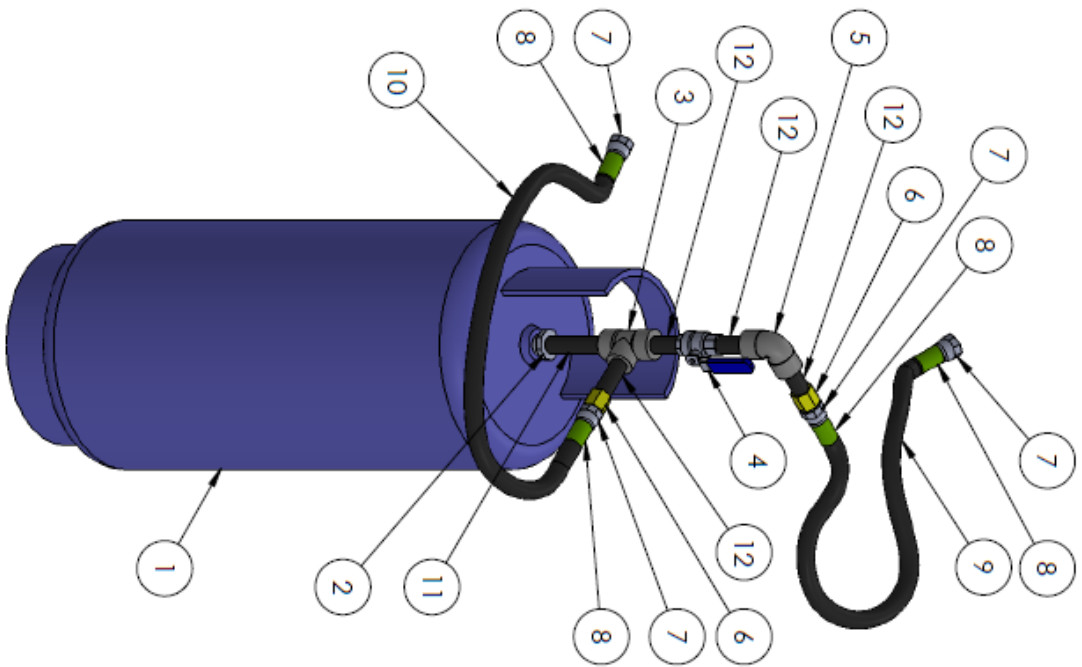


PIEZA	ESPECIFICACION
1	Manguera Transparente $\phi 3/8"$ x 1,2 m x 60 psi
2	Abrazadera metálica, Fabricante-Manuli Hidraulics, Ref. M03400-08.
3	Boquilla para manguera de cabeza giratoria, 1/2" BSP Hembra a 1/2" ϕ manguera.
4	Adaptador 1/2" BSP macho a 1/2" BSP hembra
5	Manguera hidráulica Allagomma Flexor 1A1/1SN 1/2", Presion de trabajo 2320 psi, SAE 100 R1AT. Longitud 25 cm.
6	Acople 1/2" hembra a 1/2" hembra, NPT
7	Boquilla para manguera, 1/2" NPT Macho a 3/8" ϕ manguera
8	Abrazadera metálica- $\phi 3/8"$
10	Codo 90°- $\phi 1/2"$, radio corto, 3000 psi, extremos NPT, según ASTM A105N-05.
13	Tee recta $\phi 1/2"$ -3000 Psi, extremos NPT, ASTM A105N-05.
15	Transmisor de presion x 1000 Psi.
19	Manometro análogo x 1000 Psi.
21	Buje de reducción 1/2" x 1/4" x 3000 psi NPT.




COMPONENTES	Tuberías
ESPECIFICACION	Tubería $\phi 1/2"$, sin costura, Sch 80, extremos NPT, según ASTM A53, Cold Drawn.
PIEZA	9 11 12 14 16 17 18 20
LONGITUD (cm)	15 47 8 20 11 17 18 90

 Universidad Tecnológica de Panamá CONSTRUCCIONES PÉTRUM	Subsistema: Soporte de Tubería	
	Nombre: Componentes de la línea hidráulica.	
	Formato: A4	
	Escala: 1:9	
Dibujó: Carlos Galvis	Plano: 06	
Revisó: Alex Peñalzo		
Aprobó: Jabid Quiroga		

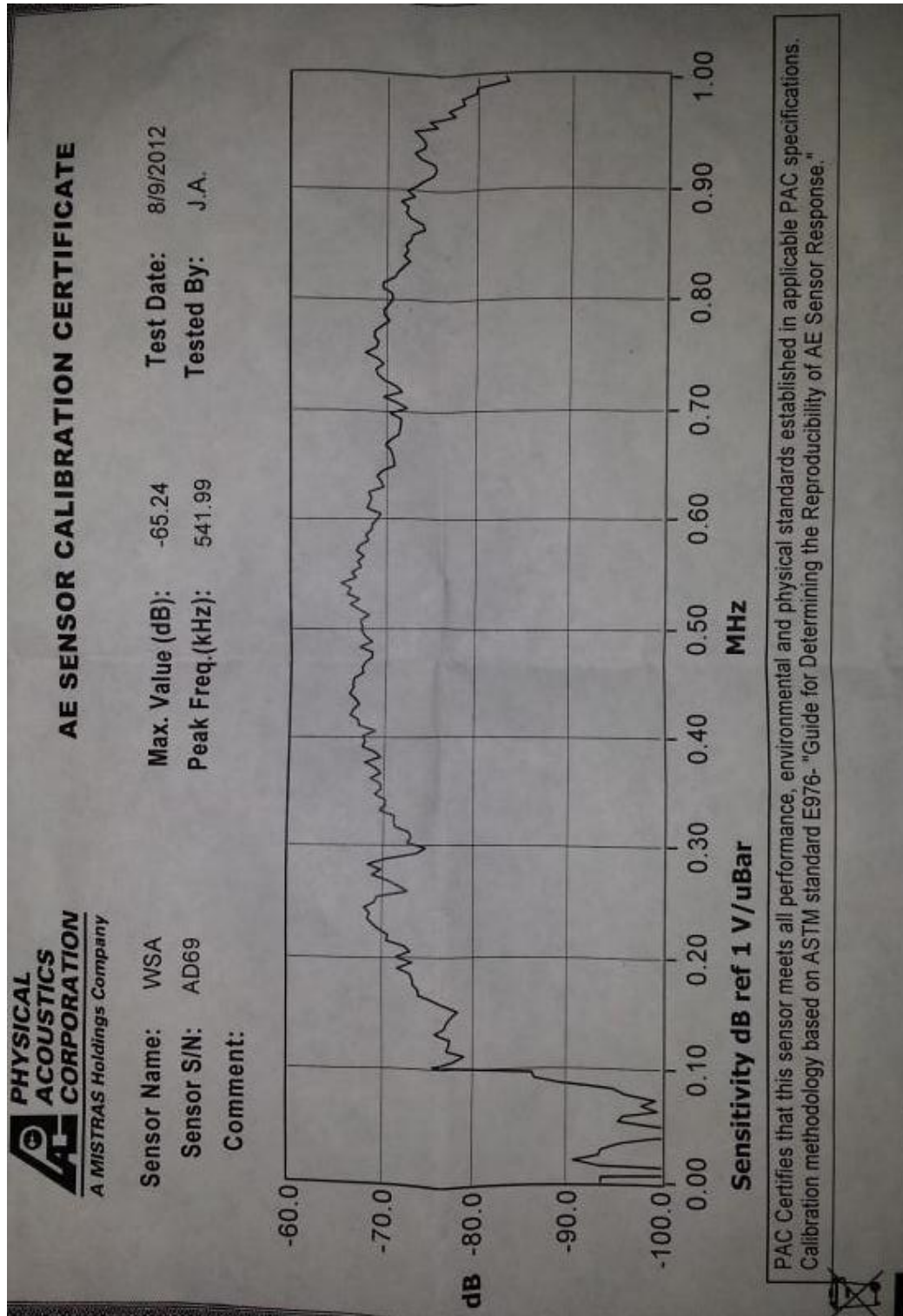


PIEZA	ESPECIFICACION
1	Cilindro de GLP de 18 Kg
2	Buje de reducción 3/4" x 1/2" x 3000 psi NPT.
3	Tee recta ϕ 1/2"-3000 Psi, extremos NPT, ASTM A105N-05.
4	Válvula Acero Inoxidable, 1/2"-1000psi, extremo NPT, ASTM-A351-CF8M
5	Codo 90° - ϕ 1/2", radio corto, 3000 psi, extremos NPT, según ASTM A105N-05.
6	Adaptador 1/2" BSP macho a 1/2" BSP hembra
7	Boquilla para manguera de cabeza giratoria, 1/2" BSP Hembra a 1/2" ϕ manguera.
8	Abrazadera metálica, Fabricante-Manulil Hydraulics, Ref. M03400-08.
9	Manguera Parker Series 7093, ϕ int 1/2", presión de trabajo máxima 200 psi, longitud 80 cm.
10	Manguera hidráulica Alfagomma Flexor, 1AT/1SN 1/2", Presión de trabajo 2320 psi, SAE 100 R1AT. Longitud 90 cm.

COMPONENTES	Tuberías	
ESPECIFICACION	Tubería ϕ 1/2", sin costura, Sch 80, extremos NPT, según ASTM A53, Cold Drawn.	
PIEZA	11	12
LONGITUD [cm]	11	7

 CONSTRUYENDO FUTURO	Subsistema: Cilindro a Presión	
	Nombre: Componentes del cilindro a presión	
	Formato: A4	
	Escala: 1:	
Dibujó: Carlos Galvis	Plano: 07	
Revisó: Alex Peñaloza		
Aprobó: Javid Quiroga		

Anexo D. Certificado de calibración del sensor WSA



Fuente: Documentos soportes entregados por PAC.

Anexo E. Guía de instalación AEwin lite.

4. INSTALLING THE USB NODE AND AEWIN INTO YOUR COMPUTER

If you have purchased your computer along with your USB-AE Node, your USB Node and AEwin have already been installed on your computer with an AEwin Icon on the desktop of the computer. In this case, you can skip over this section and proceed to the “Operating Your System” section of this manual. However, if you will be using your own computer with the USB Nodes and if it has not already been configured for the USB-AE Node or AEwin, then you will need to follow the instructions in this chapter before you can begin to use your system.

As with any USB device, your USB-AE node needs to be installed into your computer before it can be utilized as an AE system. There is a two step process involved. The first step is to install the USB-AE Node(s) into the computer and the second step is installing and licensing AEwin (or AEwin for USB) into your computer. This will be covered in the remaining sections of this manual. Please follow them step-by-step.

4.1 Installing your USB-AE Node into your computer

If you have purchased the USB-AE Node(s) and are planning on using your own computer that has not been configured at the factory, you will need to follow the steps below to install the USB-AE Node in order to be recognized by the computer.

The USB-AE Nodes require a driver in order to function properly in Windows.

Normally, after installing the node Windows will prompt for a driver for it. Point Windows to the appropriate driver folder on the CD and follow the instructions.

The driver folders are located on the CD at the following locations:

- **USB AE Node** – Drivers\USB AE node

Windows XP should detect that new hardware has been installed and start the Found New Hardware Wizard asking whether to connect to Windows Update.

1. Select 'No, not this time'. Press 'Next'.
2. Select 'Install from a list or specific location'. Press 'Next'.
3. Select 'Search for the best driver in these locations'.
Insert the program CD in the CD drive.
Check 'Search removable media'.
Press 'Next'.
4. Windows will search for the required files and then display the 'Hardware Installation' window.
A warning is displayed that the software has not passed Windows Logo testing.
Press 'Continue Anyway'
5. Windows will install the driver files. Please wait for a few minutes.
6. When installation is finished the 'Completing the Found New Hardware Wizard' dialog box will appear.
Press 'Finish' to complete the installation.

The procedure above is needed the very first time a USB AE node is attached to the computer. After that, if other nodes are attached or the first node is moved to another USB port, the following simpler procedure can be used. In

Copyright© 2010, MISTRAS Group Inc., Products & Systems Division, Princeton Junction, NJ, USA

Fuente: Documentos soportes entregados por PAC.

step 2 above select 'Install the software automatically' and press 'Next'. Then, Windows will use the driver files already installed in the computer and jump to step 4 without reading the CD again.

If for some reason you need to install a driver manually then read the document drivers.doc found in the appropriate driver folder. Use the procedures described there only if the above automatic driver installation does not work. It is not normally required to install the driver this way but, if problems arise, that is how to do it.

4.2 Installing and Licensing AEwin On a Computer

If you are installing AEwin yourself, you will need to follow the simple installation instructions below. Software installation and licensing is a two step process which will be discussed in the next two sections for an example of "AEwin for DiSP" which is very similar to the "AEwin for USB" software installation. The AEwin program is generally pre-installed on the AE system computer from the factory. In special instances, such as where you are using your own computer, you will need to perform the installation yourself from the supplied CD. You cannot run AEwin directly from the distribution CD because the files on the disk are compressed and security protected.

If you are installing AEwin yourself, you will need to follow the simple installation instructions below. Due to the built-in software security features of this software, part of the installation process requires you to obtain an activation code from Physical Acoustics Corporation. The process is simple, you will be prompted to either call the factory or email the factory to obtain your security activation code, which you will enter to complete the installation process. This is all explained in the below example.

To fully install AEwin, you must perform the following steps, after you have exited all running applications.

1. Run SETUP.EXE from the root directory of the AEwin installation CD disk.
2. Activate the software using one of two methods:
 - a) On the last screen of the setup program there is a checkbox for product activation. If this is checked when you press finish it will run the activator program automatically.
 - b) To run the activator program manually it can be found at:
Start Menu-->Programs-->Physical Acoustics-->Activate AEwin for DiSP

Each step in the process is described below.

4.2.1 Installing AEwin from the installation CD:

Insert the AEwin installation CD into your AE System (or PC computer). Using your mouse or keyboard, select:

Start → Run → and type or select **D:\setup.exe**
(If your CD is other than drive D: enter that letter).

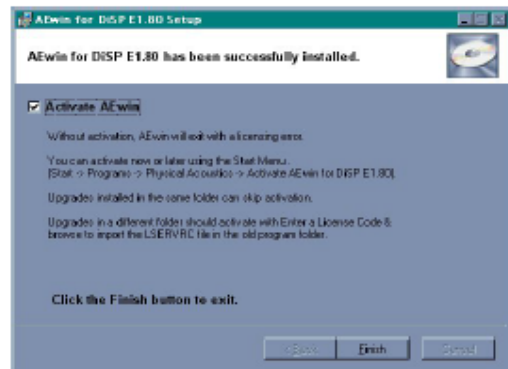


Figure 9. Installation Screen

Upon executing, you will follow a typical Windows installation process. Select all the default directories (highly recommended but not mandatory) if desired. Upon completion, of the installation, you will see the "Setup Complete" window as shown in figure 9. Note the comments and remaining steps that must be carried out. In most instances you will need to Activate AEwin before you can run it. This process can be started automatically by checking the 'Activate AEwin' checkbox before clicking Finish.

4.2.2 Activate the AEwin software using the Start Menu option

To manually activate the AEwin software, you must first select the “Activate AEwin” program. Do this by using your mouse to select the following;

Start → Programs → Physical Acoustics → Activate AEwin

This brings up the AEwin Activation screen as shown in figure 10. Selecting “Continue” will bring up the “Activation method selection” screen, shown in figure 11.

You have several methods in which to Activate AEwin_ “Telephone”, “Email” and “Enter a License Code”.

If you have a “Hardware Security Key” then much of this process has already been completed for you. A License Code has already been generated for you and is stored as a file (“lservrc”) on your “Hardware Security Key” CD. Use the “Enter a License Code” method to activate AEwin.

If you do not have a “Hardware Security Key” then you will need to obtain a license code from PAC customer service. AEwin can be activated in this manner through either the “Telephone” or “Email” methods below.

You can “activate by telephone”. If this method is selected, you will see a menu as shown in figure 12 which provides you with a telephone number to Customer Service who will help you and provide you with a License code that you can enter in while on the phone.

You can “activate by email”.

Upon selecting this choice you will see the screen as shown in figure 13.

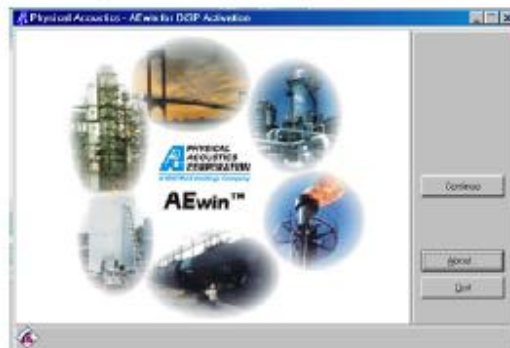


Figure 10. Activation opening screen



Figure 11. Choose Activation method

Your system will need to be able to access the internet to use this option. If it is internet ready, this is the easiest option to use. Just fill out all the information and press “Send Email”. Your activation information will automatically be sent to customerservice@paendt.com and your license code will be sent back to you as an email attachment.



Figure 12. Activation by telephone



Figure 13. Activation by email

The last way to activate AEwin is by entering a license code. This method is selected once you receive your Email with the License Code or if you have written down the license code and wish to install it. Upon selecting this activation method, you will see the screen as shown in figure 14. This is a little different that that shown in figure 12 as you can either enter a number directly or you can choose the file folder just to the right of the License Code text entry box. Using the file to automatically enter the License Code is preferred to avoid making entry mistakes with the long license code number. Just select the file folder to enter a file. A screen as shown in figure 15 appears in which to select your license code file. Find the license file with the name LSERVRC and select it and the code will be entered automatically.

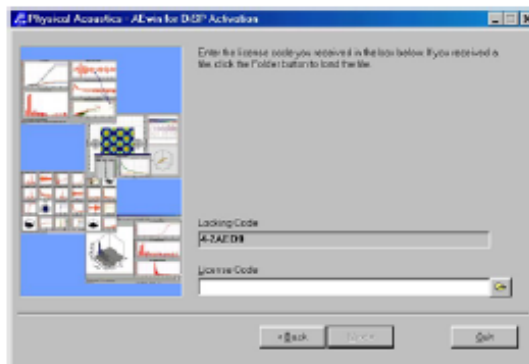


Figure 14. Enter license code screen

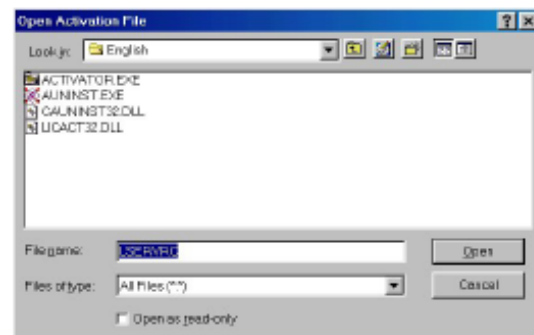


Figure 15. Selecting the LSERVRC license file

Once the License code is entered using any of the above methods, just press NEXT to continue and complete the activation process. This is it. AEwin is now installed.

At this point, your AEwin software is ready to run as a Replay program by selecting;

Start → Programs → Physical Acoustics → AEwin

4.3 Starting AEwin

The first step in the process of using AEwin is booting up the program on your AE system. As the AEwin program is a standard Windows program, it is started in the same way as any other WINDOWS program. This is accomplished either by using the "Start" command or by selecting the AEwin Icon from the WINDOWS desktop.

Anexo F. Artículo del proyecto.

Detección De Fallas En Un Recipiente Sometido A Presión Usando La Tecnología De Emisiones Acústicas

Carlos Andrés Galvis y Sergio Alexander Peñaloza
Escuela de ingeniería mecánica,
Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia

Abstract—There is a big concern about the reliability that LPG cylinders are offering to the users, so it has been necessary to implement different inspection techniques to keep the structural integrity of these vessels in good condition. Some Acoustic Emission (AE) tests take place in order to monitor vessels condition since they are acquired from distributors until they get serious flaws. AE parameters are quantified and plotted in different fault sceneries to establish comparisons between them, and some graphs become useful and could be implemented to warn the failures' vessels coming.

Palabras claves— cilindro de GLP, emisión acústica, integridad estructural.

I. INTRODUCCION

El manejo correcto de los cilindros de GLP se ha vuelto una temática de gran importancia a nivel nacional, es así que la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) ha iniciado una campaña para el cambio del parque de cilindros por otros recipientes marcados con el nombre del distribuidor, con el fin de controlar con mayor efectividad la distribución de este combustible en el país y que los usuarios dispongan de seguridad, confiabilidad, y calidad en el producto que reciben por parte del distribuidor [1]. De tal manera que para preservar la seguridad de los usuarios, la integridad estructural de esos cilindros debe empezar a evaluarse.

A nivel nacional, para evaluar la condición estructural del cilindro se realizan pruebas hidrostáticas, bajo estándares propios, tal como la NTC 522-1, sin embargo en países líderes en innovación se ha reemplazado dicha técnica de inspección, por la tecnología de emisiones acústicas (AE), ya que brinda mejores beneficios económicos, así como mayor información sobre la integridad del material, y finalmente porque reduce la contaminación en el mismo tras la inspección, pues la presurización del cilindro se hace con nitrógeno o con la sustancia que actualmente contiene [2].

La implementación de esta tecnología se realiza de mejor manera siguiendo las pautas establecidas en diferentes entes internacionales como la ASME y la ASTM, es así que se han desarrollado múltiples investigaciones para el monitoreo de recipientes a presión en todas las escalas de la industria global,

lográndose evaluar la integridad estructural de cilindros, fabricados en acero, así como cilindros con materiales compuestos [3], y esferas de almacenamiento de gas vitales en refinerías [4]. En el presente trabajo se ha implementado la técnica de AE durante un a prueba hidráulica de presión, con el fin de monitorear la actividad acústica que ofrecen dos cilindros de GLP, los cuales se someten a 5 escenarios de falla, que se diferencian principalmente por ir incrementando la severidad del daño en dichos recipientes.

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El cilindro a inspeccionar usando AE, tienen las características registradas en la Tabla 1.

TABLA I
ESPECIFICACIÓN DEL CILINDRO DE GLP

Capacidad de GLP [Kg]	Presión máxima de servicio [psi]	Presión máxima de prueba hidrostática [psi]	Presión mínima de rotura [psi]
18	240	500	960

Se inspeccionaron dos cilindros, denominados recipiente 1 y recipiente 2, el primer espécimen sufrió fallas en su superficie externa, y el segundo en la superficie interna de su base. Los daños impuestos se asemejan a muescas circunferenciales en forma de "V" [5].

Para el primer recipiente se plantean cinco escenarios de falla (tabla II), en los escenarios 1 y 2, no se realiza ningún tipo de daño, se quiere conocer la actividad producida por el recipiente en su estado original y comprobar el efecto Kaiser. En el escenario 3 se realizan muescas con una profundidad aproximada de 0.5 [mm]. Más adelante, en el escenario con un nivel de severidad medio, se disminuye el espesor de pared borrando los fallas realizadas en el nivel de severidad leve, nuevamente se realizan muescas, esta vez mas cantidad con una profundidad aproximada de 0.5 [mm]. Finalmente para el nivel de severidad alto se disminuye el espesor de pared hasta borrar las muescas impuestas en el escenario anterior.

Las escenarios del recipiente 2, registrados en la tabla II, incluyen daños realizados en su interior dejando caer una barra con una masa de aproximadamente 0.5 [Kg] que sostiene un punzón en uno de sus extremos, creando la muesca circunferencial mencionada. Con los escenarios 6 y 7 se busca

al igual que en el 1 y 2, conocer el comportamiento inicial del recipiente. Para el escenario 8 se realizan 200 muescas dejando caer la barra a través del orificio de conexión de válvula desde una altura de aproximadamente 20 [cm], con esto se logra un daño con aproximadamente 0.5 [mm] de profundidad. En el escenario 9, para aumentar la severidad de la falla se realizan daños, 1000 muescas con una profundidad aproximada de 1 [mm], dejando caer la barra esta vez desde una altura de aproximadamente 40 [cm]. Finalmente para aumentar la severidad de la falla hasta niveles altos, se deja caer la barra sobre la base del cilindro desde una altura de aproximadamente 60 [cm] 2300 veces lo que condiciona su resistencia máxima.

TABLA II.
ESCENARIOS DE FALLA PARA EL RECIPIENTE 1

Severidad de la falla				
Nula (Escenario 1)	Nula (Escenario 2)	Leve (Escenario 3)	Media (Escenario 4)	Alta (Escenario 5)

TABLA III.
ESCENARIOS DE FALLA PARA EL RECIPIENTE 2

Severidad de la falla				
Nula (Escenario 6)	Nula (Escenario 7)	Leve (Escenario 8)	Media (Escenario 9)	Alta (Escenario 10)

Se implementó el AE Node System proveído por PAC, para el manejo de las señales AE, así como el software AE win Lite para el tratamiento gráfico de los datos. Adicionalmente, se adquirió la señal de presión con un transductor estándar con nombre de producto PT124B-210 del fabricante ZHYQ.

La presurización se hace con agua usando una bomba manual, que se une a los recipientes por una línea hidráulica, que contiene principalmente una válvula antiretorno que sostiene los niveles de presión, así como un manómetro para el monitoreo de esta variable, y por supuesto una ramificación para la instalación del transmisor, que usando un conversor electrónico que transforma la señal en [mA], a una señal de voltaje entre 1V y 5V, se vuelve una entrada paramétrica del AE Node, El esquema del arreglo del sistema global de inspección para el recipiente 1 se muestra en la figura 1, análogo es el realizado al recipiente 2, con la diferencia de que las fallas son internas y por tanto la localización del cilindro se realiza en las proximidades de dicha zona afectada.

Por otro lado es necesario ajustar los parámetros que configuran el sistema de adquisición de AE, dichos valores se listan en las tablas IV y V.

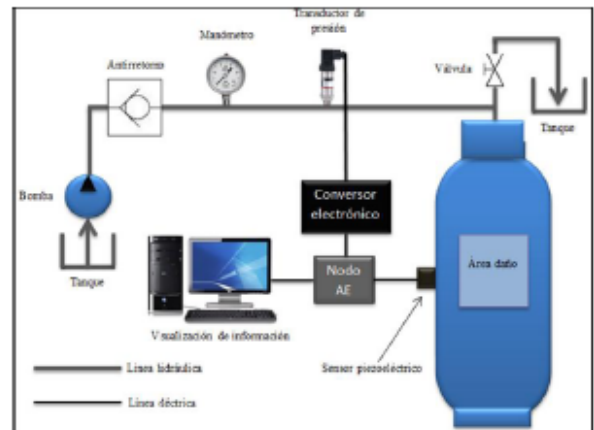


Fig. 1. Esquema del montaje recipiente 1.

TABLA IV.
CONFIGURACIÓN DEL CANAL DE ADQUISICIÓN

Umbral fijo [dB]	Filtro Análogo [KHz]	Waveform		
		Frecuencia de muestreo [MSPS]	Pre-trigger [μs]	Longitud
40	20 - 1000	10	960	7 k

TABLA V.
CONFIGURACIÓN DE TIEMPOS DE DEFINICIÓN DE LA SEÑAL

PDT [μs]	HDT [μs]	HLT [μs]
400	600	1000

Basado en los estándares de la ASTM [6] [7], se realiza como parte del procedimiento, la verificación del desempeño del sistema previo a la inspección de los cilindros, esta comprobación valida el correcto funcionamiento del equipo, y garantiza la obtención de datos de calidad. La tabla V muestra valores de parámetros típicos de una AE producto del rompimiento de la mina de un lápiz; este procedimiento se realizó para cada uno de los escenarios encontrando similitud en los valores producidos por los hits detectados, presentando variaciones menores a 6 [dB] lo que se asocia al correcto funcionamiento del sensor, como lo indica la guía [6] en su sección 6. No obstante, en la tabla VI solo se registran los datos obtenidos para el primer escenario

TABLA VI.
VERIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL AE NODE SYSTEM, ESCENARIO 1

Parámetro	Rompimiento N°					
	1	2	3	4	5	6
Energía [μV-s/cuenta]	3195	3513	2244	2624	2990	2909.2
Amplitud [dB]	86	85	86	90	87	86.8
Duración [μs]	35633	35678	33093	30825	32051	33456
Cuentas	1138	935	961	894	903	966.2

Para eliminar el ruido en primera instancia se estableció un umbral en 40 [dB], basados en las amplitudes que manifiestan diferentes fuentes de AE [2]. No obstante en la

etapa de determinación del ruido de fondo se observó que este poseía una forma de onda con patrones que se repiten constantemente, así como baja amplitud, energía y duración, diferenciándose de los pulsos simples característicos de una AE [8]. En la figura 2 se logra visualizar la diferencia entre la forma de onda característica del ruido y la de una emisión acústica, herramienta valiosa para limpiar la información.

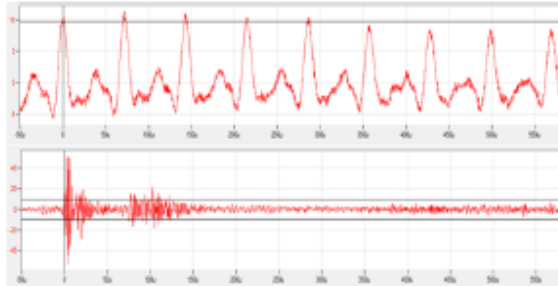


Fig. 2. Forma de onda de una señal de ruido y un AE real.

La forma de onda del ruido (imagen superior) posee patrones repetitivos. La forma de onda de una verdadera AE se caracteriza por alcanzar rápidamente la amplitud pico, así como un decaimiento acelerado tras pasar por este punto (imagen inferior).

La carga estructural a la cual se somete ambos recipientes, se hace como lo indica el estándar ASME en su sección T-1244.3.2.2 [9]. La secuencia de presurización del primer escenario se muestra en la figura 3, análogamente se realizan las secuencias en los otros escenarios diferenciándose por los valores de presión de cada etapa de sostenimiento; estos valores se registran la tabla VII.

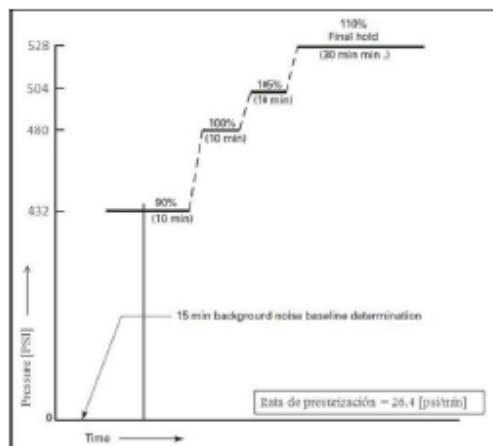


Fig. 3. Secuencia de presurización escenario 1.

TABLA VII.
ETAPAS DE PRESURIZACIÓN PARA AMBOS RECIPIENTES.

Etapas de sostenimiento	Escenarios de falla				
	1 y 6	2 y 7	3 y 8	4 y 9	5 y 10
Nº1 [psi]	432	475	523	575	633
Nº2 [psi]	460	528	581	639	703
Nº3 [psi]	504	554	610	671	738
Nº4 [psi]	528	581	639	703	773

III. REPORTE Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la figura 4 se revisa la actividad energética de las AE registradas en los 5 escenarios de falla correspondientes al cilindro 1. La primera comparación se establece entre los escenarios 1 y 2, los cuales corresponden a severidad de falla nula en el recipiente en cuestión, se diferencian en que el escenario 2 alcanza un nivel de presión 10% por arriba del escenario 1, y de ahí se desprende la primera observación acerca del efecto Káiser [10][11] observado entre dichos escenarios, es así que los pocos hits detectados en el segundo ensayo se logran cuando se llega a 575[psi], superando la presión máxima anterior 526 [psi].

En segundo lugar se observa que al imponer fallas leves (escenario 3) se detectan cambios en la actividad acústica frente al ensayo predecesor (escenario 2), además la mayoría de los hits detectados en el escenario 3 se logran en etapas de sostenimiento, lo que implica la iniciación del proceso de degradación del material [10]. En este punto aún se observa el efecto Káiser ya que los primeros hits del escenario 3 se detectan a un nivel de presión de 632 [psi], el cual supera el nivel de presión máximo del anterior ensayo 575[psi], lo que se asocia a fallas insignificantes [10][11].

Es importante analizar el efecto Felicity presentado en el escenario 4, aquí las fallas impuestas catalogadas como intermedias conllevan a una actividad AE previo a alcanzar el nivel máximo anterior, lo que implica que las imperfecciones realizadas afectaron significativamente la integridad del recipiente [11]. Adicionalmente se detectan hits de mayor energía frente a los anteriores escenarios, asociando esta manifestación a la gravedad estructural mencionada.

Ahora bien, el escenario 5 muestra actividad desde el inicio de la presurización, apareciendo nuevamente el efecto Felicity, además se logra mayor densidad de hits frente a los escenarios 2, 3, 4, confirmando que las fallas realizadas son de alta delicadeza, que en efecto permitieron lograr la ruptura del cilindro, justamente en dicha zona afectada. Así que, la falla del cilindro se logró a un nivel de presión muy bajo, 341 [psi], frente al valor mínimo de rotura, 960 [psi], esto repercute en la menor cantidad de energía medida en comparación con el escenario 1, el cual se realizó a niveles de presión más elevados, además mayor tiempo de medición, teniendo más oportunidad de recolectar parámetros de las AE.

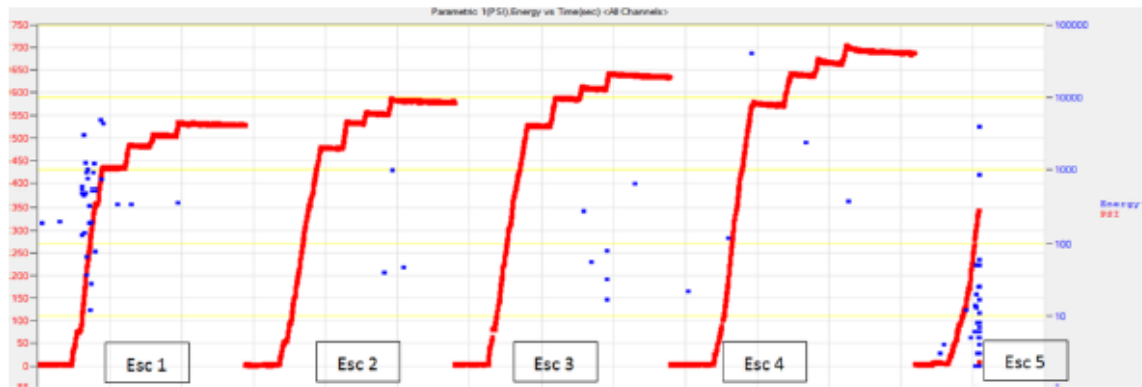


Fig. 4. Actividad energética en todos los escenarios de falla del recipiente 1.

Por otro lado, se analiza el comportamiento que muestran las curvas acumulativas de hits y energía de la figura 5. Dichas curvas representan el historial de actividad AE del cilindro 1 desde que se realizó el primer AET (Esc 1), hasta que se logró la falla del mismo (Esc 5). Como primera observación se tiene que la acumulación energética hasta el escenario 3 (26057 [$\mu\text{V-s/ cuenta}$]) a pesar de ser significativa frente al global (74672 [$\mu\text{V-s/ cuenta}$]), presenta un crecimiento medido con concavidad negativa, demostrando que las fallas impuestas en el recipiente hasta ese momento, no eran de gravedad [12]. Seguidamente, se tiene que el crecimiento pronunciado de las curvas en los escenarios 4 y 5, anuncian la presencia de serias afectaciones en el cilindro, en primer lugar porque se logra la mayor parte de la energía total detectada aproximadamente 65% de dicho valor máximo, y segundo como lo muestra la curva de hits acumulados, para el escenario 5 se presenta un punto de inflexión en el cual la curva adopta una concavidad positiva advirtiendo la destrucción del cilindro [9][12].

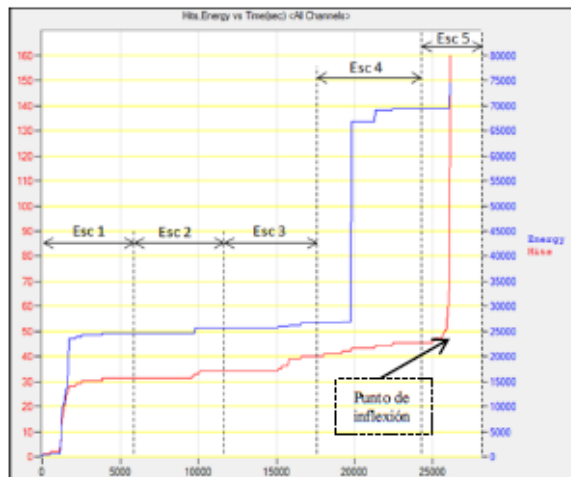


Fig. 5. Historial de actividad acústica cilindro 1

Finalmente, en la figura 6 se muestran los valores acumulativos de energía, hits, y cuentas, para cada escenario del cilindro 1. Recordando que la energía es un parámetro AE que asocia, todos los hits detectados, su amplitud, duración e implícitamente cuentas, en resumen es la cuantificación de la actividad AE, entonces se considera de gran importancia en el siguiente histograma, analizar su tendencia entre cada uno de los escenarios.

En primer lugar se observa un descenso energético entre el escenario 1 y 2, ambos caracterizados porque no se realizó ningún tipo de daño en el material, tal disminución de energía se asocia al efecto Káiser como se mencionó en análisis anteriores, es así que al no imponerse nuevas imperfecciones en el material (Esc 2) la actividad AE tiende a disminuir, este comportamiento también se observa para la cantidad de hits y cuentas detectadas.

Ahora bien, las fallas leves logran ser detectadas ya que entre el escenario 2 y el 3 hay un cambio positivo, pasando de un valor de energía de 1059 a 1096, igualmente lo hacen la cantidad de hits y cuentas. Más grande es la variación de energía entre los escenarios 3 y 4, implicando que se aumentó de manera significativa la severidad de la falla, pasando de 1090 a 42678; es también importante analizar que aunque la cantidad de hits acumulados en el escenario 4 disminuyó (5 hits), las cuentas capturadas aumentaron drásticamente, influyendo como se mencionó en el valor elevado de energía de dicho escenario. Finalmente el escenario 5 no aumentó energéticamente frente al escenario 4, pero lo hizo en la cantidad de hits, el escenario 5 desmejoró completamente la integridad estructural del material, fallando a un nivel de presión bajo, 344 [psi], no obstante la gran aceleración con que se producen los hits como se enfatizó anteriormente es la que caracteriza la llegada de la falla.

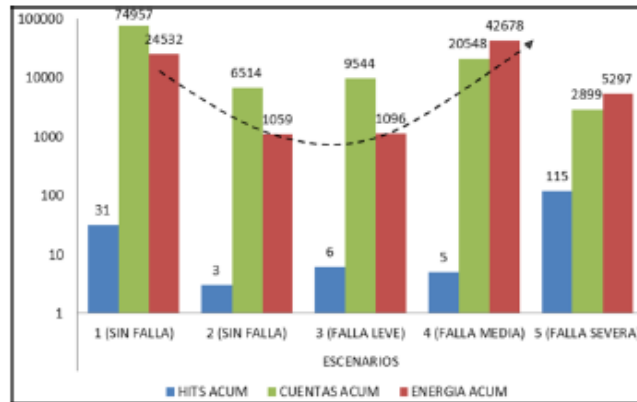


Fig. 6. Energía, hits y cuentas acumuladas en cada escenario del cilindro 1.

La figura 7, muestra comparativamente el comportamiento acústico en los diferentes escenarios falla, del recipiente 2. La primera observación se da con el efecto káiser entre los escenarios 6 y 7, ya que en este último ensayo la mayoría de los hits detectados aparecen en un nivel de presión (534 psi), superior al nivel de presión máximo del sexto escenario (531 psi). Así mismo se observa entre estos ensayos una disminución en la actividad AE ya que los hits detectados en el escenario 7 son menores en cantidad y en energía que los obtenidos en el sexto.

Seguidamente, se detectó un cambio entre los escenarios octavo y séptimo, la actividad acústica del escenario 8 inició durante la primera etapa de presurización, presentándose el efecto Felicity, fenómeno antagónico al efecto Káiser, además que los hits detectados mostraron más energía, confirmando

que en este escenario el tanque sufrió afectación por las fallas leves. El escenario 9, muestra respecto al escenario 8, hits de mayor energía, lo que comprueba que efectivamente los daños impuestos fueron significativos, además también se observa el efecto Felicity pues hay detección de hits en la primera etapa de presurización previo a alcanzar el nivel máximo de presión del escenario octavo.

Finalmente, el escenario 10 muestra la mayor actividad acústica de todos los ensayos del recipiente en estudio, este ensayo se caracterizó por provocar fugas en la base del mismo, detectándose hits cada vez con mayor energía (al aumentar la presión), provenientes de la propagación de las grietas en la zona afectada.

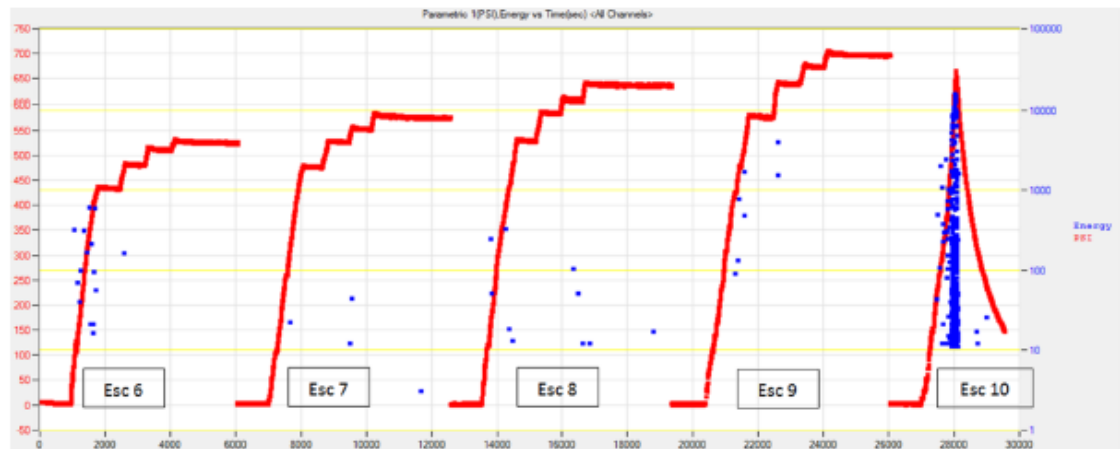


Fig. 7. Actividad energética en todos los escenarios de falla del recipiente 2.

En la figura 8 se observa el historial de actividad acústica registrada para el cilindro 2, y con ella es posible analizar el avance de la degradación del material tras el aumento de la severidad de la falla. Es notable el amesetamiento que sufren las curvas acumulativas de energía (azul) y hits (roja) en los escenarios 6, 7, 8, y 9, lo cual implica que hasta ese último ensayo no se ha afectado significativamente el material del recipiente [12].

Por otro lado el escenario 10 presenta para ambas curvas un punto de inflexión, disparándose de manera acelerada la acumulación de hits y su respectiva energía durante los primeros minutos de dicho ensayo, anunciando el colapso del material, particularmente la aparición de una fuga. No obstante en este último escenario se observan segmentos de pendiente nula al final de ambas curvas, este cambio tan notable se da en el momento en que se alcanza el primer nivel

de presión (662 psi) instante en el cual se detiene la presurización, y debido a la fuga originada se inicia la caída de la presión en el recipiente, por tanto como no hay propagación de la grieta en ese tiempo no hay actividad acústica significativa.

Finalmente, la figura 9 permite analizar la actividad acústica en cada escenario de falla del recipiente 2, y observar las tendencias de crecimiento de tales variables tras la imposición de las fallas. De manera general se observa que al no imponer fallas la actividad acústica va a disminuir como se muestra entre los escenarios 6 y 7, por otro lado la imposición de fallas cada vez más severas, tienden a aumentar los valores de los parámetros característicos de las AE, en términos globales la energía, así como sucedió en el recipiente 1.

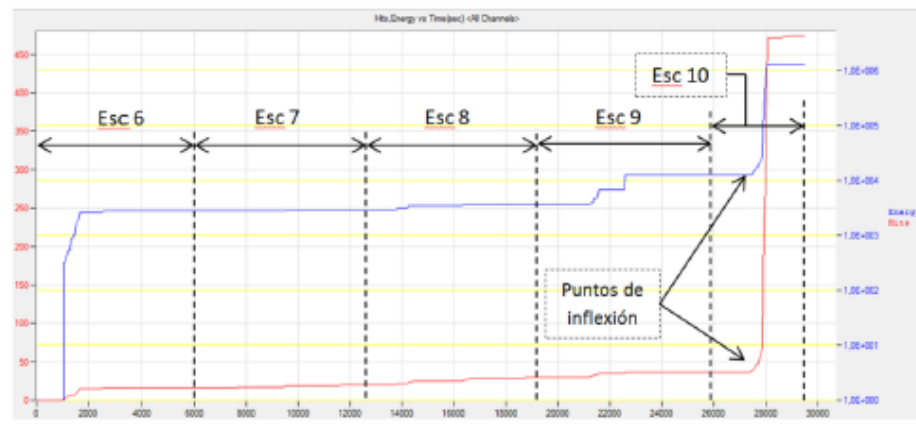


Fig. 8. Historial de actividad acústica cilindro 2.

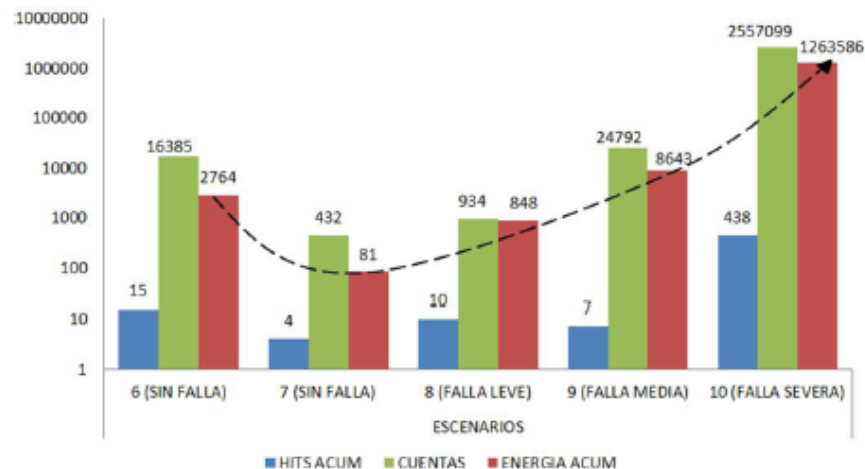


Fig. 9. Energía, hits y cuentas acumuladas en cada escenario del cilindro 2.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se comprobó que la técnica de emisiones acústicas permite detectar los cambios impuestos sobre la estructura de los recipientes bajo prueba. Observándose que en la medida que se aumentaba la severidad de la falla, los valores de energía, cantidad de hits, y cuentas etc. también manifestaban una tendencia de crecimiento.

Es posible, usando el historial de actividad acústica, realizar un seguimiento a la integridad de un recipiente de GLP, pudiendo determinar la presencia de fallas que comprometen seriamente la integridad estructural del recipiente, específicamente aquellas que lo llevarían a su destrucción antes de que esta suceda.

La evolución de la actividad micro sísmica durante los diferentes escenarios de falla tanto para el cilindro con daños internos como para el recipiente con defectos externos, determina la integridad estructural de estos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la división de mantenimiento tecnológico de la Universidad Industrial de Santander., por el apoyo económico y académico que hicieron posible la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Recolección y eliminación del parque universal de cilindros prohibición de circulación de cilindros universales. Creg-079. CREG, 2011.
- [2] Periodic AE-Retest of Seamless Steel Gas Cylinders, STP 1353. ASTM, 1999.
- [3] SKAWINSKI Olivier, HULOT Patrice, BINÉTRUY Christophe and RASCHE Christian. Structural integrity evaluation of CNG composite Cylinders by acoustic emission monitoring. Acoustic Emission Group, [online]. 26, pp 120-131. Available: www.ndt.net/article/jae/papers/26-120.pdf
- [4] CATTY Johan. "Acoustic Emission Testing of Buried Pressure Vessels: Implementation on a 16000 m3 gas storage unit". CETIM - 52 Avenue Félix Louat - 60304 SENLIS Cedex - France.
- [5] RAUSCHER Franz. Laboratory experiments for assessing the detectability of specific defects by acoustic emission testing. Acoustic Emission Group, [online]. 26, pp 98-108. Available: www.ndt.net/article/jae/papers/26-098.pdf
- [6] Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, E976, ASTM, 2010.
- [7] Standard Guide for Acoustic Emission system Performance Verification, E2374, ASTM, 2010.
- [8] WOOD, BRA y HARRIS RW (2000). International Journal of Pressure Vessels. *El sevier* [on line]. No 77, pp. 125-132.
- [9] Boiler and pressure vessel code: Section V, Article 12: Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing, ASME, 2010.
- [10] VALLEN, Harnut. AE Testing fundamentals, Equipment, Applications. Valken-Systeme. Icking, Munich, Germany [online]. Available: <http://www.ndt.net/article/v07n09/05/05.htm>
- [11] *Nondestructive Evaluation*, 3er ed, Acoustic Emission Testing, New York, 2001, pp 1-38.
- [12] JUÁREZ, Ricardo E. y ORTEGA, Carlos M. (2009, November). Análisis del informe de resultados de ensayo de Emisión Acústica en base a lo establecido en el código ASME Boilers and Pressure Vessels Code (BPVC) Sección V Artículo 12 2007. Presented at Congreso Regional de Ende [on line]. Available: www.vn-amps.com.ar/38-EA-Ortega.pdf