



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
DIRECCIÓN DE POSTGRADO

Facultad de Ingeniería – Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención  
en Ingeniería Mecánica

**USO DE EMISIONES ACÚSTICAS PARA EL MONITOREO DE LA  
EVOLUCIÓN DEL DAÑO EN ELEMENTOS MECÁNICOS**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica

FRANCO ALEXANDER MÉNDEZ FREIRE  
CONCEPCIÓN – CHILE  
2021

Profesor guía: CRISTIÁN MOLINA VICUÑA  
Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción



Se autoriza la reproducción parcial o total, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## RESUMEN

Evaluar la integridad estructural y funcional de un sistema mecánico es de vital importancia para evitar fallas catastróficas y la pérdida de recursos que estas conllevan. Esto es posible utilizando los métodos no destructivos (NDT), algunos de los cuales incluso permiten la evaluación *in situ* de las piezas mecánicas. Los métodos más conocidos son las vibraciones mecánicas, radiografía industrial, partículas magnéticas, tintas penetrantes, ultrasonido y emisiones acústicas (AE). Este trabajo se centra en estas últimas, dado que tienen un gran potencial a la hora de detectar eventos incipientes de baja energía, por ejemplo: generación de grietas, impactos y fricción entre elementos, pulsos de presión, etc.

Las AE son utilizadas con el enfoque de las transientes: eventos de corta duración contenidos en la señal. Para su análisis se crea un programa que detecta y almacena las transientes contenidas en señales AE, y posteriormente se extraen indicadores relacionados con las características geométricas de las transientes. Con dichos valores se crean gráficos que permiten visualizar el comportamiento de la señal AE a lo largo de la medición. El método utilizado para la detección se basa en la obtención de la envolvente triangular mediante una serie de suavizados aplicados a la señal AE original.

El objetivo de este trabajo es utilizar las AE para evaluar la integridad estructural de motores hidráulicos de pistones radiales, de los cuales se realiza un análisis detallado de

su funcionamiento. Para ello se utiliza el programa de detección de transientes en señales AE medidas durante la operación de estos motores. Luego, se crea un programa específico para el procesamiento de las transientes de estos motores que permite evaluar el funcionamiento y el estado de salud de los elementos internos del motor a través de distintos tipos de gráficos.

A partir del análisis de los gráficos obtenidos en el programa de motores hidráulicos se concluye que las AE permiten determinar posibles fallas y problemas en el funcionamiento del motor, confirmando la aplicabilidad de esta técnica en estas máquinas.



## NOMENCLATURA

|     |  |
|-----|--|
| A/D | : referido a un convertidor de señales análogo – digital.                    |
| AE  | : emisiones acústicas, del inglés <i>acoustic emissions</i> .                |
| FFT | : transformada rápida de Fourier, del inglés <i>fast Fourier transform</i> . |
| H   | : hilera de un motor hidráulico.   |
| L   | : leva de un motor hidráulico.   |
| NDT | : métodos no destructivos, del inglés <i>non destructive methods</i> .       |
| P   | : pistón de un motor hidráulico.   |
| PPR | : par pistón – rodillo.  |
| RPM | : revoluciones por minuto.   |



## TABLA DE CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1.....</b>                         | <b>1</b>  |
| INTRODUCCIÓN                                   |           |
| 1.1. Descripción del problema .....            | 3         |
| 1.2. Solución propuesta.....                   | 4         |
| 1.3. Hipótesis .....                           | 4         |
| 1.4. Objetivo general .....                    | 5         |
| 1.5. Objetivos específicos .....               | 5         |
| <b>CAPÍTULO 2.....</b>                         | <b>6</b>  |
| EMISIONES ACÚSTICAS                            |           |
| 2.1. ¿Qué son las emisiones acústicas?.....    | 6         |
| 2.2. Medición de emisiones acústicas .....     | 8         |
| 2.3. Transientes en emisiones acústicas .....  | 9         |
| 2.4. Métodos de detección de transientes.....  | 13        |
| <b>CAPÍTULO 3.....</b>                         | <b>15</b> |
| PROGRAMA: DETECCIÓN DE TRANSIENTES             |           |
| 3.1. Funcionamiento general.....               | 15        |
| 3.2. Método de detección de transientes .....  | 16        |
| 3.3. Ejemplo de detección de transientes ..... | 20        |
| 3.4. Rendimiento del programa.....             | 23        |
| <b>CAPÍTULO 4.....</b>                         | <b>24</b> |
| MOTORES HIDRÁULICOS DE PISTONES RADIALES       |           |
| 4.1. Motores hidráulicos .....                 | 24        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2. Motor hidráulico de pistones radiales Hägglunds .....                | 28        |
| 4.3. Lubricación .....  | 36        |
| 4.4. Entradas y salidas de fluido .....                                   | 36        |
| 4.5. Literatura de motores hidráulicos de pistones radiales .....         | 38        |
| 4.6. Medición de AE en motores hidráulicos .....                          | 39        |
| 4.7. Metodología de análisis AE .....                                     | 41        |
| 4.8. Caso de estudio 1: Motor de 2 hileras en buenas condiciones .....    | 54        |
| 4.9. Caso de estudio 2: Motor de 1 hilera con mediciones de presión ..... | 63        |
| <b>CAPÍTULO 5.....</b>  | <b>74</b> |
| CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS   |           |
| 5.1. Conclusiones.....  | 74        |
| 5.2. Perspectivas a futuro.....   | 76        |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>79</b> |
| ANEXO A: ENVOLVENTE TRIANGULAR .....                                      | 79        |
| ANEXO B: REDUCCIÓN POR UMBRAL LOCAL .....                                 | 81        |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Principales fuentes que generan AE.....  | 7  |
| Figura 2. Equipo de medición de emisiones acústicas .....                                  | 9  |
| Figura 3. Transiente AE .....  | 10 |
| Figura 4. Indicadores usuales de las transientes AE.....                                   | 12 |
| Figura 5. Detección durante ráfaga de transientes AE .....                                 | 14 |
| Figura 6. Esquema resumen del Programa: Detección de transientes .....                     | 17 |
| Figura 7. Premisa de detección de transientes.....   | 20 |
| Figura 8. Señal AE de prueba.....  | 21 |
| Figura 9. Valor RMS de las transientes de una señal AE.....                                | 22 |
| Figura 10. Motores hidráulicos de engranajes.....  | 26 |
| Figura 11. Motor hidráulico de paletas .....   | 27 |
| Figura 12. Motores hidráulicos de pistones axiales.....                                    | 27 |
| Figura 13. Pistón y rodillo de leva .....  | 29 |
| Figura 14. Principio de funcionamiento de un motor hidráulico de pistones radiales .....   | 29 |
| Figura 15. Motor hidráulico de pistones radiales de 1 hilera .....                         | 30 |
| Figura 16. Motor hidráulico de pistones radiales de 2 hileras .....                        | 31 |
| Figura 17. Zonas de alta y baja presión en un motor de 10 levas.....                       | 33 |
| Figura 18. Ciclo de alta y baja presión para una fracción del recorrido angular .....      | 34 |
| Figura 19. Corte del motor hidráulico de pistones radiales .....                           | 35 |
| Figura 20. Puertos de entrada y salida de fluido en un motor Hägglunds .....               | 37 |
| Figura 21. Ubicación del sensor AE en el motor Hägglunds .....                             | 39 |
| Figura 22. Señal AE medida en motor hidráulico Hägglunds .....                             | 40 |
| Figura 23. Numeración de pistones (P) y levas (L) en un motor hidráulico.....              | 42 |
| Figura 24. Metodología para el análisis AE. 1 hilera. ....                                 | 44 |
| Figura 25. Metodología para el análisis AE. 2 hileras.....                                 | 45 |
| Figura 26. Referencia para la obtención del orden de activación de los PPR .....           | 46 |
| Figura 27. Asignación de transientes AE principales e intermedias. ....                    | 50 |
| Figura 28. Posibles fallas en un motor hidráulico de pistones radiales. ....               | 53 |
| Figura 29. Caso 1: señal AE en bruto.....  | 55 |
| Figura 30. Caso 1: envolvente de transientes AE principales e intermedias. (Hilera 1)..... | 56 |
| Figura 31. Caso 1: envolvente de transientes AE principales e intermedias. (Hilera 2)..... | 56 |
| Figura 32. Caso 1: transientes AE principales e intermedias de los pistones 2 – 10 .....   | 57 |
| Figura 33. Caso 1: amplitud <i>peak</i> de las transientes AE principales.....             | 58 |
| Figura 34. Caso 1: amplitud <i>peak</i> de las transientes AE intermedias.....             | 59 |
| Figura 35. Caso 1: velocidad de rotación .....   | 60 |
| Figura 36. Caso 1: espectro FFT temporal de la envolvente de la señal AE .....             | 60 |
| Figura 37. Caso 1: espectro orden de la envolvente AE remuestreada .....                   | 61 |
| Figura 38. Caso 2: señal AE en bruto.....  | 63 |
| Figura 39. Caso 2: envolvente de transientes AE principales e intermedias .....            | 64 |
| Figura 40. Caso 2: transientes AE principales e intermedias de los pistones 1 – 9 .....    | 65 |
| Figura 41. Caso 2: transientes AE principales e intermedias de los pistones 7 – 15 .....   | 65 |
| Figura 42. Caso 2: amplitud <i>peak</i> de las transientes AE principales.....             | 66 |
| Figura 43. Caso 2: amplitud <i>peak</i> de las transientes AE intermedias.....             | 66 |
| Figura 44. Caso 2: presión de descarga y drenaje con señal AE .....                        | 67 |
| Figura 45. Caso 2: velocidad de rotación, obtenida de las transientes AE principales.....  | 68 |
| Figura 46. Caso 2: espectro FFT temporal de la envolvente de la señal AE .....             | 68 |
| Figura 47. Caso 2: Espectro orden de la envolvente remuestreada de la señal AE.....        | 69 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 48. Caso 2: transientes principales asociadas a los pistones 8 – 16 y 3 – 11..... | 71 |
| Figura 49. Caso 2: presión de descarga y RPM.....  | 71 |
| Figura 50. Anexo A: proceso de detección para señal AE con una transiente aislada. ....  | 79 |
| Figura 51. Anexo A: proceso de detección para señal AE con múltiples transientes.....    | 80 |
| Figura 52. Anexo B: esquema del procedimiento del umbral local.....                      | 81 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Especificaciones del equipo utilizado para las pruebas de rendimiento .....                   | 23 |
| Tabla 2. Resultados de las pruebas de rendimiento.....   | 23 |
| Tabla 3. Parámetros de medición .....  | 39 |
| Tabla 4. Cantidad de transientes en la señal AE durante 1 revolución en motores de 1 y 2 hileras ..... | 41 |
| Tabla 5. Asignación de pistones a cada PPR.....  | 43 |
| Tabla 6. Orden de activación de los PPR durante 1 revolución del bloque cilíndrico .....               | 47 |
| Tabla 7. Frecuencia y modulación esperable en transientes principales .....                            | 51 |
| Tabla 8. Frecuencia y modulación esperable en transientes intermedias anormales (Parte 1) .....        | 52 |
| Tabla 9. Frecuencia y modulación esperable en transientes intermedias anormales (Parte 2) .....        | 53 |



# CAPÍTULO 1

## Introducción

La industria es un entorno en que se requieren altos índices de confiabilidad. Esto se ha manifestado con especial fuerza debido a los grandes acontecimientos ocurridos durante el siglo XX (1° y 2° Guerra Mundial, Guerra Fría) y por la aparición del modelo de producción en serie. Estos factores han obligado a la industria a mejorar significativamente sus métodos de diseño, fabricación, control de calidad, montaje, mantención y reparación. Si además se considera el factor medioambiental, el que da especial hincapié a la economía de los recursos utilizados, se tiene como resultado un contexto industrial que busca altos estándares de calidad en la fabricación, cuidado y mantenimiento de los equipos y piezas producidas.

Los métodos no destructivos (NDT) surgen como respuesta a la necesidad de evaluar la evolución del daño en equipos mecánicos y así mejorar los procedimientos de mantención. Entre los métodos NDT más conocidos se encuentran [1]: medición de las vibraciones producidas durante el funcionamiento del equipo, utilización de radiografía industrial para obtener imágenes internas del equipo, utilización de tintas penetrantes y partículas magnéticas para detectar imperfecciones o defectos superficiales en el material, utilización de ondas de ultrasonido para detectar fallas internas en los materiales, y

medición de emisiones acústicas (AE) durante el funcionamiento del equipo, siendo este último el método NDT utilizado en este trabajo.

Entre las principales ventajas de las AE se tiene que se pueden medir durante el funcionamiento de los equipos, permitiendo la detección de fallas sin necesidad de realizar una detención; el equipo de medición es portátil, por lo que no es necesario desmontar la pieza a analizar; la detección de eventos es incipiente porque las AE son sensibles a eventos de baja liberación de energía, siendo esta última la principal ventaja en comparación otros métodos NDT.

Entre las mayores desventajas de las AE se tiene que son menos intuitivas que otros métodos, dado que el resultado de la medición AE es una señal en función del tiempo (mientras que, por ejemplo, en la radiografía industrial es una imagen); para medir correctamente una señal AE se requiere de una alta tasa de muestreo (por encima de 1 MHz), lo que se traduce en señales de gran tamaño y en un procesamiento que demanda una mayor cantidad de recursos informáticos en comparación a señales de otras naturalezas (como las de aceleración, medida a una tasa de muestreo de, por ejemplo, 5 kHz); debido a la gran sensibilidad de las AE, son propensas a *ensuciarse* con ruido electrónico y con ruido externo al equipo de interés; el sensor AE necesita colocarse en una zona de la pieza que sea plana, limpia y sin irregularidades.

A pesar de las desventajas ya mencionadas, se decide trabajar con las AE principalmente por su capacidad para detectar eventos de baja energía, lo cual las convierte en un método ideal para utilizar en ensayos de ruptura y en equipos que

involucran una baja liberación de energía, como lo son las máquinas de muy baja velocidad.

La mayor parte de la información útil de las AE está contenida en las transientes: rápidas variaciones de amplitud en la señal AE que representan la ocurrencia de algún evento en el equipo mecánico. A partir de estas se calculan una serie de valores, llamados indicadores, que permiten evaluar la progresión del daño y que se relacionan con el funcionamiento de los equipos mecánicos.

### **1.1. Descripción del problema**



El método actualmente más utilizado para detectar transientes es el método del umbral fijo [2] que, aunque simple en su implementación, presenta importantes dificultades al trabajar en señales AE que contienen ráfagas de transientes (grandes cantidades de transientes ocurridas en un intervalo de tiempo muy corto). Esto provoca que el proceso de detección no sea del todo preciso, detectando incorrectamente transientes con las que se calculan indicadores que no representan correctamente el comportamiento de la señal AE analizada, dificultando y entorpeciendo los trabajos investigativos que utilicen este método NDT. Para solucionar este problema, Unnthorsson [3] propone la utilización de una envolvente triangular (basada en la simplificación progresiva de la señal AE) para la detección de transientes, enfoque que complejiza el procesamiento de la señal pero que se acerca a una solución del problema. En dicha publicación se explica, a grandes rasgos, el

procedimiento antes mencionado, pero no se presenta ningún algoritmo para realizar esta tarea. De aquí surge el problema que se quiere abordar: si se desea utilizar el enfoque del estudio de transientes para analizar correctamente una señal AE, es necesario un programa computacional que detecte correctamente las transientes contenidas en señales AE.

## **1.2. Solución propuesta**

Se propone la creación de un algoritmo de detección de transientes basado en la obtención de la envolvente triangular propuesta por Unnthorsson [3]. Posteriormente se desarrolla un método para analizar la condición mecánica de motores hidráulicos de pistones radiales que utiliza las transientes AE detectadas con el algoritmo antes mencionado. Con estos resultados se pretende relacionar el estado de funcionamiento de estas máquinas con las transientes AE.

## **1.3. Hipótesis**

Las transientes correctamente detectadas y almacenadas, obtenidas de la medición de la señal AE durante el funcionamiento de motores hidráulicos de pistones radiales, permiten detectar y diagnosticar las causas de daños mecánicos y, potencialmente, el monitoreo de su evolución.

#### 1.4. Objetivo general

Obtener indicadores y gráficos a partir de las transientes detectadas en señales AE medidas durante el funcionamiento motores hidráulicos de pistones radiales, y relacionarlos con el estado de funcionamiento del equipo.

#### 1.5. Objetivos específicos

- OE1: (AE) Crear un algoritmo (Programa 1) que detecte y almacene las transientes contenidas en una señal AE.
- OE2: (AE) Obtener indicadores con las transientes detectadas en la señal de emisiones acústicas. Dichos indicadores se calculan en base a las características geométricas de las transientes.
- OE3: (MH) Analizar el funcionamiento de un motor hidráulico de pistones radiales.
- OE4: (MH) Crear un algoritmo (Programa 2) para el procesamiento de las transientes (obtenidas del Programa 1) contenidas en señales AE enfocado en motores hidráulicos de pistones radiales.
- OE5: (MH) Identificar la fuente de las transientes anormales en motores hidráulicos apoyándose en lo obtenido en OE3 y OE4 a partir de mediciones AE disponibles.

AE: Emisiones acústicas, MH: Motores Hidráulicos.

## CAPÍTULO 2

### Emisiones acústicas

En este capítulo se explicará qué son las AE y cuáles son sus principales fuentes generadoras, se detallará el proceso de medición y los equipos que intervienen, y se explicará qué son las transientes y cuáles son los principales métodos con que se detectan actualmente.



#### 2.1. ¿Qué son las emisiones acústicas?

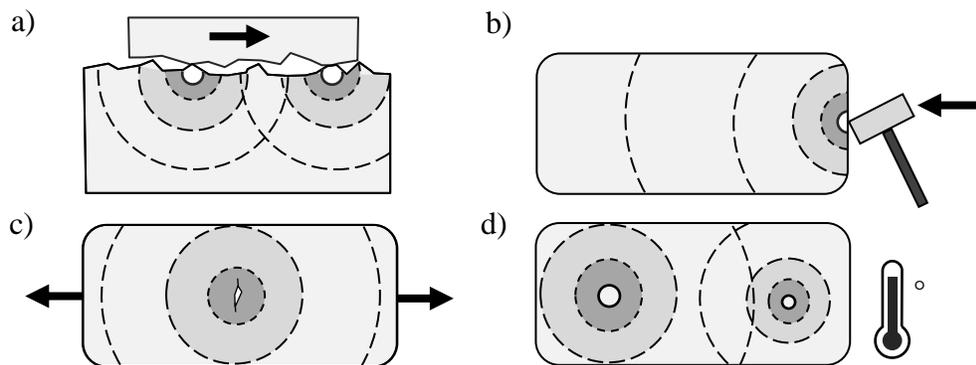
Las emisiones acústicas (AE, del inglés *acoustic emissions*) se pueden definir como ondas de esfuerzos elásticos transientes [3], es decir:

- Que las AE sean ondas significa que son la propagación de una perturbación, lo que involucra el transporte de energía a través de un medio.
- La perturbación que se propaga es un esfuerzo.
- Los esfuerzos que se propagan son elásticos, es decir, estos generan deformaciones no permanentes en el medio de propagación.
- Las emisiones acústicas son transientes: pierden intensidad a medida que transcurre el tiempo.

La propagación de las AE sufre de los fenómenos típicos de las ondas, por lo tanto, al llegar a un medio con distinta densidad, una porción de la AE se refleja, otra se refracta y otra se disipa.

Hay dos tipos de fuentes que pueden generar AE (ver Figura 1):

- Internas al material, debido a cambios micro—estructurales en el material mismo. Dichos cambios pueden ser provocados por la aplicación de cargas externas o por variación de temperatura. Por ejemplo, la formación y crecimiento de grietas en el material durante un ensayo de tracción, en cuyo caso la AE representa la energía liberada en la ruptura de la estructura.
- Externas al material, debido al contacto con otros elementos (sólidos o fluidos), por ejemplo, el roce entre dos superficies, contacto entre los elementos rodantes de un rodamiento, cargas de impacto o los pulsos de presión debido al giro de los álabes de un rotor.

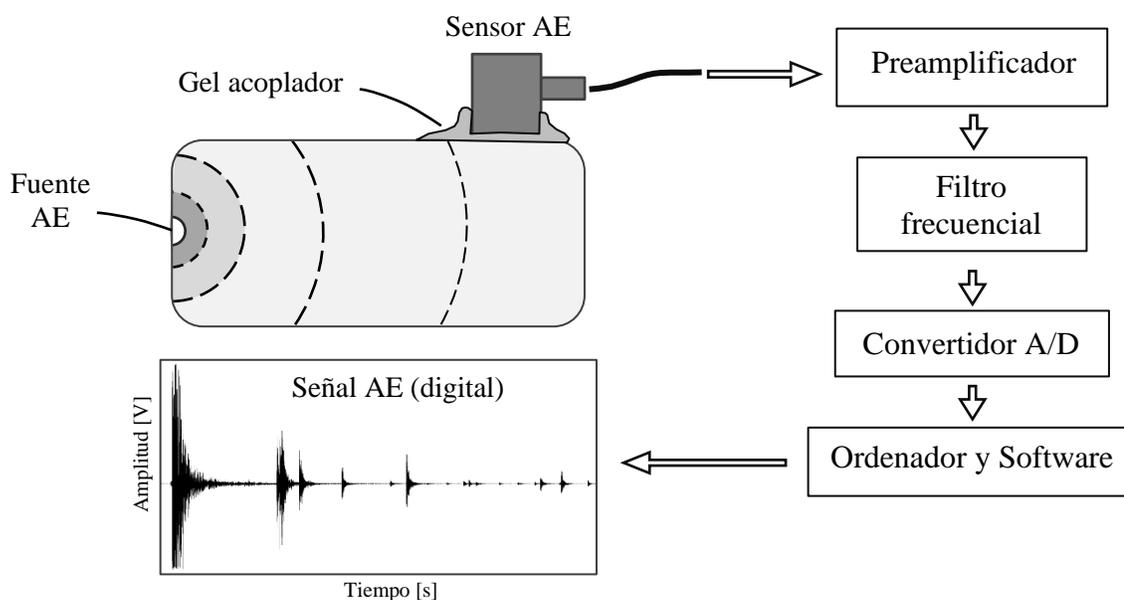


**Figura 1.** Principales fuentes que generan AE. a) Roce, b) Cargas de impacto, c) Formación de grietas, d) Cambios de temperatura. Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Medición de emisiones acústicas

Los equipos que participan en la medición y preprocesamiento de las AE se muestran en la Figura 2, el proceso se detalla a continuación:

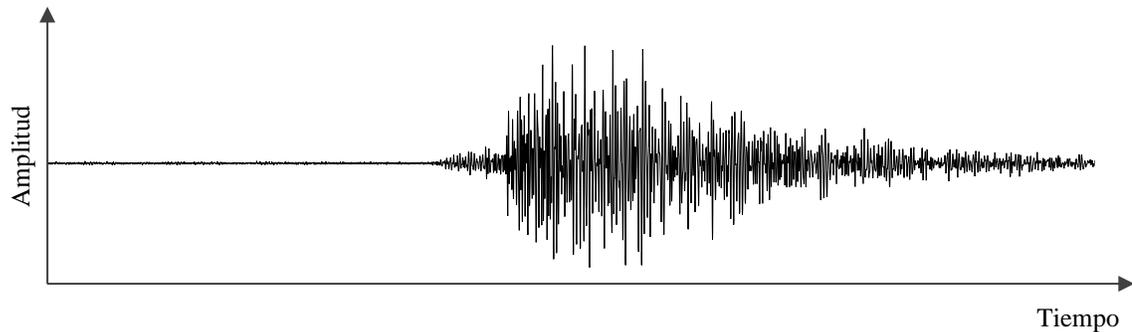
- Las AE son generadas por una fuente, como se vio en la Figura 1.
- Las AE se propagan a través del elemento mecánico. Durante la propagación, las AE sufren el fenómeno de atenuación: pérdida de energía debido al desplazamiento de la onda en un medio, disminuyendo su amplitud.
- Las AE pasan por el gel acoplador, el que cumple la función de facilitar su desplazamiento entre el elemento mecánico y el sensor AE. Esto lo logra llenando los pequeños espacios de aire entre el elemento y el sensor.
- Las AE son medidas por el sensor AE. Este dispositivo está formado por un elemento piezoeléctrico, el cual genera una diferencia de potencial cuando es sometido a un esfuerzo mecánico. Debido a esto, las AE son medidas en volt [V].
- Las AE pasan por un preamplificador análogo, esto para aumentar su amplitud y mejorar la relación señal-ruido.
- Las AE pasan por un filtro frecuencial, esto para evitar el *aliasing* y eliminar frecuencias indeseadas propias de los equipos.
- Las AE preamplificadas y filtradas llegan al convertidor A/D, el cual transforma las AE continuas (análoga) en una señal AE discreta (digital).
- Finalmente, la señal AE llega al centro de monitoreo (ordenador y software). En este paso la señal es almacenada y posteriormente procesada.



**Figura 2.** Equipo de medición de emisiones acústicas. Fuente: elaboración propia.

### 2.3. Transientes en emisiones acústicas

Uno de los enfoques más populares a la hora de procesar señales AE es el análisis de la información relacionada con las transientes (también llamadas eventos o hits) contenidas en la señal AE. Una transiente es una rápida variación de amplitud que representa la ocurrencia de un evento en el elemento analizado (ver fuentes AE en sección 2.1) y que disminuye su amplitud con el paso del tiempo (ver Figura 3). En sistemas con movimientos cíclicos una misma fuente puede generar transientes periódicamente, por ejemplo, un rodamiento con una picadura en alguno de sus elementos; mientras que, durante la formación de grietas, las transientes son generadas cada vez que una grieta se forma, se propaga, o se producen impactos debido a su cierre repentino.



**Figura 3.** Transiente AE. Fuente: elaboración propia.

Cada método de detección de transientes utiliza su propio procedimiento, sin embargo, todos coinciden en que las transientes detectadas deben tener una amplitud mayor o igual a un valor definido por el usuario. Dicho valor es conocido como umbral de detección. A partir de cada transiente identificada se puede extraer una serie de indicadores que permiten analizar cómo evolucionan las transientes a medida que transcurre la medición AE; o clasificarlas según algún criterio en particular (por ejemplo, aislar las que tengan una energía mayor a cierto valor) y así distinguir distintas fuentes AE dentro de una misma señal o para excluir transientes que no son de interés.

Los indicadores se utilizan principalmente para resumir la información contenida de una cantidad  $n$  de transientes y así evitar revisarlas individualmente (dependiendo de la duración de la medición AE, pueden detectarse fácilmente una cantidad superior a 1000 transientes). A continuación se detallan los indicadores AE más utilizados [4] (Figura 4):

- Amplitud *peak* ( $A$ ), corresponde al mayor voltaje medido en la transiente.

- *Risetime* (RT), es el tiempo de subida de la transiente, desde que esta inicia (\*) hasta el instante de máxima amplitud.
- *Downtime* (DT), es el tiempo de bajada de la transiente, desde el instante de máxima amplitud hasta que esta termina (\*).
- Duración (D) total de la transiente.

$$D = RT + DT \quad (1)$$

- *MARSE energy* (*Measured Area under the Rectified Signal Envelope*), corresponde al área bajo la curva de la envolvente de la señal. Es proporcional a la energía de la transiente en la señal AE.
- *True Energy*, corresponde al área bajo la curva de la envolvente de la señal al cuadrado. Representa la energía verdadera de la transiente AE.
- *Counts*, corresponde a la cantidad de veces que la transiente supera un valor umbral definido.
- *Frecuencia promedio* (*average frequency*, AF), corresponde a la frecuencia de la transiente asumiendo que esta se comporta como una sinusoidal amortiguada simple:

$$AF = \frac{\text{Counts}}{D} \quad (2)$$

- *RMS* (*Root Mean Square*), corresponde a la raíz del promedio de los valores de la amplitud de la transiente al cuadrado.

---

\* El inicio y término de una transiente se define cuando esta cruza el umbral de detección.

- RA, cociente entre el *risetime* y la amplitud *peak*.

$$RA = \frac{RT}{A} \quad (3)$$

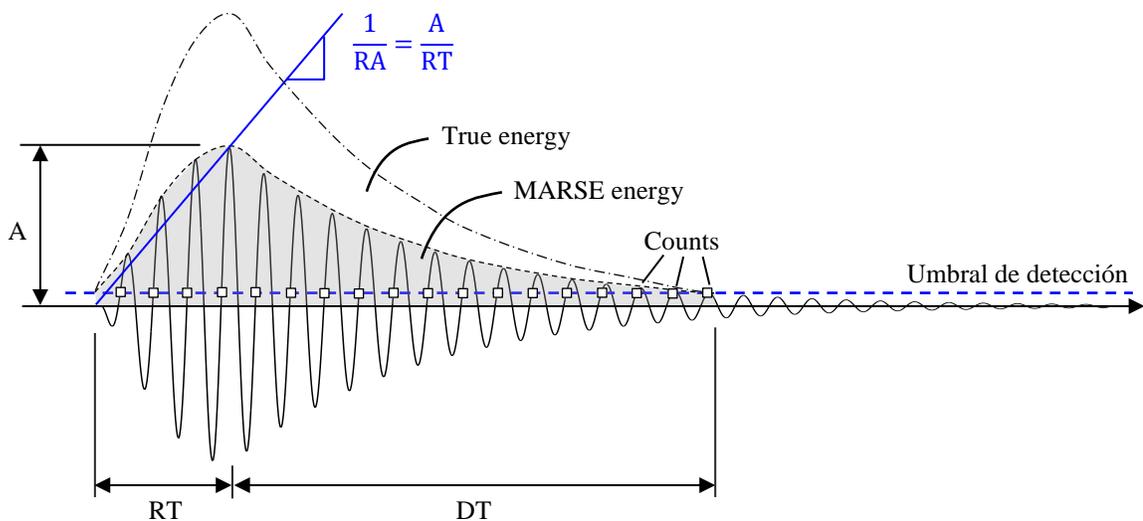
- Factor de cresta (*crest factor*, CF), cociente entre la amplitud *peak* y el RMS.

$$CF = \frac{A}{RMS} \quad (4)$$

- b – value, propuesto por Gutenberg – Richter en el área de la sismología [5]. Se utiliza para analizar los procesos de fractura.

$$\log_{10} N = a + b \frac{A_{dB}}{20} \quad (5)$$

El b – value se calcula para cada transiente, en donde:  $A_{dB}$  es la amplitud de la transiente en decibeles [dB], N es la cantidad de transientes con una amplitud mayor a  $A_{dB}$ , b es el b – value y a es una constante empírica. Un bajo b-value indica que el sistema se acerca a una falla inminente.



**Figura 4.** Indicadores usuales de las transientes AE. Fuente: elaboración propia

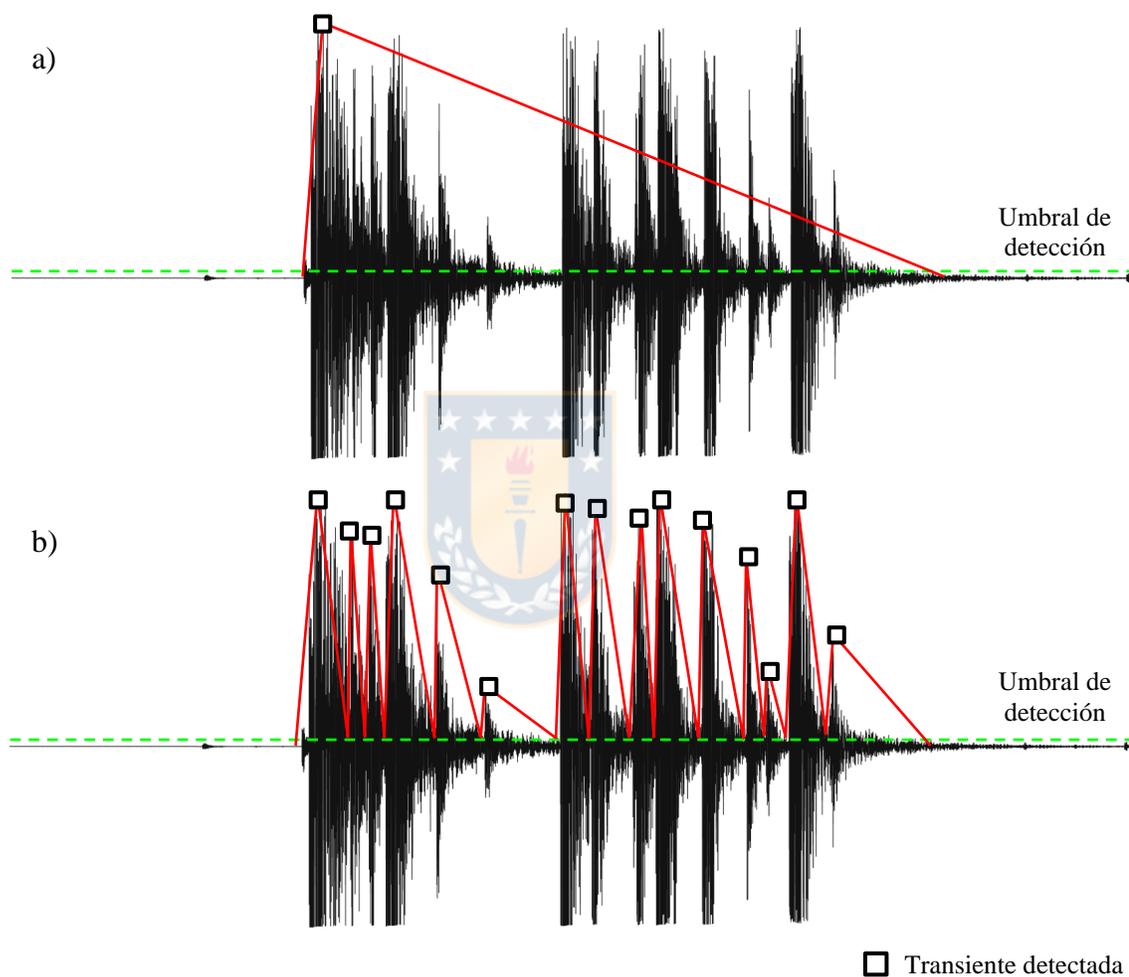
## 2.4. Métodos de detección de transientes

Leaman et al. [6] recopilan tres de los métodos de detección de transientes más utilizados:

- Método del umbral fijo, el cual consiste en detectar los puntos de la señal AE que superen un valor umbral fijo ya definido.
- Método de la ventana RMS, el cual se basa en dividir la señal en ventanas de igual longitud temporal y, posteriormente, calcular el valor RMS con el trozo de la señal AE contenida en cada una de ellas. Luego, se analizan las fluctuaciones del valor RMS para la detección de transientes.
- Método de la envolvente diferencial, el cual consiste en la aplicación de un filtro pasa bajo a la señal AE rectificada. Posteriormente, a la envolvente obtenida se le resta una versión desfasada de sí misma (obteniéndose la envolvente diferencial). Finalmente se utiliza un valor umbral para la detección de transientes.

Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas, sin embargo, el más utilizado (y el que podría considerarse como convencional) es el método del umbral fijo. El principal problema que presenta este método se manifiesta durante las ráfagas: gran cantidad de transientes que ocurren en un período de tiempo muy corto. Circunstancias en las que el método no es capaz de diferenciar transientes porque el valor medio de la señal AE supera el umbral de detección de forma continuada, esto debido a como está definido el método del umbral fijo. Como consecuencia, las diferentes transientes que forman parte de las ráfagas son detectadas y almacenadas como una única gran transiente. En la

Figura 5a se ejemplifica esta situación. En la Figura 5b se muestra el resultado de un método de detección de transientes ideal, es decir, en donde las transientes son correctamente detectadas y separadas.



**Figura 5.** Detección durante ráfaga de transientes AE. a) Método del umbral fijo, b) Método de detección ideal. Fuente: elaboración propia.

## CAPÍTULO 3

### Programa: Detección de transientes

El presente capítulo explica la metodología utilizada al crear el primer programa utilizado en este informe, cuyo objetivo es detectar transientes de forma automática en señales AE. Luego se usa el programa en una señal AE para finalmente calcular uno de los indicadores a partir de las transientes detectadas.



#### 3.1. Funcionamiento general

El programa creado debe cumplir con las siguientes tareas:

- Detectar las transientes contenidas en una señal AE.
- Almacenar individualmente las transientes detectadas.

Con respecto a la gestión de los archivos, se opta por cargar la señal AE desde la carpeta que el usuario desee. Los archivos resultantes pueden ser almacenados en una carpeta definida por el usuario. El programa es creado en MATLAB.

Debido a la alta frecuencia de muestreo de las señales AE, se recomienda que estas estén separadas en bloques de, por ejemplo: 1 segundo de duración, esto para que el programa las procese de forma secuencial y así optimizar el uso de memoria del ordenador.

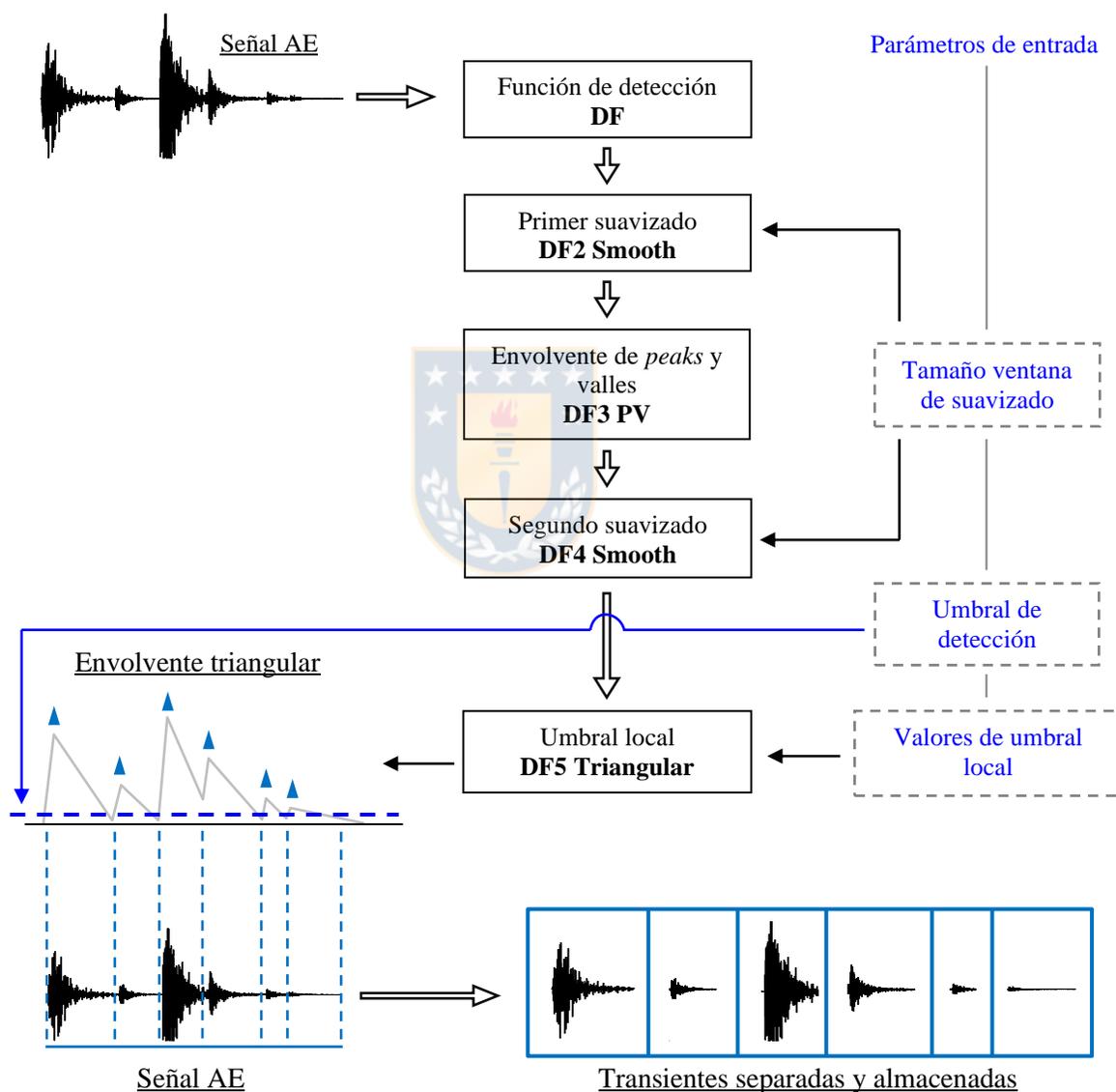
### 3.2. Método de detección de transientes

El método de detección de transientes del programa sigue el enfoque desarrollado por Unnthorsson en [3], el cual se basa en la obtención de la envolvente triangular mediante la simplificación progresiva de la señal AE. Las etapas del proceso se explican a continuación:

1. DF, función de detección. Se aplica la Transformada de Hilbert a la señal AE, a dicho resultado se calcula el valor absoluto.
2. DF2 Smooth, primer suavizado. Se aplica un primer suavizado a la señal DF utilizando una ventana de ponderación.
3. DF3 PV, envolvente de *peaks* y valles. Se construye una nueva señal utilizando solo los *peaks* y valles de la señal DF2 Smooth.
4. DF4 Smooth, segundo suavizado. Aplicación de un segundo proceso de suavizado a DF3 PV.
5. DF5 Triangular, envolvente triangular. A partir de DF4 Smooth se construye una señal sólo con *peaks* y valles y, posteriormente, se aplica el proceso de reducción por umbral local.

El proceso de reducción por umbral local busca reducir la cantidad de puntos de la señal manteniendo, a grandes rasgos, su forma original (ver Anexo B). Esto se logra utilizando un valor de amplitud (umbral local) con el cual se compara cada punto con su respectiva vecindad, decidiendo si este aporta o no a la construcción de la envolvente de la señal AE. Este proceso se lleva a cabo múltiples veces con distintos valores de umbral

local. El resultado es una envolvente triangular simplificada de la señal AE original. En la Figura 6 se muestra un esquema resumen del proceso de detección. En el Anexo A se muestra detalladamente la evolución de la señal AE a medida que se realiza el proceso.



**Figura 6.** Esquema resumen del Programa: Detección de transientes.

Fuente: elaboración propia.

Durante el proceso se utilizan dos umbrales distintos, cada uno con una función distinta:

- Umbral de detección: corresponde al valor de amplitud *peak* mínima para que una transiente sea detectada. Este valor es único a lo largo de la señal y es definido por el usuario. Se fija justo por sobre el nivel de ruido de la señal DF4 Smooth. Este valor se relaciona con el sensor utilizado y con la cantidad de ruido en la señal.
- Umbral local: corresponde al valor de amplitud con el cual se compara cada punto de la señal DF4 Smooth con su respectiva vecindad, por ello se denomina “local”.

El proceso de reducción por umbral local tiene las siguientes características:

- 1) El procedimiento es iterativo y con valores de umbral local que aumentan progresivamente, mejorando la fidelidad de la envolvente triangular obtenida.
- 2) Los valores del umbral local dependen de la zona en que se esté realizando el procedimiento. Esto permite que el proceso se acomode a las condiciones existentes en cada zona de la señal AE.

El usuario define el porcentaje con que se calcula el umbral local más grande de cada zona de la señal, definido como:  $K_{\max}$ % de la amplitud máxima en la zona analizada de la señal DF4.

Por ejemplo, si  $K_{\max} = 3\%$  y la amplitud máxima en la zona analizada es igual a 10 V, entonces la reducción por umbral local se realizará, en dicha zona, 3 veces:

- $K = 1\%$ , Valor umbral local =  $0,01 \cdot 10V = 0,1 V$

- $K = 2\%$ , Valor umbral local =  $0,02 \cdot 10V = 0,2 V$
- $K = 3\%$ , Valor umbral local =  $0,03 \cdot 10V = 0,3 V$

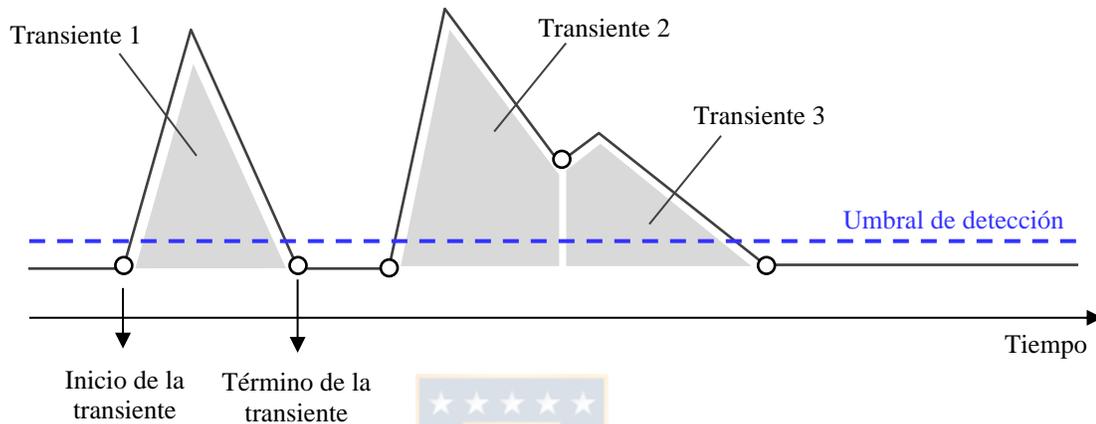
Los parámetros de entrada que el programa necesita para la detección de transientes se detallan a continuación:

- Umbral de detección: corresponde al valor de amplitud *peak* mínimo que debe tener una transientes para que sea detectada. Se define a partir del nivel de ruido en la señal DF4 Smooth.
- Tamaño ventana suavizado: cantidad de puntos de la ventana de suavizado en DF2 y DF4.
- Porcentaje umbral local máximo: el cual se define como el  $K_{\max}\%$  de la amplitud máxima en la zona de trabajo de la señal DF4 Smooth.

La premisa para la detección de transientes es que, con el procedimiento explicado anteriormente, todas las transientes válidas quedan representadas en la envolvente triangular en forma de triángulos, en donde los *peaks* que tengan una amplitud mayor o igual al umbral de detección representan la aparición de una transiente y, las bases del triángulo definen los instantes de inicio y término de dichas transientes, ver Figura 7. Finalmente, las transientes detectadas son almacenadas y quedan preparadas para el postprocesamiento que el usuario desee realizar.

La detección y almacenamiento de las transientes además involucra una reducción de la cantidad de datos a procesar, dado que, en comparación con la señal AE original, el

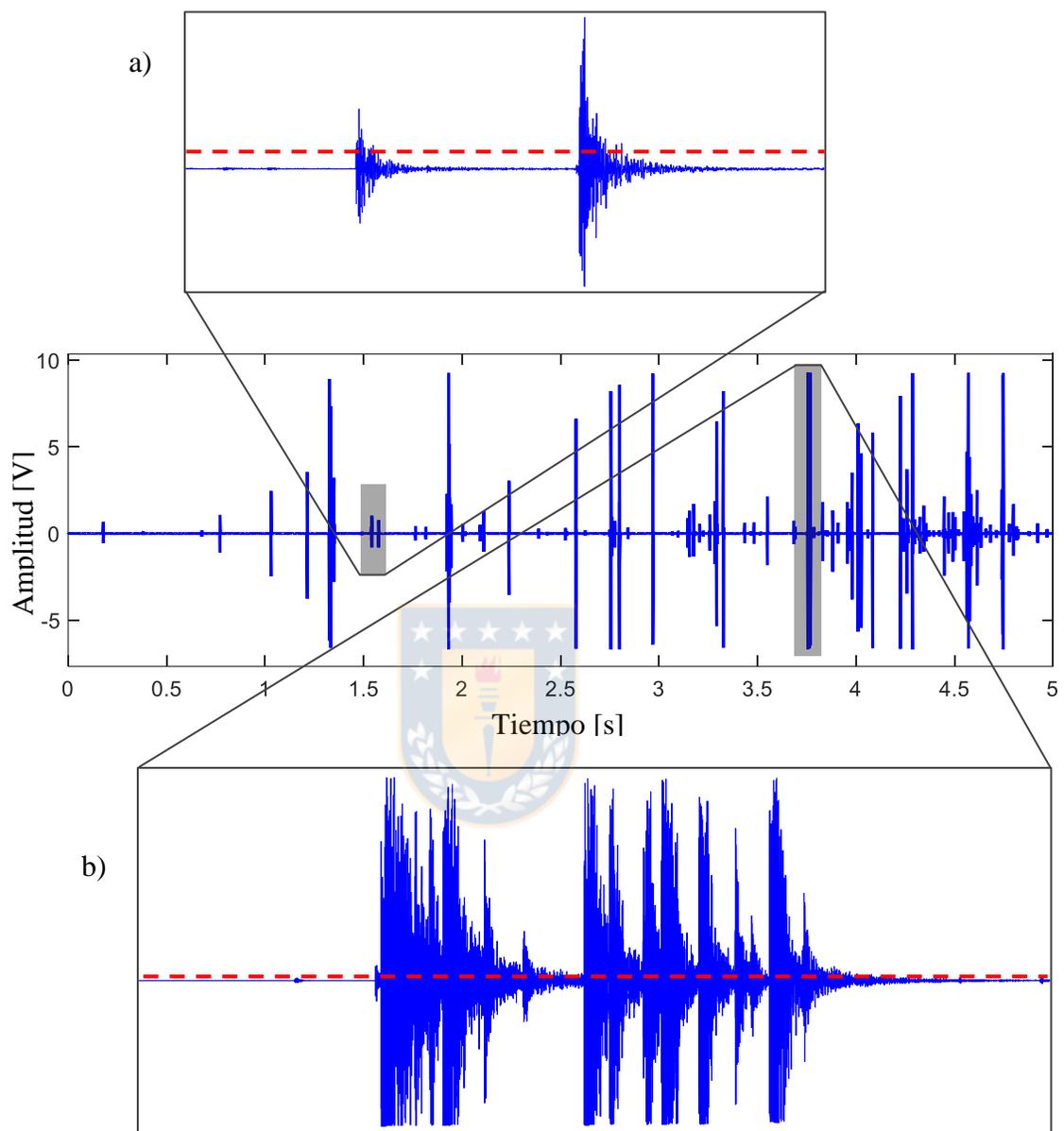
nuevo paquete de datos (transientes separadas individualmente) no incluye las zonas en que hay solo ruido.



**Figura 7.** Premisa de detección de transientes. Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Ejemplo de detección de transientes

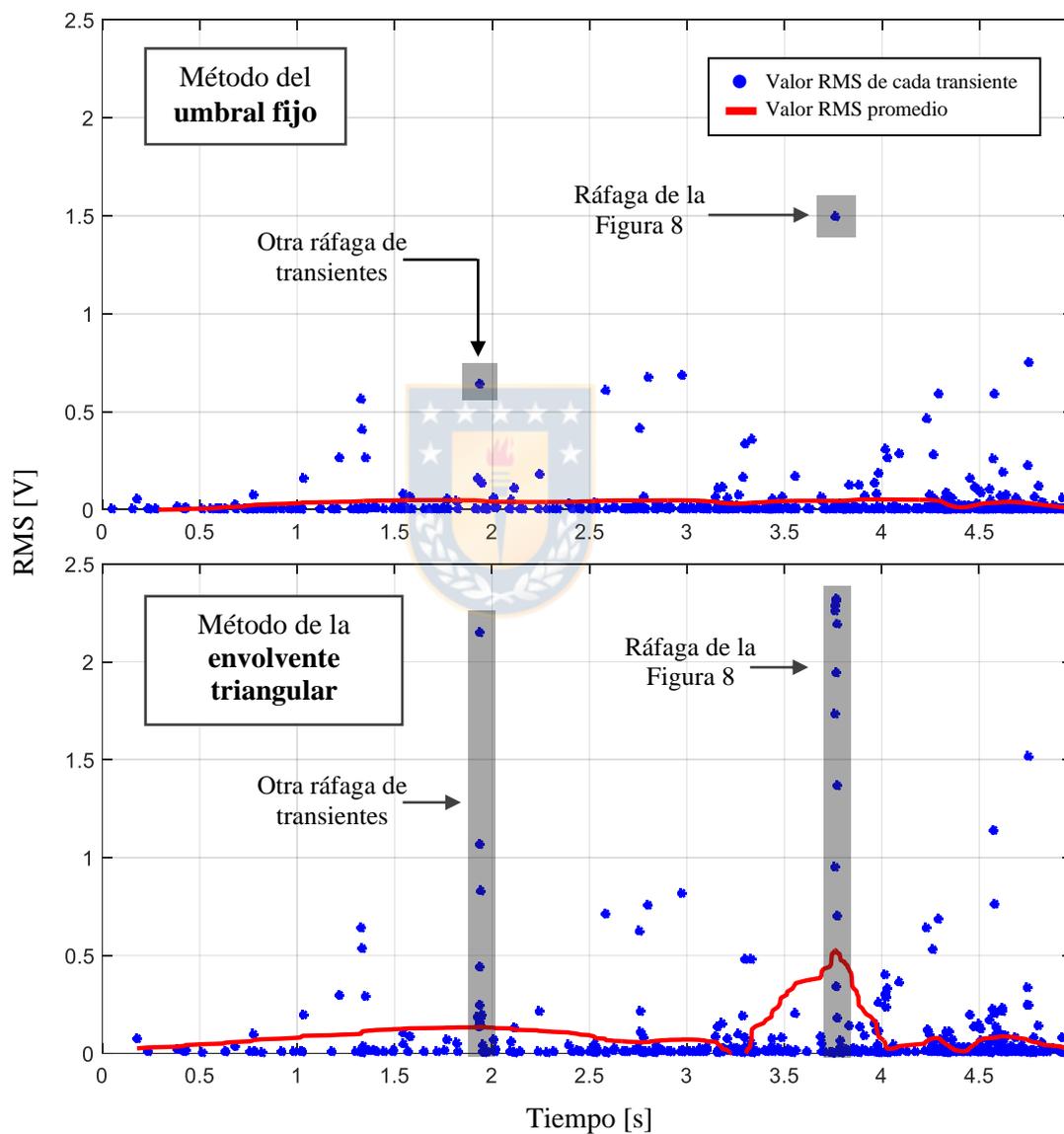
Se selecciona una señal AE que contenga al menos una ráfaga de transientes para probar el método del umbral fijo y el de la Envolvente Triangular. La señal seleccionada tiene una duración de 5 segundos, una frecuencia de muestreo de 2 MHz y es medida durante un ensayo de ruptura de una probeta de material compuesto, el sensor AE utilizado es un Kistler 8152B211. En la Figura 8 se aprecia la señal AE utilizada.



**Figura 8.** Señal AE de prueba. a) Transientes aisladas, b) Ráfaga de transientes. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 9 se calcula el indicador valor RMS a partir de las transientes detectadas en la señal AE de la Figura 8 utilizando el método del umbral fijo y el Programa basado en la envolvente triangular. Se aprecia que la curva RMS promedio obtenida este último

método, es decir, con las transientes correctamente detectadas, permite representar con mayor fidelidad el comportamiento de la señal AE.



**Figura 9.** Valor RMS de las transientes de una señal AE utilizando diferentes métodos de detección. Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Rendimiento del programa

Se realizan pruebas de rendimiento del programa durante el procesamiento de señales AE con distinta cantidad de bloques (1 segundo de duración c/u) a una frecuencia de muestreo de 1 MHz. En la Tabla 1 se muestran las especificaciones del equipo utilizado.

**Tabla 1.** Especificaciones del equipo utilizado para las pruebas de rendimiento.

|                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| Marca             | : notebook ASUS            |
| Sistema operativo | : Windows 10               |
| Procesador        | : Intel Core i5 7300HQ     |
| Memoria RAM       | : 8 GB DDR4                |
| Almacenamiento    | : Disco duro 1 TB 7200 RPM |

En la Tabla 2 se muestran los resultados de las pruebas. El tiempo que tarda el programa se contabiliza desde la lectura de la señal AE hasta el almacenamiento de las transientes detectadas. Es posible observar que el tiempo necesario para el procesamiento aumenta linealmente con la cantidad de transientes detectadas.

**Tabla 2.** Resultados de las pruebas de rendimiento.

| Cantidad de bloques de la señal AE | Tamaño señal AE total | Memoria RAM utilizada por MATLAB | Uso de procesador promedio | Tiempo transcurrido | Transientes detectadas |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| 1                                  | 1,9 MB                | 1984                             | 42%                        | 0,55 s              | 34                     |
| 10                                 | 19,0 MB               | 2230                             | 80%                        | 4,72 s              | 281                    |
| 100                                | 190,0 MB              | 2565                             | 70%                        | 47,10 s             | 2845                   |

## CAPÍTULO 4

### Motores hidráulicos de pistones radiales

En este capítulo se presenta una breve introducción acerca de los motores hidráulicos, luego se explica el funcionamiento de un motor hidráulico de pistones radiales Hägglunds y finalmente se muestra el postprocesamiento realizado a señales AE medidas en dichos motores.



#### 4.1. Motores hidráulicos

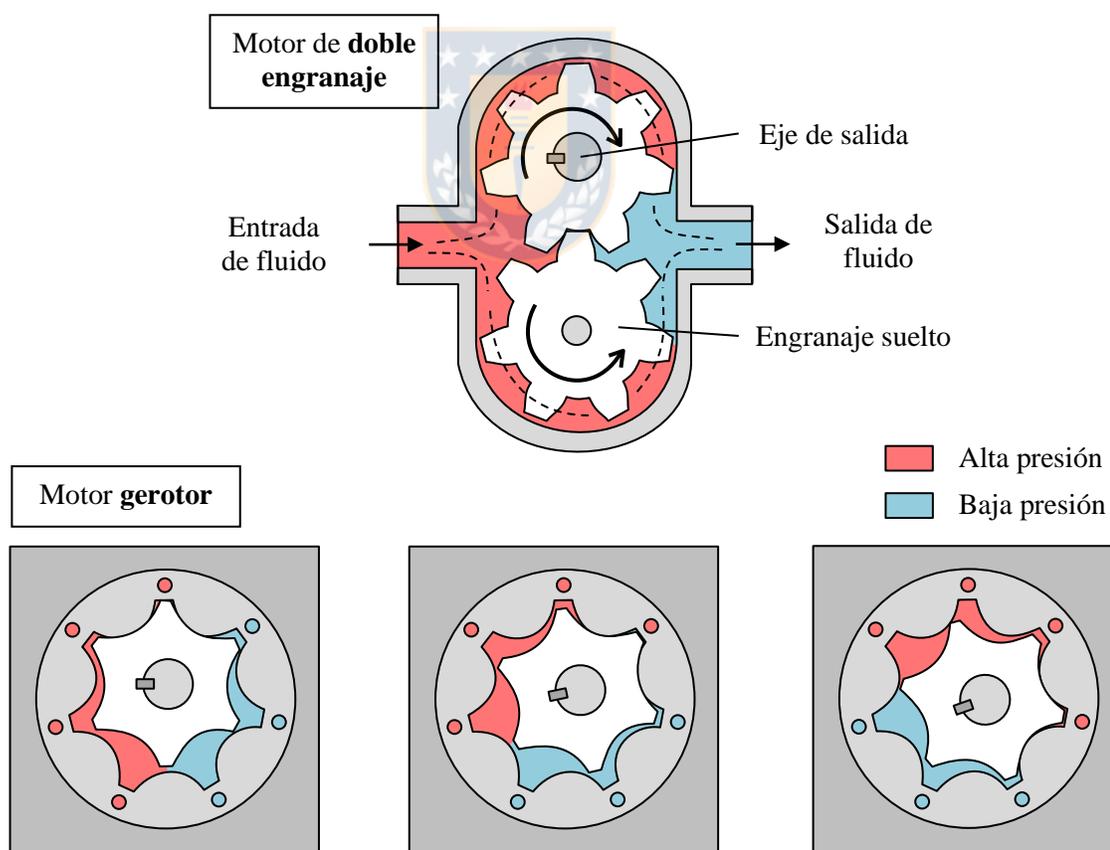
Los motores hidráulicos son máquinas que transforman la energía hidráulica (presión hidrostática) de un fluido en energía mecánica. Estas máquinas cumplen la función opuesta a las bombas hidráulicas y son equivalentes a las turbinas hidráulicas, es decir, le quitan la energía al fluido de trabajo y la convierten en energía mecánica rotatoria. La principal diferencia con estas últimas es la naturaleza de la función a realizar: las turbinas son diseñadas para obtener la energía mecánica (y posteriormente, transformarla en energía eléctrica) a partir de cursos de agua naturales; mientras que los motores hidráulicos están diseñados para la utilización directa de la energía mecánica en el lugar de emplazamiento del motor, siendo el fluido de trabajo (aceite) impulsado mediante una bomba hidráulica. Una de las principales ventajas de los motores hidráulicos es que, a

diferencia de los motores eléctricos, pueden entregar altos torques a bajas velocidades de rotación, todo esto con una buena eficiencia energética.

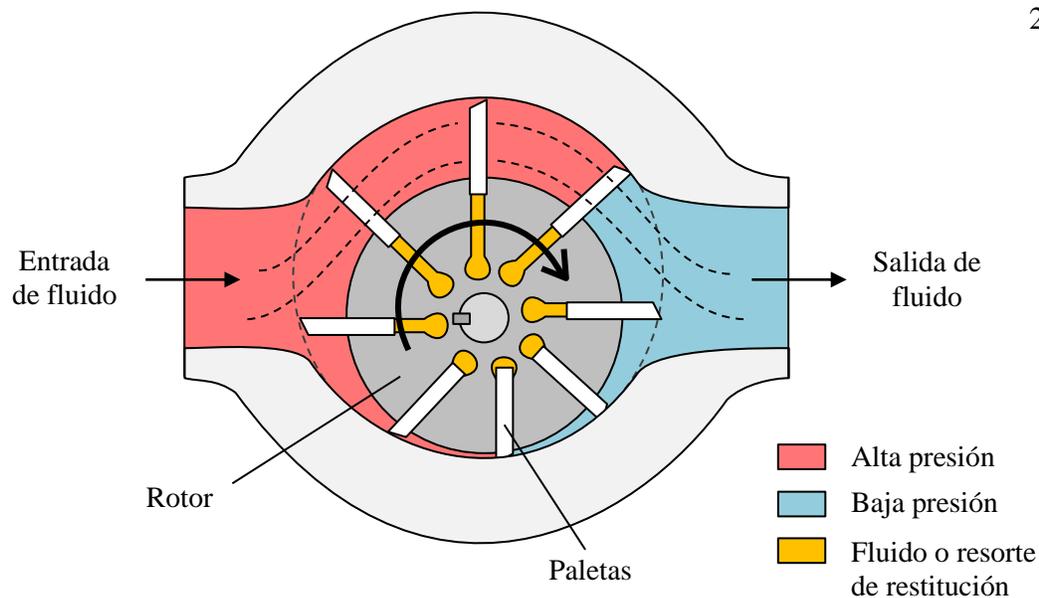
Hay tres tipos de motores hidráulicos [7]. Cada uno aprovecha la energía del fluido de una forma distinta:

- Motores de engranajes (*gear hydraulic motors*): en donde se hace rotar uno o más engranajes debido al flujo de aceite que circula a través de ellos; uno de los engranajes es solidario al eje que entrega el torque de salida. Existen varios tipos de motores de engranajes (ver Figura 10), sin embargo, todos funcionan con el principio explicado anteriormente. Estos motores tienen una alta tolerancia a aceites contaminados, por lo que se suelen utilizar en ambientes sucios.
- Motores de paletas (*vane hydraulic motors*): los que consisten en un rotor ranurado ubicado excéntricamente en una carcasa. En las ranuras se colocan paletas, las que se mantienen extendidas (mediante un resorte o fluido) y cuyo extremo exterior choca con la cara interna de la carcasa, llenando la cavidad generada por la excentricidad del rotor dentro de la carcasa (ver Figura 11). El aceite se hace fluir a través de dicha cavidad, empujando las paletas en dirección tangencial, generándose la rotación del rotor (solidario al eje que entrega el torque de salida). Estos motores son compactos y confiables en condiciones nominales, sin embargo, suelen tener una vida útil inferior a otros tipos de motores.

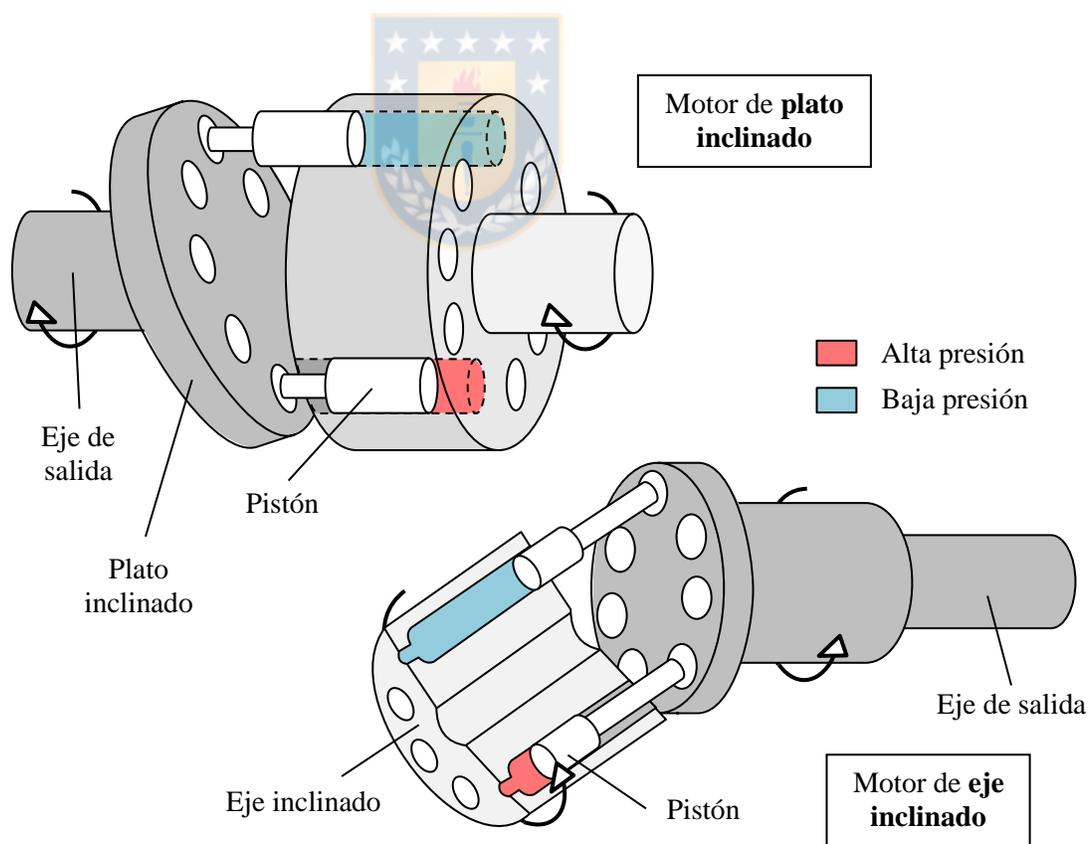
- Motores de pistones (*piston hydraulic motors*): los que se basan en el uso del fluido para activar de forma coordinada de una serie de pistones, generando el movimiento rotacional del eje de salida. Existen dos tipos:
  - 1) Pistones axiales: en donde el recorrido del pistón se ubica en dirección axial al eje de salida (ver Figura 12).
  - 2) Pistones radiales: en donde el recorrido del pistón se ubica en dirección radial al eje de salida. En la siguiente sección se explicará con mayor detalle su funcionamiento.



**Figura 10.** Motores hidráulicos de engranajes. Fuente: elaboración propia.



**Figura 11.** Motor hidráulico de paletas. Fuente: elaboración propia.



**Figura 12.** Motores hidráulicos de pistones axiales. Fuente: elaboración propia.

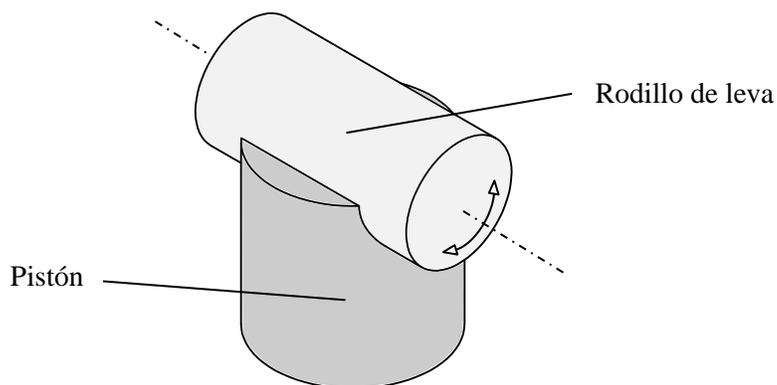
## 4.2. Motor hidráulico de pistones radiales Hägglunds

Los motores hidráulicos de pistones radiales pueden proporcionar un torque mayor que el entregado por el de pistones axiales, sin embargo, trabajan a velocidades más bajas y son más susceptibles a fallar por contaminación del aceite. Existen dos variaciones en estos motores, uno con los pistones solidarios a la carcasa y otro con los pistones solidarios al eje en rotación. En este informe se analizan estos últimos.

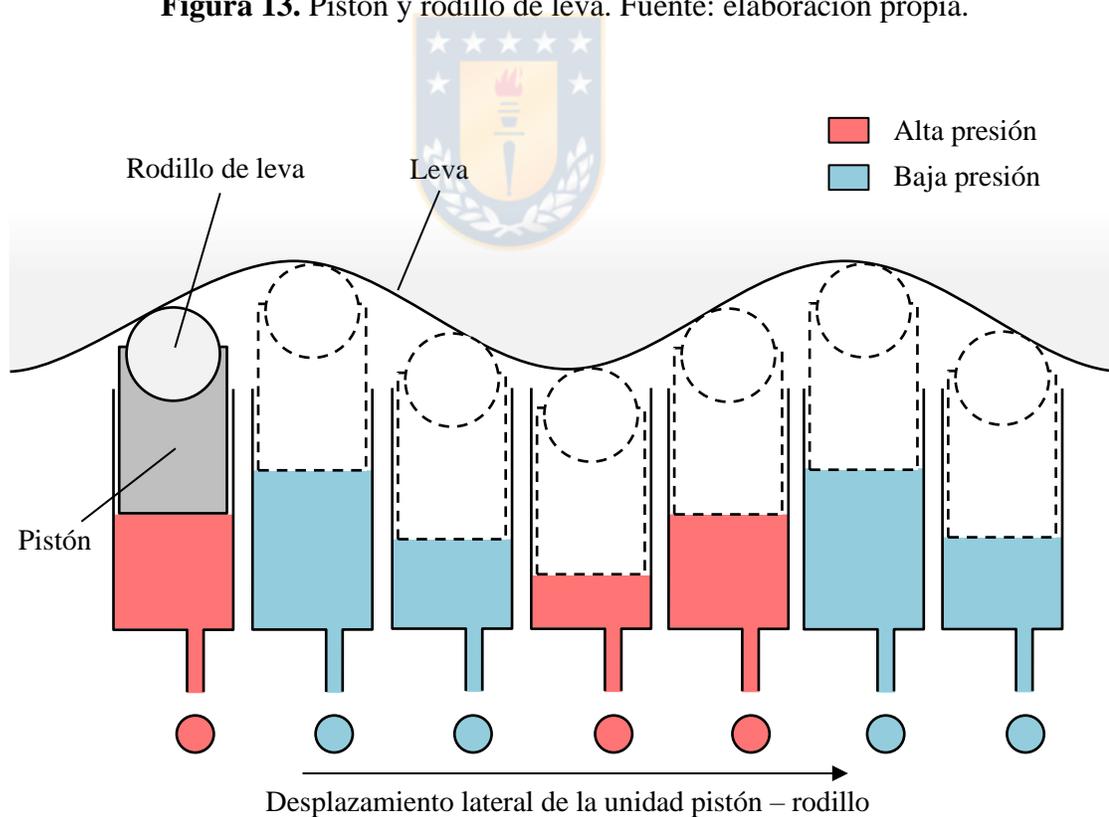
Estos motores se basan en tres elementos principales: pistón, rodillo de leva y leva, los que, juntos, componen la unidad básica de funcionamiento. Pistón y rodillo de leva son piezas solidarias, teniendo esta última libertad para rotar con respecto al pistón, ver Figura 13. Se genera un movimiento alternativo en el pistón aplicando coordinadamente fluido de alta y baja presión. El rodillo está obligado a seguir el perfil geométrico de la leva, generando un desplazamiento lateral de la unidad pistón – rodillo. Este proceso se aprecia en la Figura 14.

Los elementos (pistón, rodillo de leva y leva) se configuran en una geometría circular, permitiendo que el desplazamiento lateral del pistón – rodillo se transforme en un movimiento de tipo rotacional. A los tres elementos antes mencionados se le suman dos más: el bloque cilíndrico, que contiene a los pistones y sobre el cual se instala el eje que entrega el torque de salida; y los conductos de distribución (uno por cada unidad pistón – rodillo), que es por donde se aplica el fluido de alta y baja presión. A esta configuración se le denominará motor hidráulico de 1 hilera. En la Figura 15 se aprecia una vista general

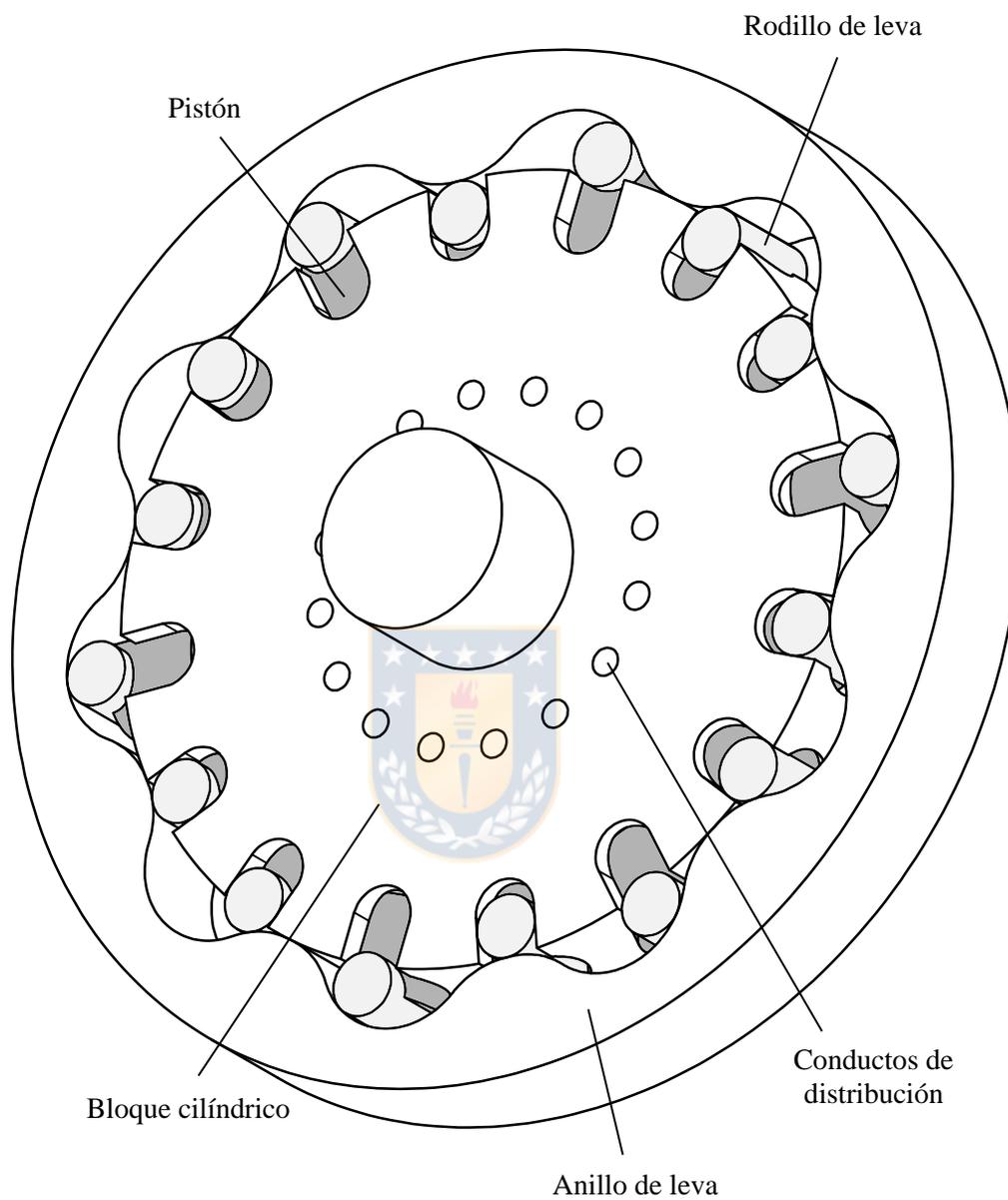
de un motor hidráulico de 1 hilera con 10 levas y 16 pistones. En la Figura 16 se aprecia un motor hidráulico de 2 hileras.



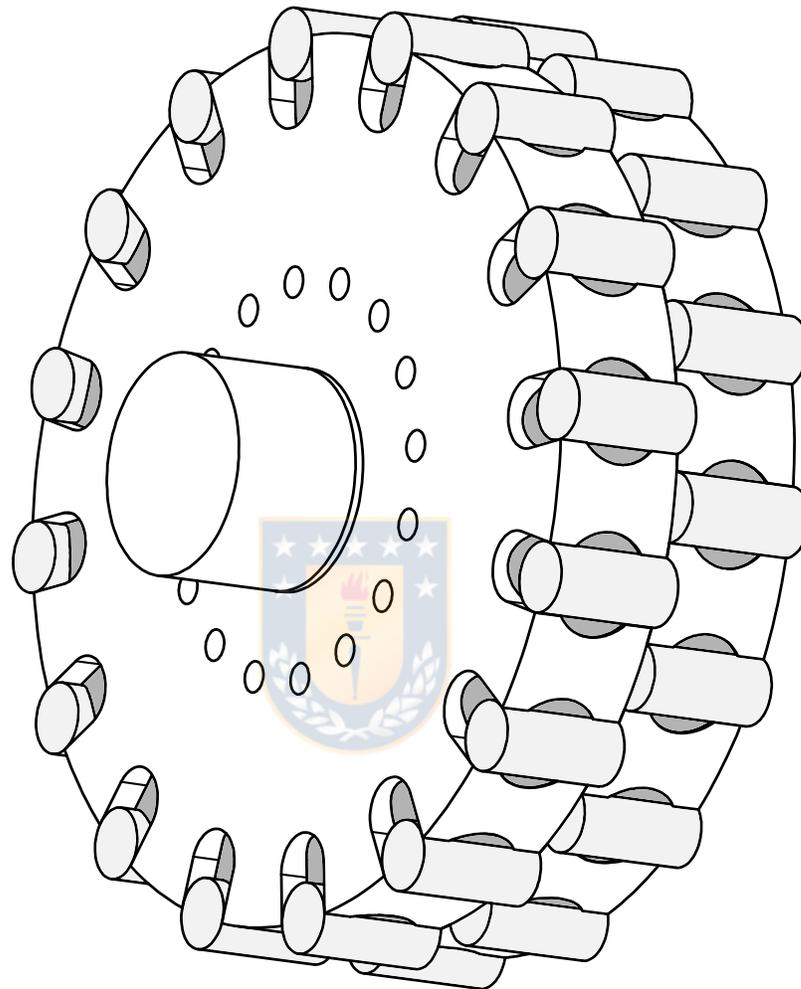
**Figura 13.** Pistón y rodillo de leva. Fuente: elaboración propia.



**Figura 14.** Principio de funcionamiento de un motor hidráulico de pistones radiales. Fuente: elaboración propia.



**Figura 15.** Motor hidráulico de pistones radiales de 1 hilera con 10 levas y 16 pistones.  
Fuente: elaboración propia.



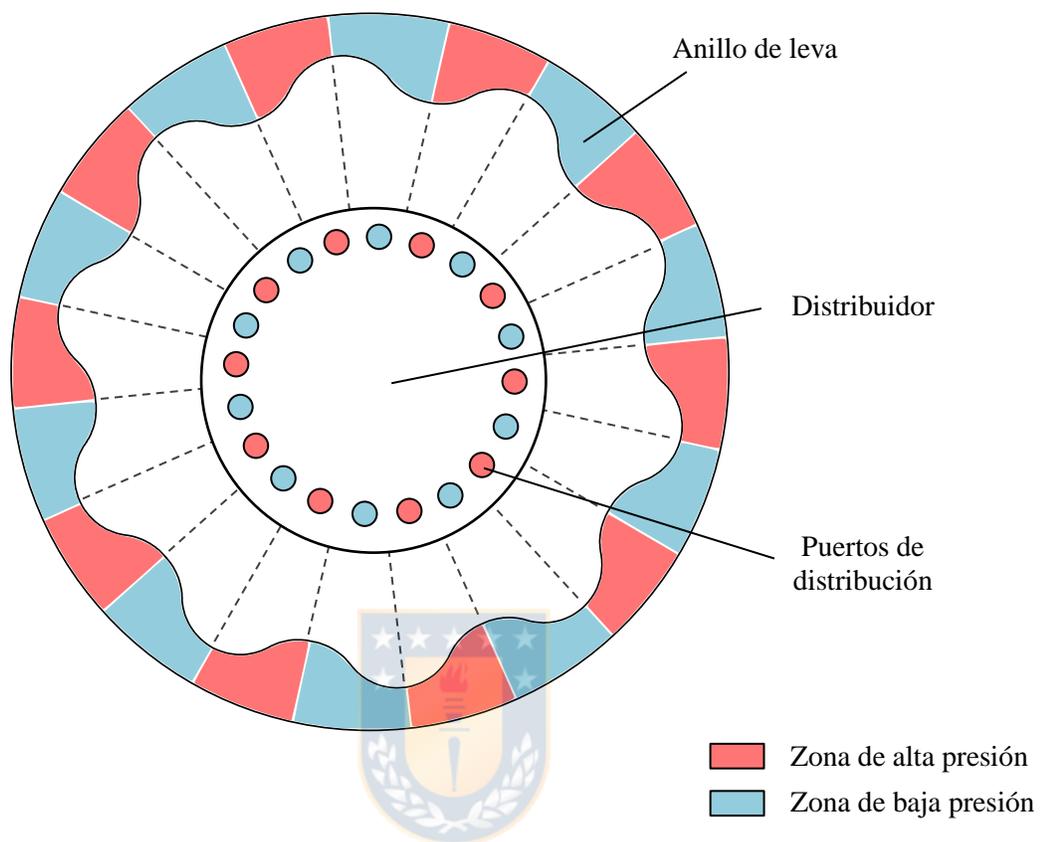
**Figura 16.** Motor hidráulico de pistones radiales de 2 hileras de 10 levas y 16 pistones cada una. Fuente: elaboración propia.

El bloque cilíndrico, con los conductos de distribución y las unidades pistón – rodillo en su interior, es el elemento rotatorio dentro del motor. El anillo de leva es solidario a la carcasa del motor, por lo tanto, es un elemento fijo.

La pieza que se encarga de alimentar a los conductos de distribución es el distribuidor. Este elemento corresponde a una válvula de placa (*plate valve*) que permite el paso de fluido dependiendo de la posición angular en que se encuentra el bloque cilíndrico. Los ciclos de suministro de alta y baja presión están definidos según la posición angular en que se encuentre cada unidad pistón – rodillo con respecto a una determinada zona de la leva, por lo tanto, ambas piezas, distribuidor y anillo de leva, están fijas. Cada leva se divide en dos zonas:

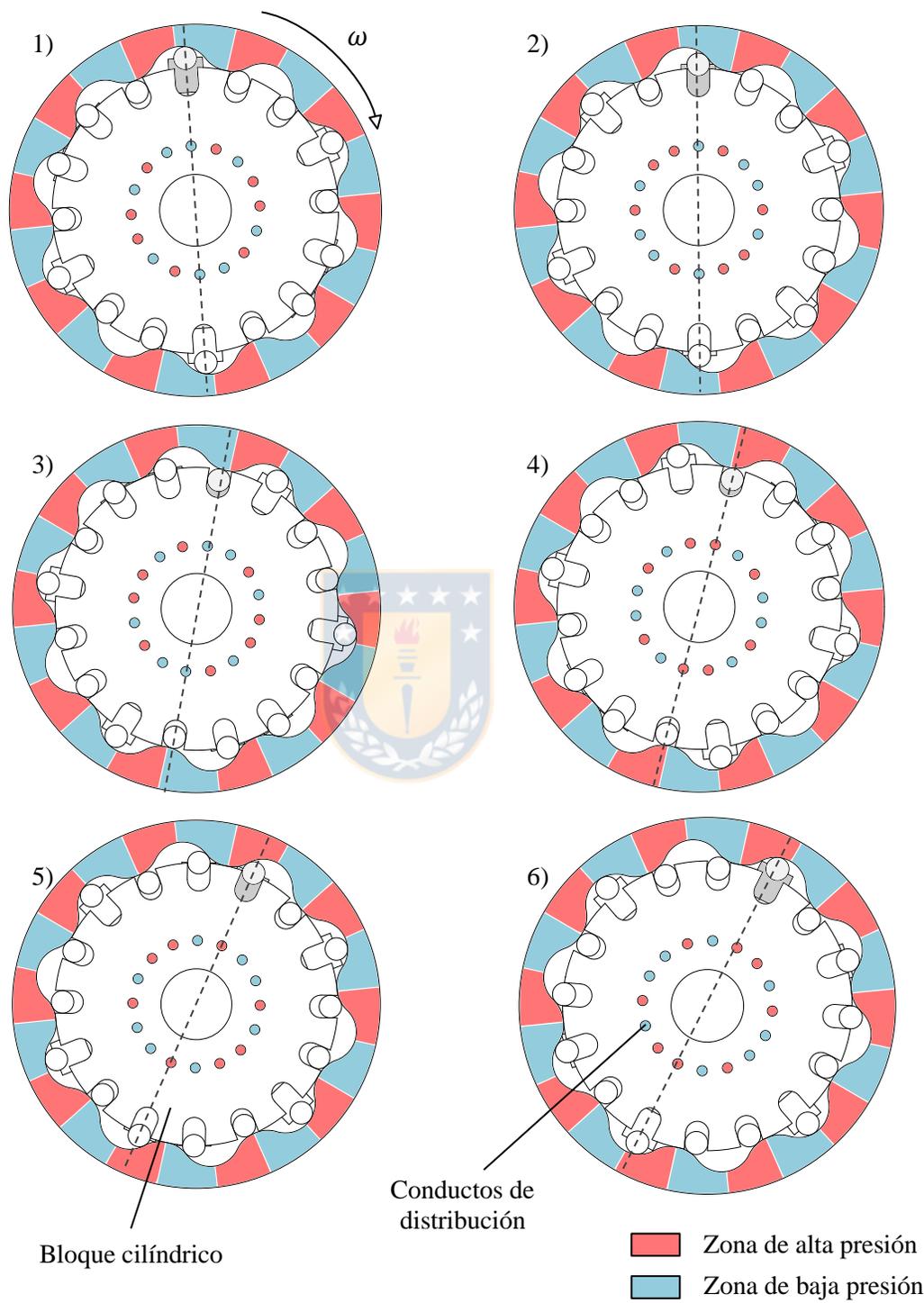
- Zona de alta presión: en donde el pistón se aleja del bloque cilíndrico debido a la alta presión del fluido, esto provoca que el rodillo siga el perfil de la leva y genere la rotación del bloque cilíndrico.
- Zona de baja presión, en donde el pistón regresa al bloque cilíndrico (dada la geometría de la leva) debido a que, en ese instante, el distribuidor permite la expulsión del fluido de alta presión utilizado previamente.

El distribuidor tiene 1 puerto de distribución por cada zona del anillo de levas, por ejemplo: en un motor de 10 levas existen 20 zonas de alta y baja presión, por lo tanto, el distribuidor tendrá 20 puertos de distribución, ver Figura 17.



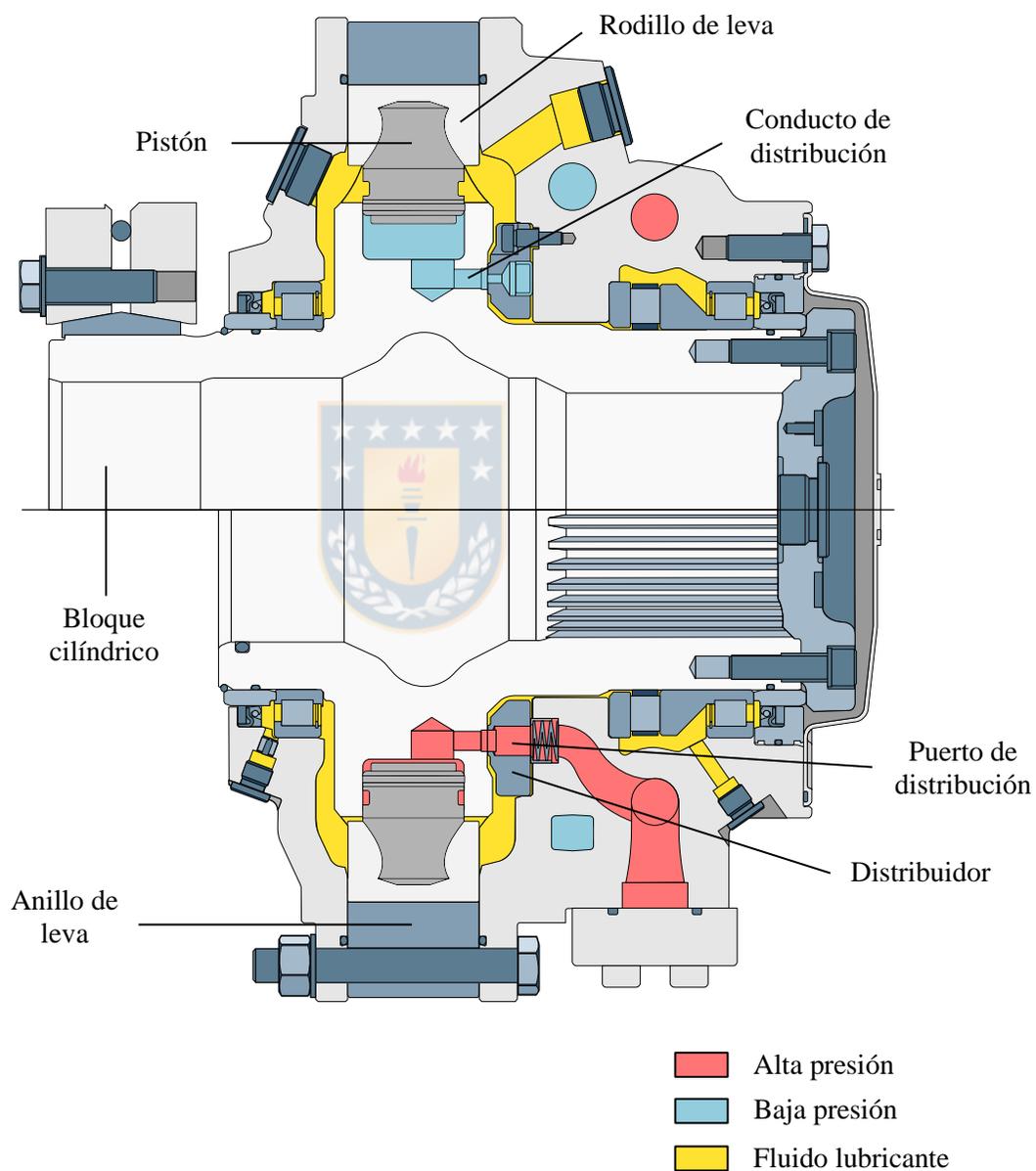
**Figura 17.** Zonas de alta y baja presión en un motor de 10 levas. Distribuidor con 20 puertos de distribución. Configuración válida para inducir giro del motor en sentido horario. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 18 se aprecia una fracción del recorrido rotacional del motor, mostrando los ciclos de alta y baja presión asignados a los conductos de distribución según la zona de la leva en que se encuentre la unidad pistón – rodillo.



**Figura 18.** Ciclo de alta y baja presión para una fracción del recorrido angular del bloque cilíndrico. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 19 se muestra el corte de un motor hidráulico Häggglunds, allí se aprecian los elementos antes mencionados.



**Figura 19.** Corte del motor hidráulico de pistones radiales. Fuente: manual de usuario Rexroth [8].

### 4.3. Lubricación

El mismo fluido de trabajo es el encargado de la lubricación de las piezas deslizantes. Esto ocurre durante la fase de alta presión: cuando el fluido llena la cavidad de la unidad pistón – rodillo, una pequeña cantidad de dicho fluido se aloja en el pistón y es trasladada al exterior del bloque cilíndrico. El objetivo de este fluido es evitar el desgaste entre superficies deslizantes y refrigerar el motor (principalmente para evitar el calentamiento y así mantener controlada la viscosidad del fluido). Estos motores están diseñados para que el fluido lubricante que exceda el nivel de llenado salga por un puerto de drenaje.



### 4.4. Entradas y salidas de fluido

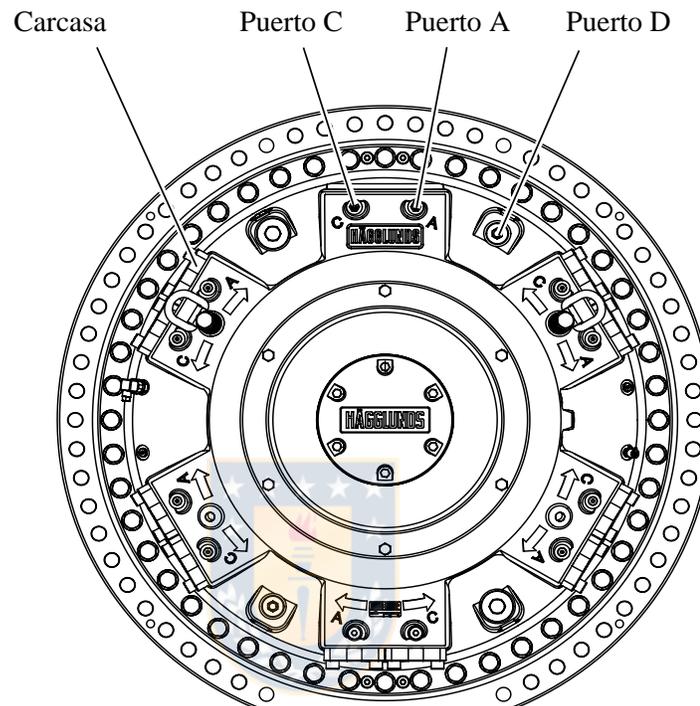
Existen 3 puertos desde donde entra o sale fluido (ver Figura 20):

- Puerto A: puerto de entrada o salida de fluido de alta o baja presión.
- Puerto C: puerto de entrada o salida de fluido de alta o baja presión.
- Puerto D: puerto de drenaje, desde donde se extrae el fluido lubricante que rebasa el nivel de llenado del motor.

Los puertos A y C alimentan al distribuidor y su configuración depende del sentido de la rotación que se desee generar:

- Sentido horario: el fluido de alta presión se debe suministrar en el Puerto A y el de baja presión en el Puerto C.

- Sentido antihorario: el fluido de alta presión se debe suministrar en el Puerto C y el de baja presión en el Puerto A.



**Figura 20.** Puertos de entrada y salida de fluido en un motor Hägglunds.  
Fuente: manual de mantenimiento [9].

#### 4.5. Literatura de motores hidráulicos de pistones radiales

Existen pocas publicaciones científicas que aborden los problemas de los motores hidráulicos de pistones radiales desde el enfoque AE o utilizando espectros de frecuencia, y los que se han encontrado abordan los aspectos tribológicos de estos mecanismos:

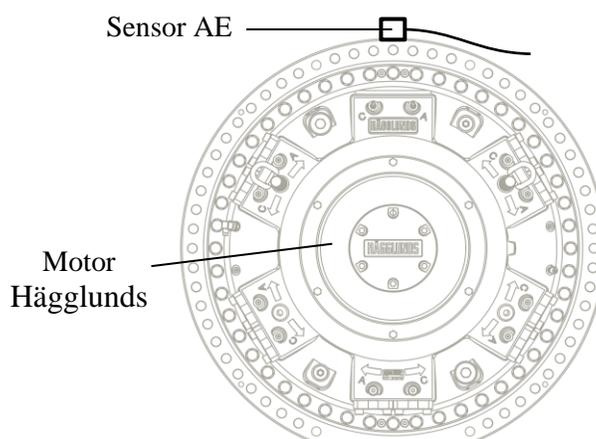
- Harper et al. [10] utilizan métodos ultrasónicos para determinar el espesor de la capa de lubricante en el anillo del pistón. Se obtiene que el procedimiento es factible, pero se requieren modificaciones para aplicarlo *in situ*.
- Isaksson et al. [11] crean un modelo de elementos finitos del pistón para optimizar el diseño tribológico. En el modelo se considera la densidad, viscosidad y presión del aceite. Los resultados del modelo se comparan con los de un banco de ensayos, obteniéndose una buena concordancia.
- Lewis [12] prueba un nuevo material de tela impregnada con teflón en la interfaz pistón – rodillo. Se obtienen resultados similares en comparación al material convencional, sin embargo, el nuevo material muestra una ventaja en condiciones de baja lubricación.
- Nilsson et al. [13] abordan el problema de desgaste superficial entre el pistón y el rodillo de leva en condiciones de funcionamiento extremas: baja viscosidad y alta presión. Se obtiene que el proceso de desgaste se divide en tres etapas: ruptura de la película de lubricante, rayado del rodillo de leva y del pistón, y propagación del rayado a otros pistones.

#### 4.6. Medición de AE en motores hidráulicos

La principal razón por la que se decide utilizar AE para evaluar la condición mecánica de estos motores es debido a que los fenómenos físicos encargados de su funcionamiento generan vibraciones con una amplitud tan baja que los sensores de aceleración solo son capaces de detectar ruido. Por contraparte, el funcionamiento de estos motores genera AE con la amplitud suficiente para que sean medidas por un sensor AE. En la Figura 21 se muestra la ubicación del sensor AE durante las mediciones en un motor Hägglunds. Los equipos y parámetros de medición se muestran en la Tabla 3.

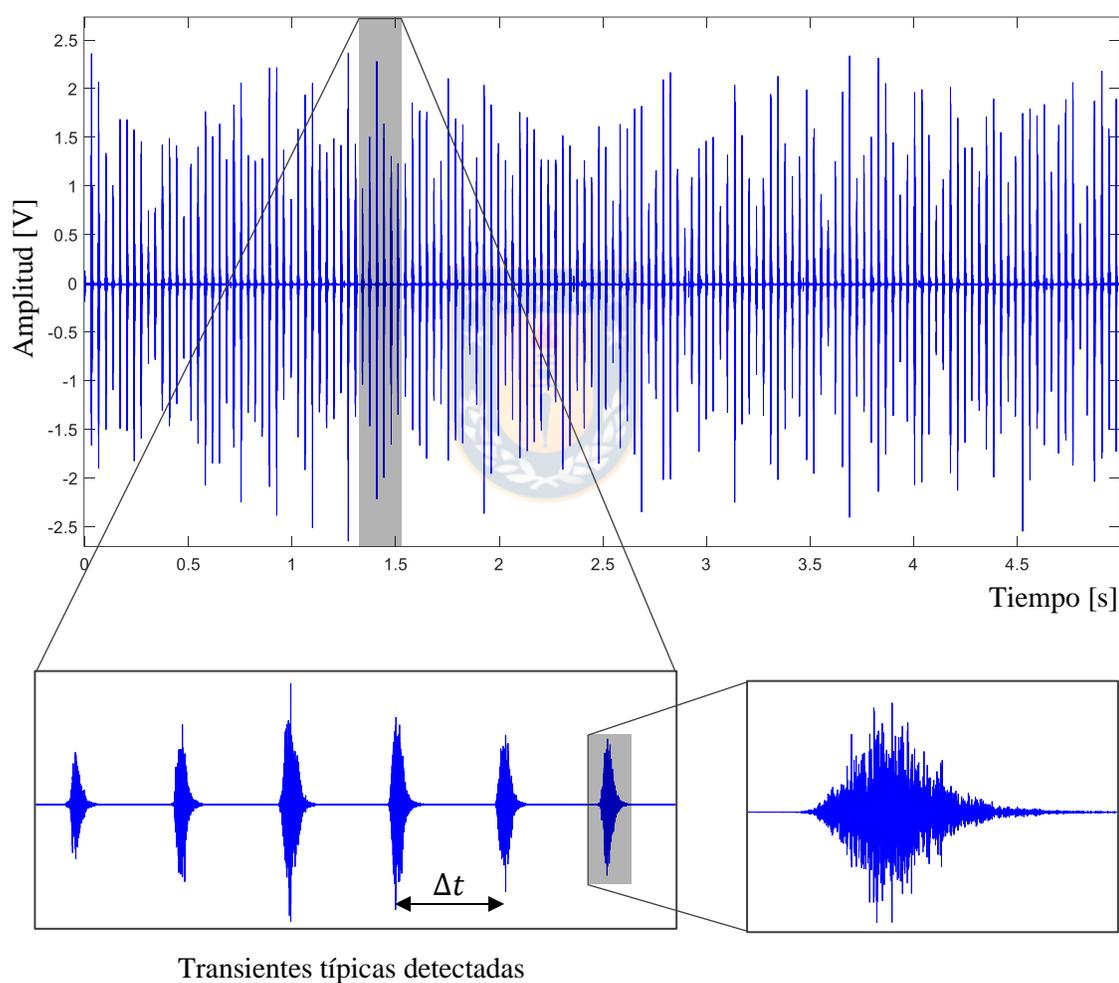
**Tabla 3.** Parámetros de medición.

|                     |                                  |                            |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Sistema de medición | Modelo sensor AE:                | Kistler Piezotron 8152B211 |
|                     | Tarjeta de adquisición de datos: | National Instruments 9223  |
|                     | Frecuencia de muestreo:          | 1 MHz                      |
| Motor hidráulico    | Hägglunds                        |                            |



**Figura 21.** Ubicación del sensor AE en el motor Hägglunds. Fuente: manual de mantenimiento [9].

Al visualizar las AE medidas durante el funcionamiento de un motor hidráulico Hägglunds se aprecian transientes AE de amplitud variable que aparecen cada un  $\Delta t$  que pareciera ser constante (ver Figura 22). Por lo tanto, la metodología AE se basará en el análisis de dichas transientes para evaluar la condición mecánica de estos motores.



**Figura 22.** Señal AE medida en motor hidráulico Hägglunds. Fuente: elaboración propia.

#### 4.7. Metodología de análisis AE

Se realiza un conteo de la cantidad de transientes AE (como los mostrados en la Figura 22) que aparecen en la señal AE durante 1 revolución del bloque cilíndrico. Los resultados se muestran en la Tabla 4. En la sección 4.7.1 se da una explicación de estos valores.

**Tabla 4.** Cantidad de transientes en la señal AE durante 1 revolución en motores de 1 y 2 hileras.

|   | Motor hidráulico de 10 levas y 16 pistones en cada hilera |           |
|---|---|-----------|
|   | 1 hilera  | 2 hileras |
| Conteo de transientes AE durante 1 revolución del bloque cilíndrico | 80  | 160       |

##### 4.7.1. Pares de unidad Pistón – Rodillo (PPR)

Para interpretar los valores mostrados en la Tabla 4 es necesario explicar el concepto de los PPR. Tomando como ejemplo el motor de 1 hilera, se observa que cada unidad pistón – rodillo tiene a otra unidad pistón – rodillo a 180°, es decir, existe simetría con respecto al eje de rotación. A dicho par de unidades pistón – rodillo se les denominará PPR (par pistón rodillo). Cada PPR se ubica, con respecto al recorrido de la leva, en una misma etapa de carga de fluido de alta o baja presión (ver Figura 18), por lo tanto, y en cada instante a lo largo de la rotación del bloque cilíndrico, cumplen la misma función



**Tabla 5.** Asignación de pistones a cada PPR.

| PPR | Pistones |     |
|-----|----------|-----|
| 1   | P1       | P9  |
| 2   | P2       | P10 |
| 3   | P3       | P11 |
| 4   | P4       | P12 |
| 5   | P5       | P13 |
| 6   | P6       | P14 |
| 7   | P7       | P15 |
| 8   | P8       | P16 |

#### 4.7.2. Cantidad de activaciones de los PPR

Con el concepto de los PPR explicado, se puede calcular la cantidad de veces que estos se activan durante 1 revolución del bloque cilíndrico. En motores hidráulicos de 1 hilera (de 16 pistones y 10 levas) existirán 8 PPR, en donde cada rodillo del PPR, durante el recorrido de 1 revolución del bloque cilíndrico, tendrá contacto con 10 levas. Realizando el siguiente cálculo se obtiene que, en 1 revolución del bloque cilíndrico, habrá:

$$(8 \text{ PPR}) \cdot (10 \text{ levas/rev}) = 80 \text{ activaciones PPR/rev}$$

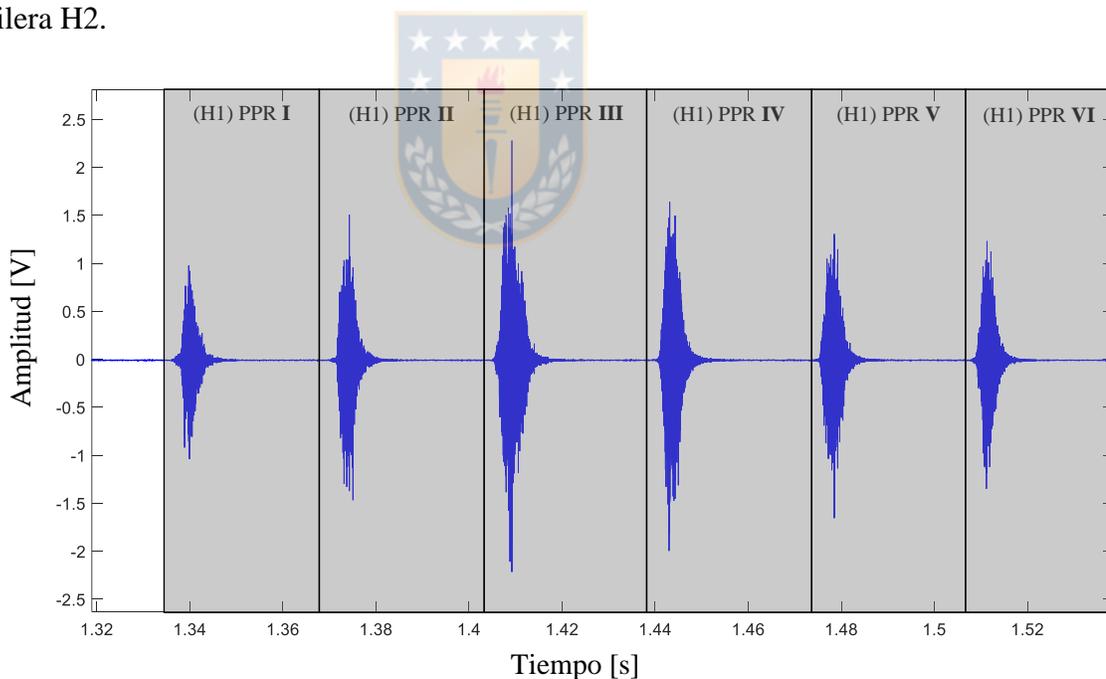
lo que calza con la cantidad de transientes AE que aparecen en 1 revolución para un motor de 1 hilera (ver Tabla 4).

En los motores hidráulicos de 2 hileras (de 16 pistones y 10 levas cada una), existirán 8 PPR para cada hilera. En donde la activación de los PPR se va alternando de una hilera

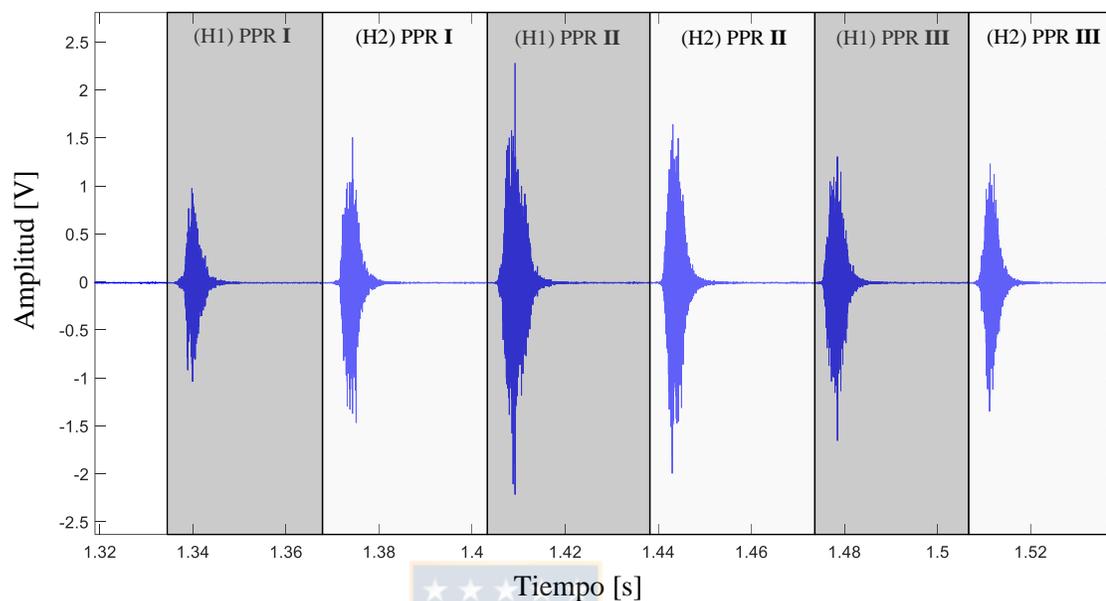
a la otra, por lo tanto, durante el recorrido de 1 revolución, se duplica la cantidad de activaciones PPR en comparación a los motores de 1 hilera. El cálculo queda:

$$2 \text{ hileras} \cdot (8 \text{ PPR}) \cdot (10 \text{ levas/rev}) = 160 \text{ activaciones PPR/rev}$$

Por lo tanto, y teniendo en cuenta que la cantidad de activaciones PPR calza con la cantidad de transientes AE contabilizados en 1 revolución, se opta por relacionar dichos fenómenos, es decir: a cada transiente AE se le asociará la activación de un PPR. En la Figura 24 se muestra la asignación de transientes en un motor de 1 hilera y en la Figura 25 para un motor de 2 hileras. A la primera hilera se le abreviará H1, y a la segunda hilera H2.



**Figura 24.** Metodología para el análisis AE: asignar 1 transiente AE a cada PPR. Motor hidráulico de 1 hilera. Fuente: elaboración propia.

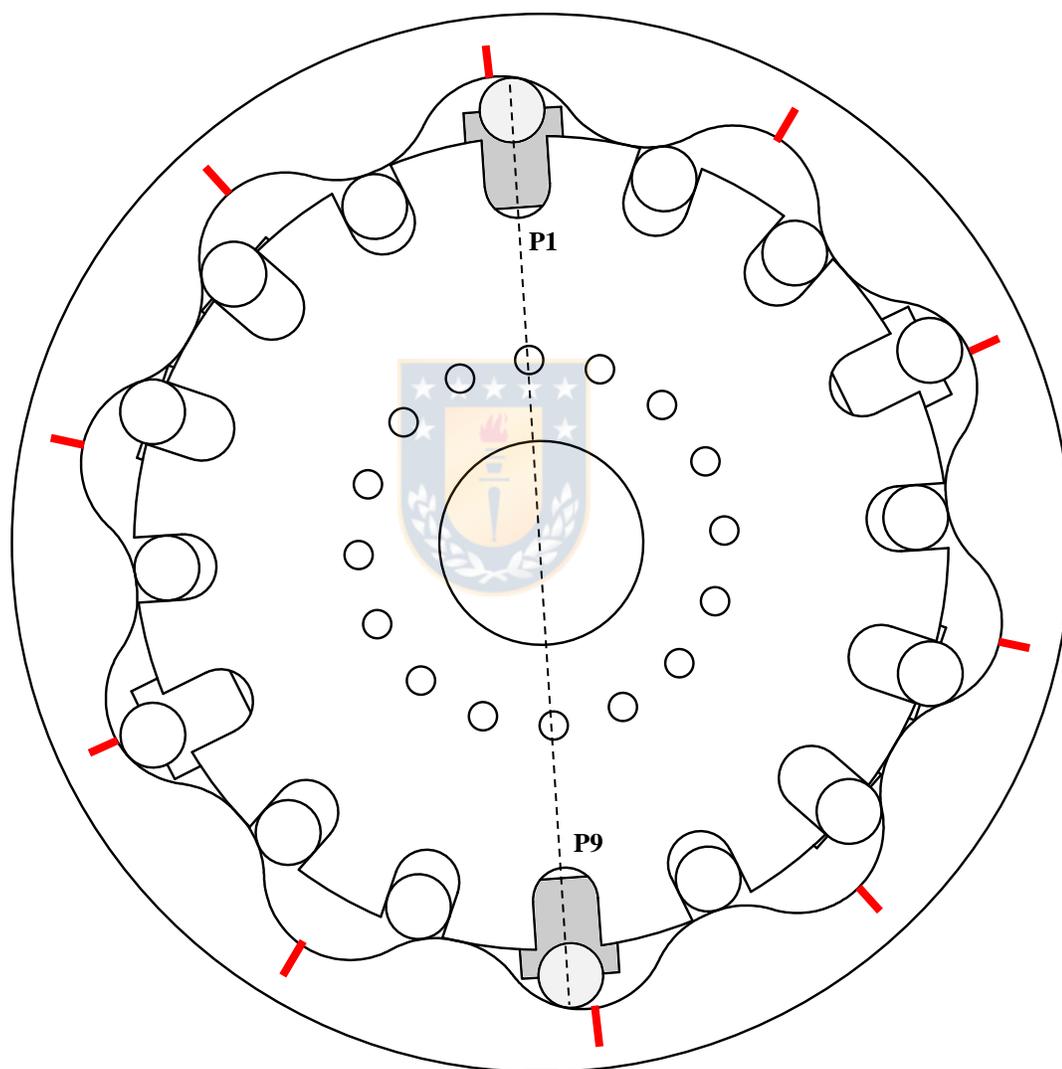


**Figura 25.** Metodología para el análisis AE: asignar 1 transiente AE a cada PPR. Motor hidráulico de 2 hileras. Fuente: elaboración propia.

#### 4.7.3. Orden de activación de los PPR

A pesar de que las levas y pistones (y, por consiguiente, los PPR) están numerados de forma secuencial y en sentido horario (ver Figura 23), su orden de activación no sigue esta secuencia. Para determinarlo, se consideran un motor hidráulico de 1 hilera de 10 levas y 16 pistones, en el cual se toma como referencia el instante en que los rodillos de cada PPR pasan por la zona de la leva más alejada del bloque cilíndrico, es decir, la zona marcada en la Figura 26. Este procedimiento se realiza para 1 revolución del bloque cilíndrico, obteniéndose el orden de activación mostrado en la Tabla 6. Por ejemplo, el sexto PPR en activarse es el PPR8, momento en el cual el pistón P16 entra en contacto con la leva L1 y,

simultáneamente, el pistón P8 entra en contacto con la leva L6. Notar que el orden de activación de los PPR mostrado es periódico, por lo tanto este se repite a lo largo de toda la medición para  $n$  revoluciones del bloque cilíndrico.



**Figura 26.** Referencia para la obtención del orden de activación de los PPR.  
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Orden de activación de los PPR durante 1 revolución del bloque cilíndrico para un motor de 1 hilera. Se muestran los emparejamientos entre los pistones y las levas del PPR.

| Activación | PPR | Pistones  | Levas     |
|------------|-----|-----------|-----------|
| 1          | 1   | P1<br>P9  | L1<br>L6  |
| 2          | 4   | P4<br>P12 | L3<br>L8  |
| 3          | 7   | P7<br>P15 | L5<br>L10 |
| 4          | 2   | P10<br>P2 | L7<br>L2  |
| 5          | 5   | P13<br>P5 | L9<br>L4  |
| 6          | 8   | P16<br>P8 | L1<br>L6  |
| 7          | 3   | P3<br>P11 | L3<br>L8  |
| 8          | 6   | P6<br>P14 | L5<br>L10 |
| 9          | 1   | P9<br>P1  | L7<br>L2  |
| 10         | 4   | P12<br>P4 | L9<br>L4  |
| ...        | ... | ...       | ...       |
| 79         | 6   | P14<br>P6 | L9<br>L4  |
| 80         | 1   | P1<br>P9  | L1<br>L6  |

En la Tabla 6 se muestran los emparejamientos entre pistones y levas para un motor de 1 hilera durante 1 revolución del bloque cilíndrico. Es posible observar que:

- Un mismo par de pistones se activa cada 8 activaciones PPR (ver sombreado azul).
- Un mismo par de levas se activa cada 5 activaciones PPR (ver sombreado verde).

#### 4.7.4. Premisa de análisis AE

Como se explicó anteriormente, la premisa del análisis AE se basa en la asociación de las transientes AE con la activación de los PPR de un motor hidráulico. A dichas transientes, mostradas en la Figura 22, se les llamará transientes principales, y tienen características distinguibles: alta amplitud, alta duración y, por sobre todo, tienen una periodicidad a lo largo del tiempo relacionada directamente con la velocidad de rotación del motor y con la activación de los PPR.

A todas las transientes que queden entremedio de las transientes principales se les llamará transientes intermedias, cuyas características son: baja amplitud, baja duración y, en la mayoría de los casos, una periodicidad que no las relaciona necesariamente con la activación de los PPR. Estas transientes solo aparecen en las señales AE de algunos motores y se asocian a comportamientos anormales.

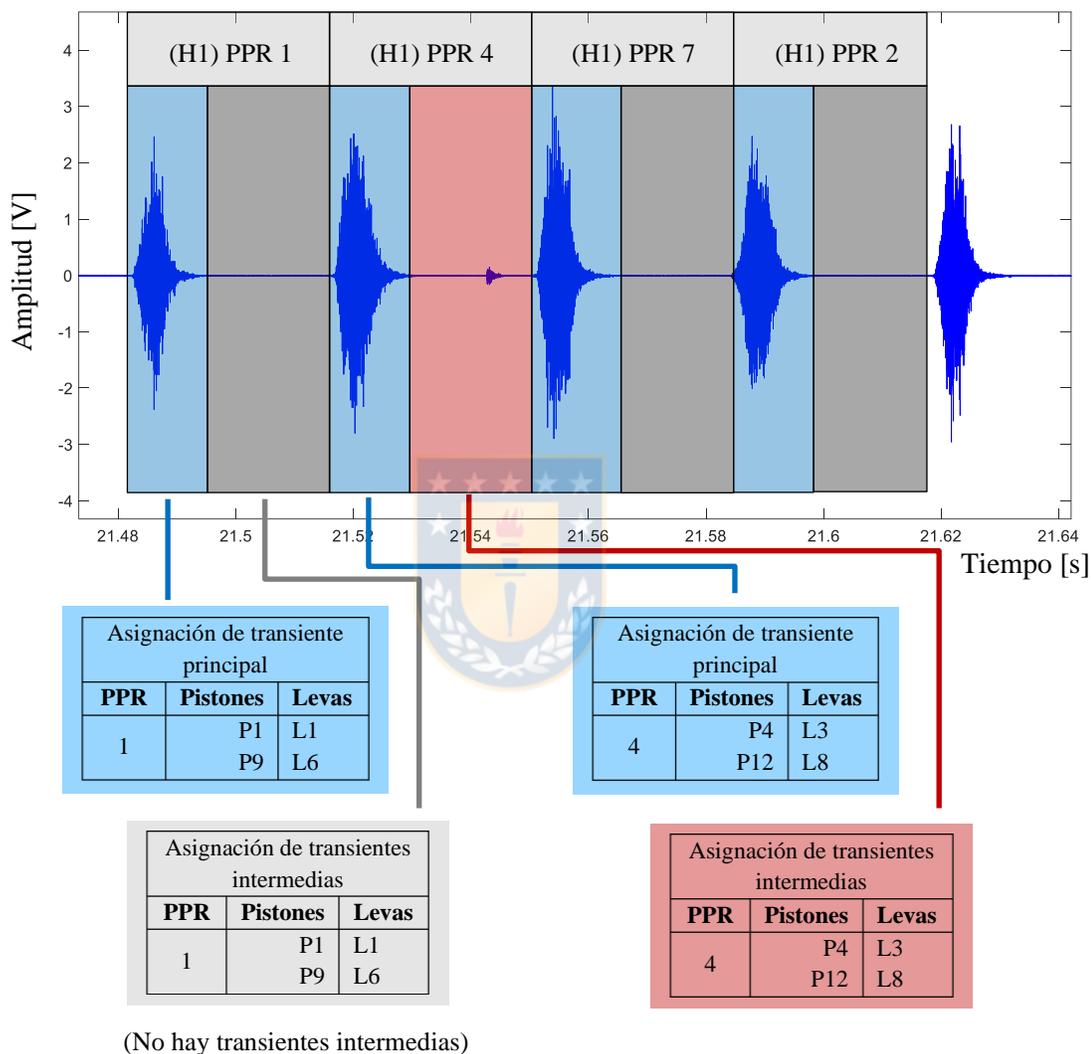
#### 4.7.5. Procedimiento

A continuación se explica el procedimiento basado en la premisa antes mencionada. Se parte del supuesto de que la medición AE ya ha sido realizada:

- Para empezar, se utiliza el Programa: Detección de transientes (explicado en el Capítulo 3), el cual trabajará con la señal AE detectando y separando las transientes que superen el valor del umbral de detección definido (justo por sobre el nivel de ruido), ver Figura 6.

- Luego se utiliza el algoritmo creado para este capítulo, Programa: Motores Hidráulicos, el cual realizará, secuencialmente, las siguientes tareas:
  1. Determinación de transientes principales mediante un procedimiento predictivo basado en las transientes principales previamente detectadas. Las transientes sobrantes son consideradas transientes intermedias.
  2. Asignación de las transientes principales a los PPR según el orden de activación mostrado en la Tabla 6. Específicamente, las transientes principales se asignarán a todos los pistones y levas que interactúan en cada PPR (ver tabla antes mencionada), es decir, en cada PPR se asignará la transiente principal a 4 elementos: 2 pistones y 2 levas (ver Figura 27).
  3. Asignación de las transientes intermedias (en caso de que existan) a los PPR, para lo cual se asume que: las transientes intermedias asociadas a un PPR ocurren después de la transiente principal, ver Figura 27.
  4. Para cada pistón y para cada leva se crea una lista con las transientes principales e intermedias que le han sido asignadas de acuerdo con el orden de activación de los PPR. Con dicha lista se calculan posteriormente los indicadores AE.
  5. Se utilizan dos tipos de gráficos: gráficos circulares y espectros de frecuencia de la envolvente, los cuales, en forma conjunta, permiten evaluar el estado de los elementos del motor. Con el gráfico circular (se mostrará más adelante) se puede evaluar qué pistones o levas presentan

comportamientos anormales, y con el espectro se obtiene la frecuencia con que ocurren dichos comportamientos.



**Figura 27.** Asignación de transientes AE principales e intermedias a los pistones y levas de los 2 primeros PPR que actúan según el orden de activación (Tabla 6). Motor hidráulico de 1 hilera. Fuente: elaboración propia.

#### 4.7.6. Frecuencias características esperadas

Considerando el funcionamiento de los motores antes explicado, se construye una lista con las componentes frecuenciales que se espera encontrar en el espectro de la envolvente de la señal AE. En la Tabla 7 se muestran las componentes frecuenciales asociadas a las transientes principales de la señal AE, recordando que estas son generadas debido el funcionamiento normal del motor. En la Tabla 8 y Tabla 9 se muestran las componentes frecuenciales asociadas a las transientes intermedias anormales de la señal AE. En la Figura 28 se muestran esquemas de las posibles fuentes que pueden generar transientes intermedias anormales. Los valores frecuencias son entregados en orden, es decir, están en función de la velocidad de rotación del motor, y son válidos para motores de 1 hilera de 16 pistones y 10 levas.

En la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 se muestra la modulación (en caso de que exista) coloreada de azul.

**Tabla 7.** Frecuencia y modulación esperable en transientes principales.

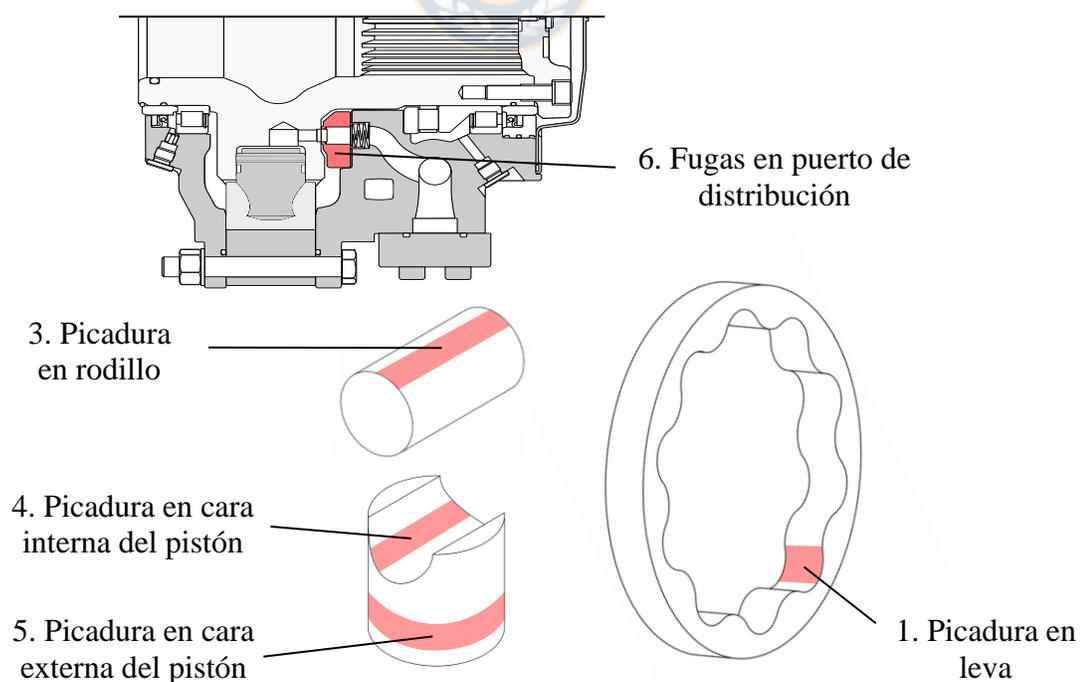
| Fuente                  | Order      | Componente principal  |
|-------------------------|------------|---|
| Transientes principales | 80x        | Frecuencia normal, ocasionada por la activación de los PPR.   |
|                         | Modulación |   |
|                         | 16x        | Los PPR activados se alejan y se acercan al sensor AE debido a la rotación del motor.   |
|                         | ---        | No es raro que aparezcan otras frecuencias moduladoras, debido a que la amplitud de las transientes principales también depende del torque resistente con que trabaja el motor. |

**Tabla 8.** Frecuencia y modulación esperable en transientes intermedias anormales ocasionadas por fallas. (Parte 1)

| Fuente                                 | Order      | Componente principal  |
|--|------------|---|
| 1. Picadura en leva                    | 16x        | Una picadura en alguna de las levas generaría una transiente 16 veces por revolución. Como la leva no se desplaza, la transiente no debería estar modulada.   |
| 2. Funcionamiento anormal en un pistón | 10x        | Cada pistón se activa 10 veces en cada revolución del motor, esto según la cantidad de levas.   |
|  | Modulación |   |
|  | 1x         | Debido a que el pistón se aleja y se acerca al sensor AE debido a la rotación del motor.  |
| 3. Picadura en rodillo                 | Ruido      | La picadura del rodillo roza contra la cara interna del pistón, generando ruido.  |
|  | ---        | La picadura del rodillo impacta con las levas del motor. Se puede obtener un valor aproximado utilizando el diámetro promedio del anillo de levas $d_L$ y el diámetro del rodillo $d_R$ (asumiendo que rueda sin deslizar):<br><br>$\text{Order} = \frac{d_L}{d_R}$ |
|  | Modulación |   |
|  | 1x         | Debido a que el pistón del rodillo se aleja y se acerca al sensor AE debido a la rotación del motor.  |
|  | 10x        | Debido al cambio de velocidad por el cambio de radio según la posición en la leva   |
| 4. Picadura en cara interna del pistón | Ruido      | Esta cara es la que está en contacto con el rodillo, existiendo un contacto deslizante continuo.  |
|  | Modulación |   |
|  | 1x         | Debido a que el pistón se aleja y se acerca al sensor AE debido a la rotación del motor.  |

**Tabla 9.** Frecuencia y modulación esperable en transientes intermedias anormales ocasionadas por fallas. (Parte 2)

| Fuente                                 | Order      | Componente principal  |
|--|------------|---|
| 5. Picadura en cara externa del pistón | Ruido      | Dado que el pistón desliza a lo largo de su recorrido, la manifestación en las AE sería ruido.  |
|  | Modulación |   |
|  | 1x         | Debido a que el pistón se aleja y se acerca al sensor AE debido a la rotación del motor.  |
|  | 20x        | Debido a que el pistón recorre desde el punto muerto inferior hasta el superior 2 veces por cada una de las 10 levas del motor.   |
| 6. Fugas en puerto de distribución     | 16x        | Fugas de fluido hidráulico en uno de los puertos de distribución al momento de conectar con los conductos de distribución. Sin modulación, dado que el puerto no se desplaza. |



**Figura 28.** Posibles fallas en un motor hidráulico de pistones radiales.

#### **4.7.7. Casos de estudio**

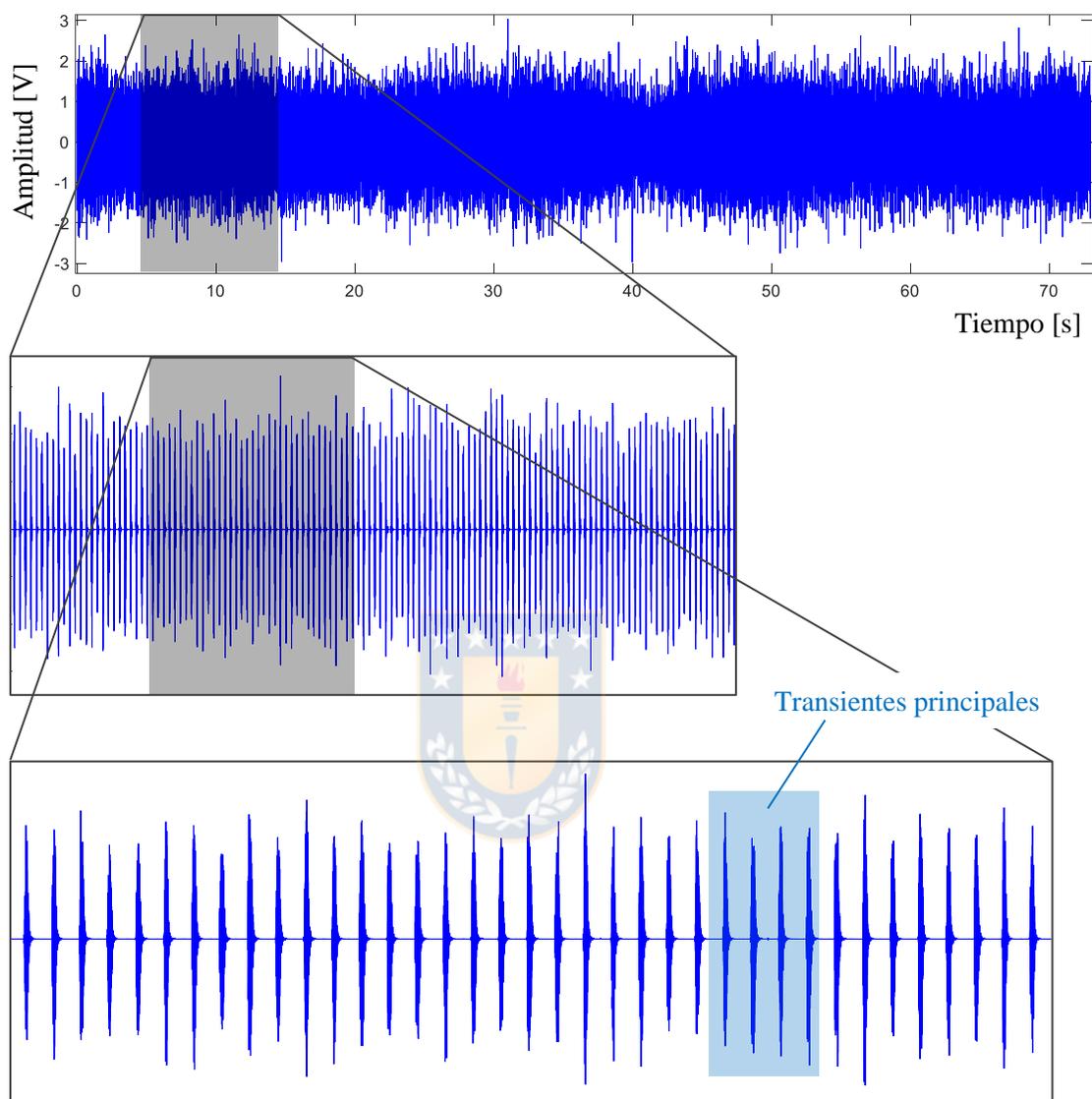
Se analizan dos casos de estudio. Los equipos utilizados y la ubicación del sensor AE son los mostrados en la sección 4.6.

- Caso 1: motor hidráulico de 2 hileras de 16 pistones y 10 levas cada una en buenas condiciones
- Caso 2: motor hidráulico de 1 hilera de 16 pistones y 10 levas con transientes AE anormales. En este caso se miden 3 señales: AE, presión de descarga (desde el puerto A o C) y presión de drenaje (desde el puerto D).

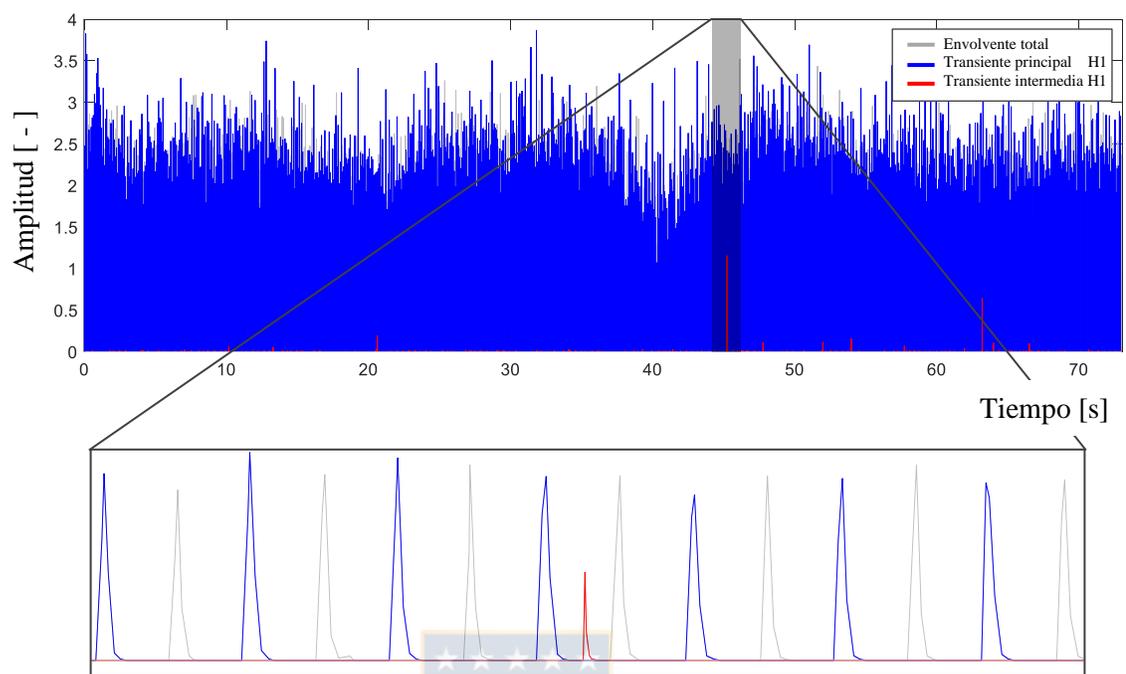


#### **4.8. Caso de estudio 1: Motor de 2 hileras en buenas condiciones**

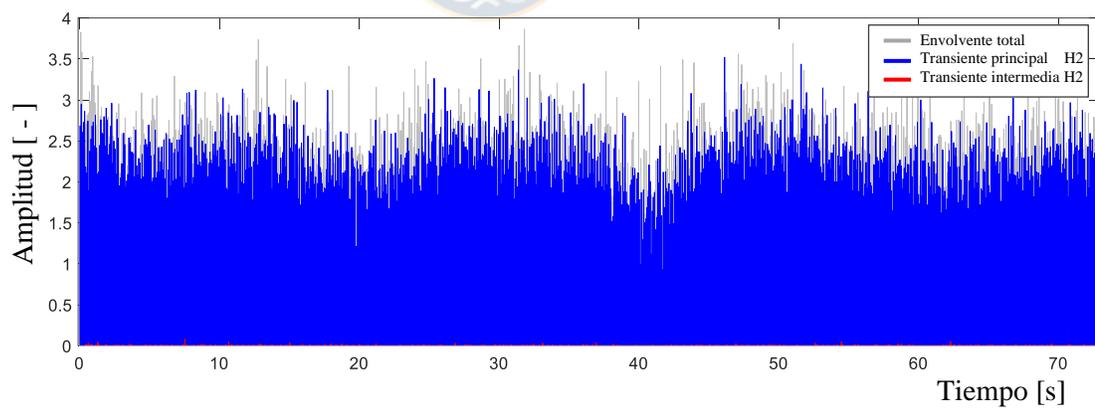
En la Figura 29 se muestra la señal AE en bruto. En la Figura 30 y Figura 31 se muestra la envolvente de las transientes AE que fueron definidas como principales e intermedias para cada hilera, resultado del “Programa: Motores Hidráulicos”. En el zoom de la Figura 30 y Figura 31 es posible visualizar la asignación intercalada de las transientes debido a las 2 hileras del motor analizado.



**Figura 29.** Caso 1: señal AE en bruto. Fuente: elaboración propia.



**Figura 30.** Caso 1: envolvente de transientes AE principales e intermedias. (Hilera 1).  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 31.** Caso 1: envolvente de transientes AE principales e intermedias. (Hilera 2).  
Fuente: elaboración propia.

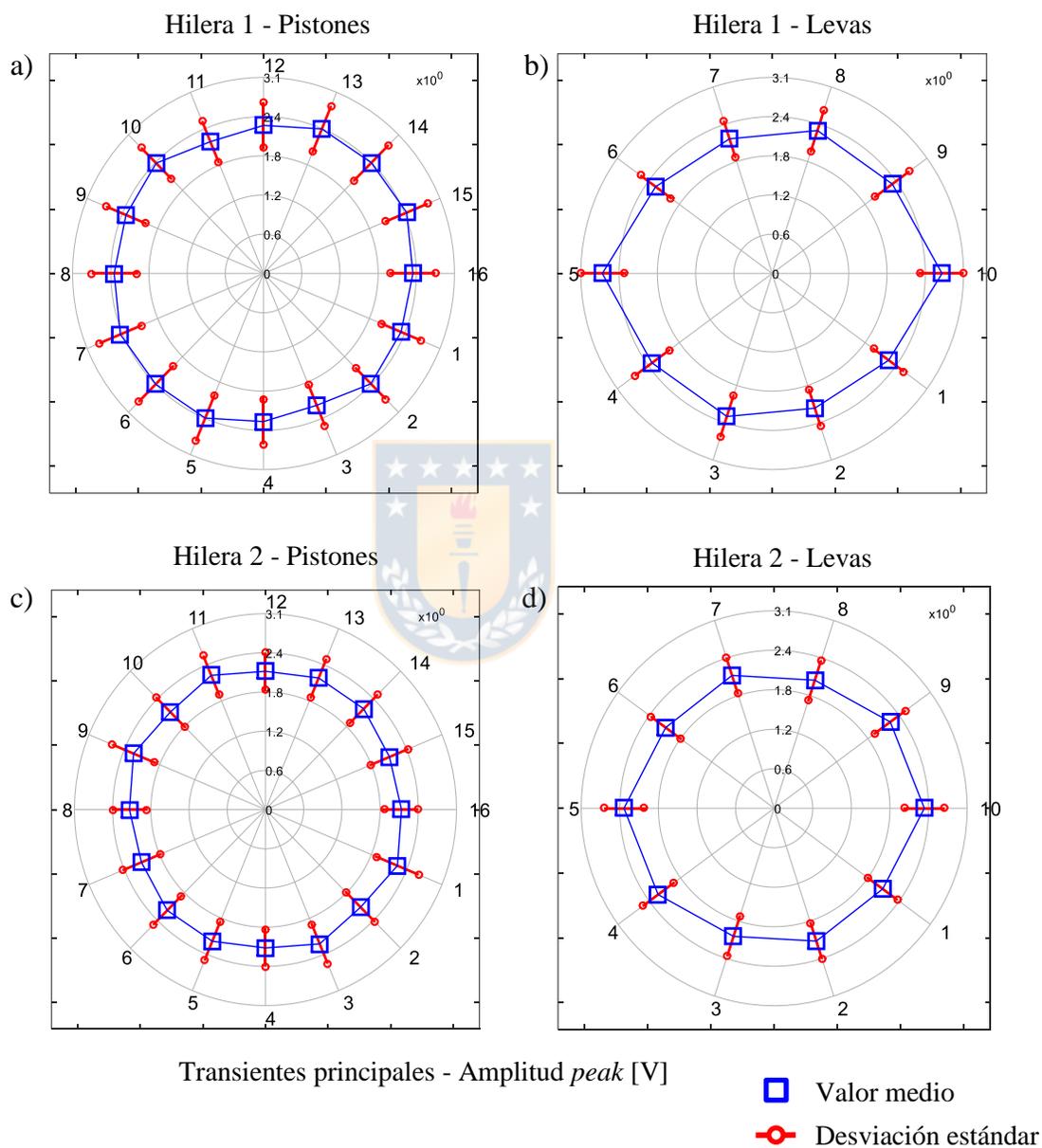
A cada pistón y leva presente en el motor se le asigna un grupo de transientes principales e intermedias, esto de acuerdo con el orden de activación mostrado la sección 4.7.3. Por ejemplo, en la Figura 32 se muestran las transientes principales e intermedias asignadas al par de pistones 2 – 10 de la hilera 1.



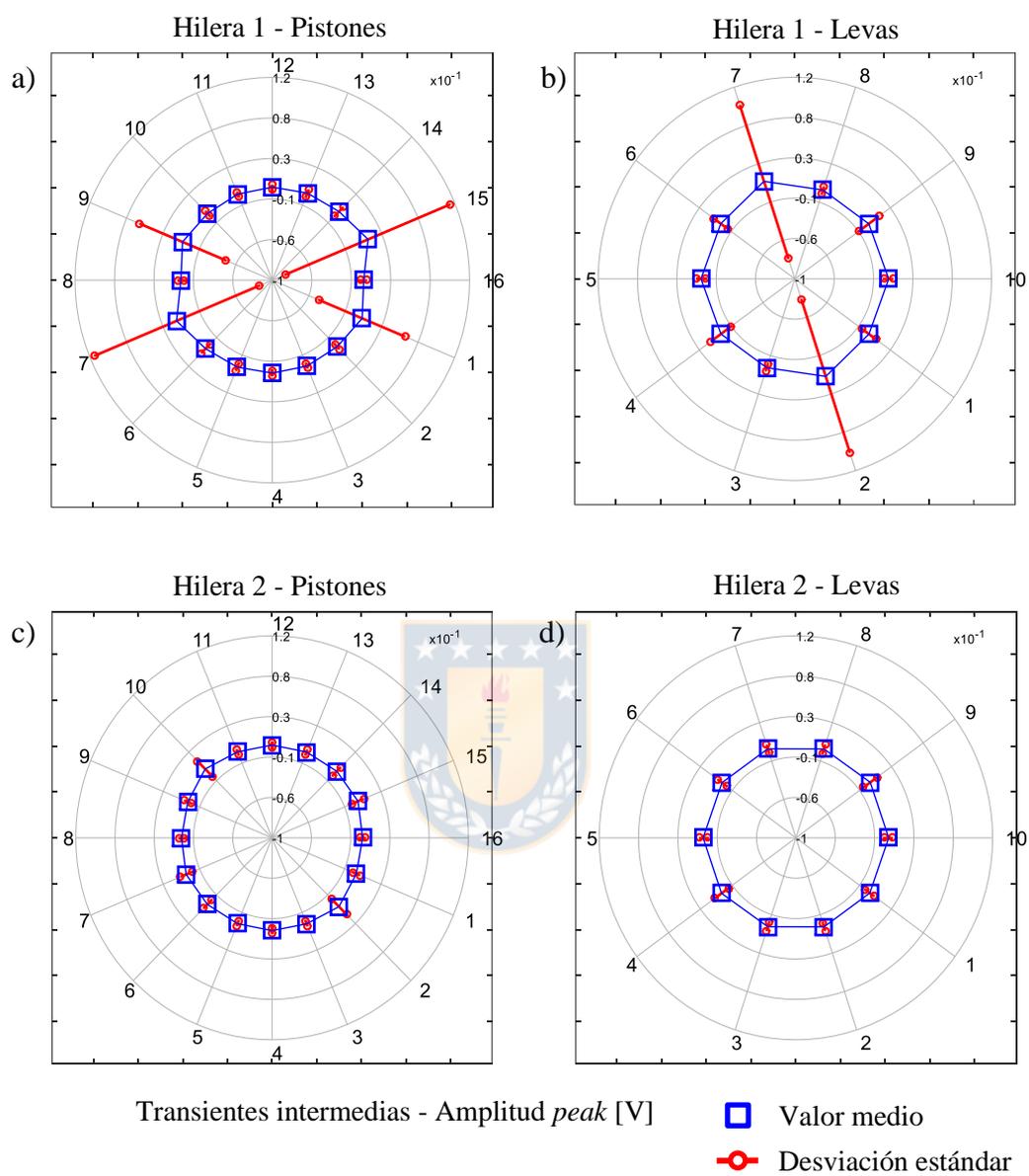
**Figura 32.** Caso 1: transientes AE principales e intermedias de los pistones 2 – 10. (Hilera 1). Fuente: elaboración propia.

A partir de los indicadores mostrados en la sección 2.3, y para cada pistón y leva, se calcula el valor medio y la desviación estándar en el grupo de transientes que le fueron asignadas considerando varias revoluciones del motor. Con dichos valores se construyen gráficos circulares que permiten visualizar con mayor facilidad el comportamiento de las

transientes AE. En la Figura 33 y Figura 34 se muestran dichos gráficos para las transientes principales e intermedias en ambas hileras.

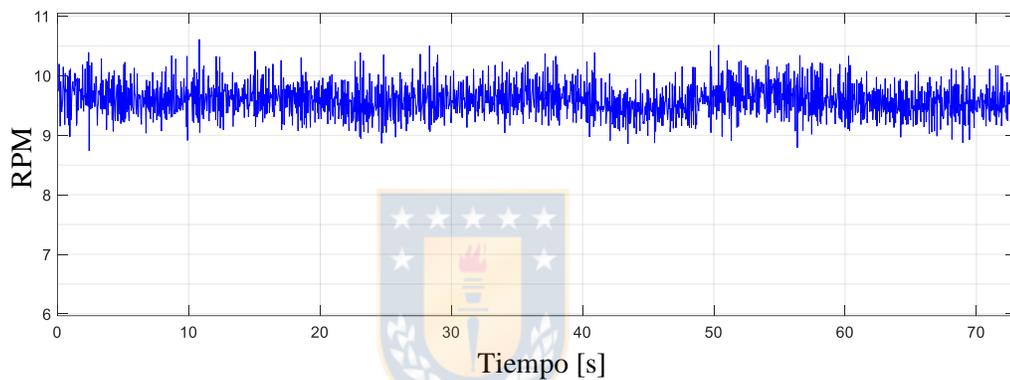


**Figura 33.** Caso 1: amplitud *peak* de las transientes AE principales.  
Fuente: elaboración propia.

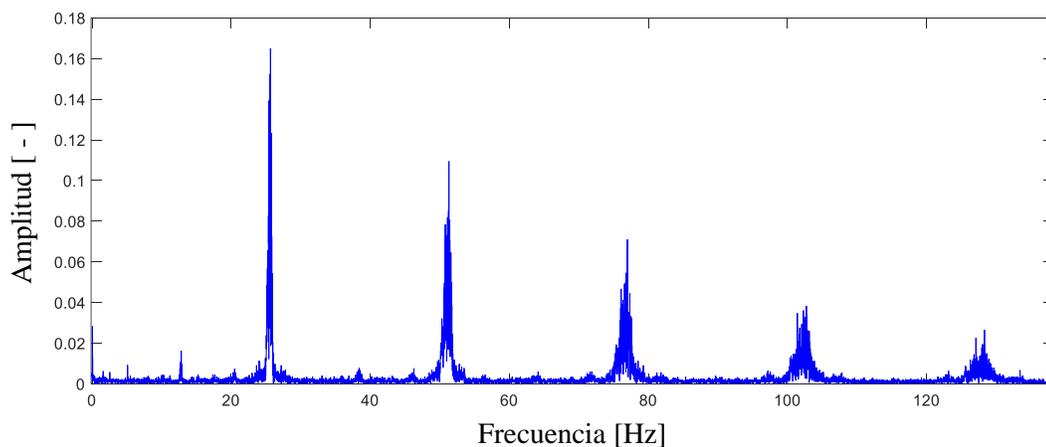


**Figura 34.** Caso 1: amplitud *peak* de las transientes AE intermedias.  
Fuente: elaboración propia.

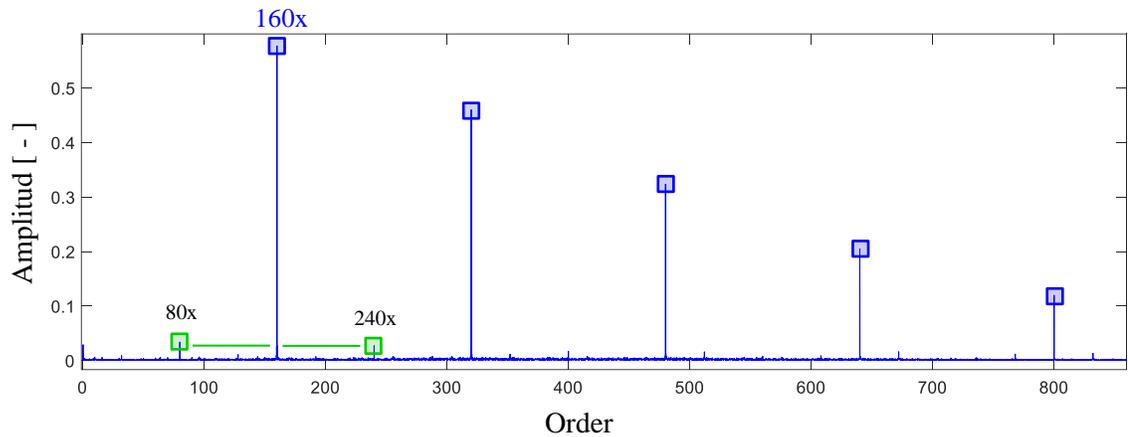
A partir de las transientes principales también es posible calcular la velocidad de rotación del motor en función del tiempo, pues estas actúan como un tacómetro con 160 pulsos por revolución, ver Figura 35. En esta medición la velocidad fluctúa entre 8,7 y 10,6 RPM, por lo tanto la utilización de la FFT no es recomendable, ver Figura 36. Por ello se utiliza el espectro en orden de la envolvente AE remuestreada con la velocidad de rotación (utilizando el método de *computed order tracking* [14]), ver Figura 37.



**Figura 35.** Caso 1: velocidad de rotación, obtenida de las transientes AE principales.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 36.** Caso 1: espectro FFT temporal de la envolvente de la señal AE.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 37.** Caso 1: espectro orden de la envolvente AE remuestreada.

Fuente: elaboración propia.



#### 4.8.1. Discusión

En la Figura 33, los gráficos circulares muestran el promedio y desviación estándar de la amplitud *peak* de las transientes principales, observándose que los pistones y levas de ambas hileras presentan un valor promedio similar con baja desviación. A partir de estos gráficos, y desde el punto de vista de las transientes principales, no se observa un comportamiento anormal en el motor.

En la Figura 34, los gráficos circulares muestran el promedio y desviación estándar de la amplitud *peak* de las transientes intermedias, observándose que el valor promedio es similar en todos los pistones y levas. La desviación estándar de los pistones 1 – 9 y 7 – 15, y de las levas 2 – 7 de la hilera 1 presenta un valor extremadamente alto en comparación con otros elementos, esto es debido a la transiente intermedia de amplitud

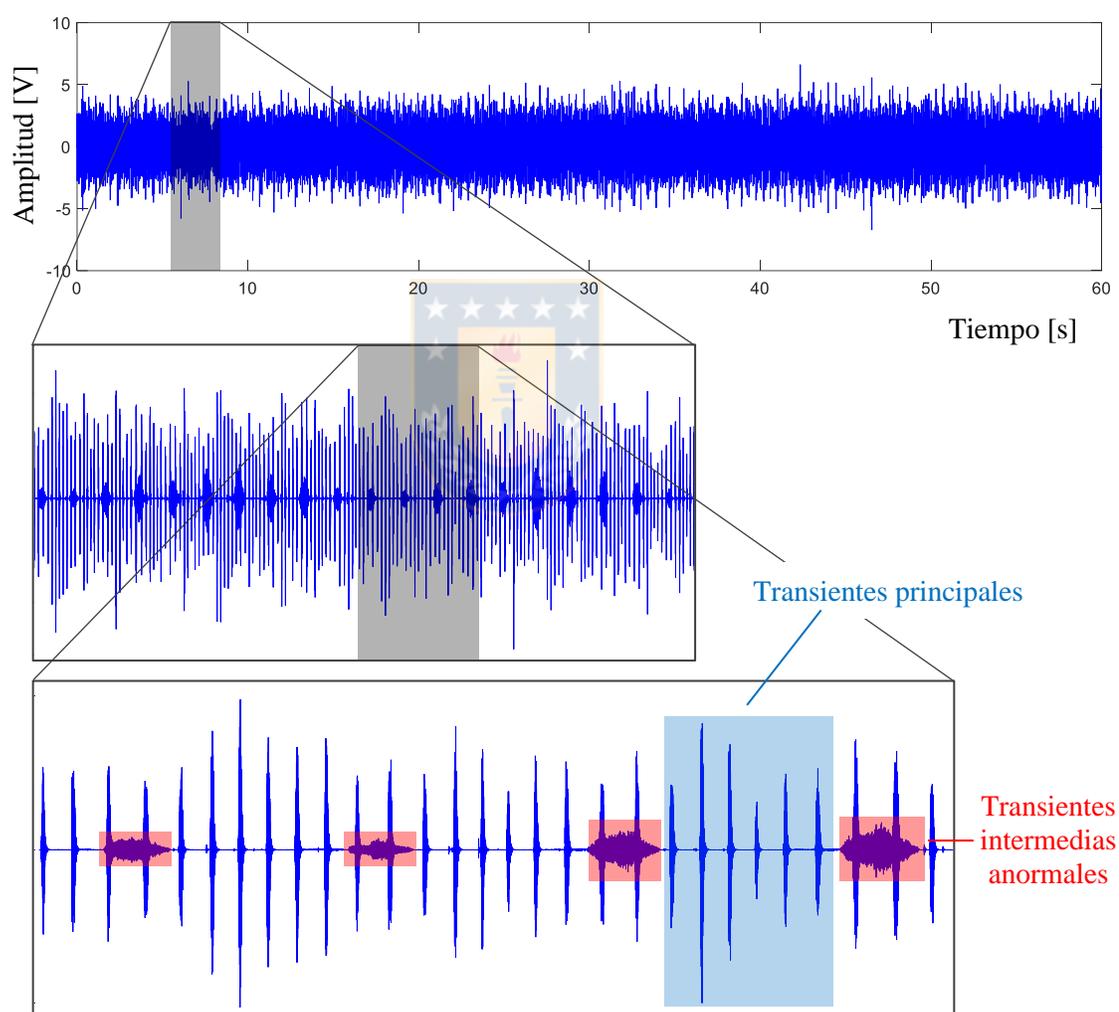
considerable mostrada en el zoom de la Figura 30. Sin embargo, si dicha transiente fuera ocasionada por un problema en el funcionamiento, se observaría un aumento en el valor promedio de alguno de los elementos, cosa que no ocurre dado que esta transiente no es recurrente; por ello, se concluye que dicha transiente fue ocasionada por una fuente externa al motor o por un evento específico no relacionado con la generación de daño. Debido a lo anteriormente expuesto, y desde el punto de la vista de las transientes intermedias, no se observa un comportamiento anormal en el motor.

En la Figura 36 se muestra el espectro FFT de la envolvente AE, en donde se observa una dispersión de las componentes frecuenciales debido a la variación de la velocidad de rotación a lo largo de la medición. Por ello se prefiere el uso del espectro de la envolvente AE remuestreada (ver Figura 37). En dicho espectro es posible apreciar más claramente las componentes asociadas a las transientes principales, las que, en este caso de estudio, corresponden a un orden de 160x (motor de 2 hileras de 10 levas y 16 pistones, ver sección 4.7.2). Dado que las transientes principales de la hilera 1 presentan una amplitud ligeramente superior a las de la hilera 2 (ver Figura 33), aparecen bandas laterales a 80x en las componentes frecuenciales de 160x.

Dado que en los gráficos circulares no se observan valores anormales y en el espectro frecuencial solo se observan las componentes normales de funcionamiento, se concluye que, en base a las herramientas antes mostradas, el motor hidráulico se encuentra en buenas condiciones.

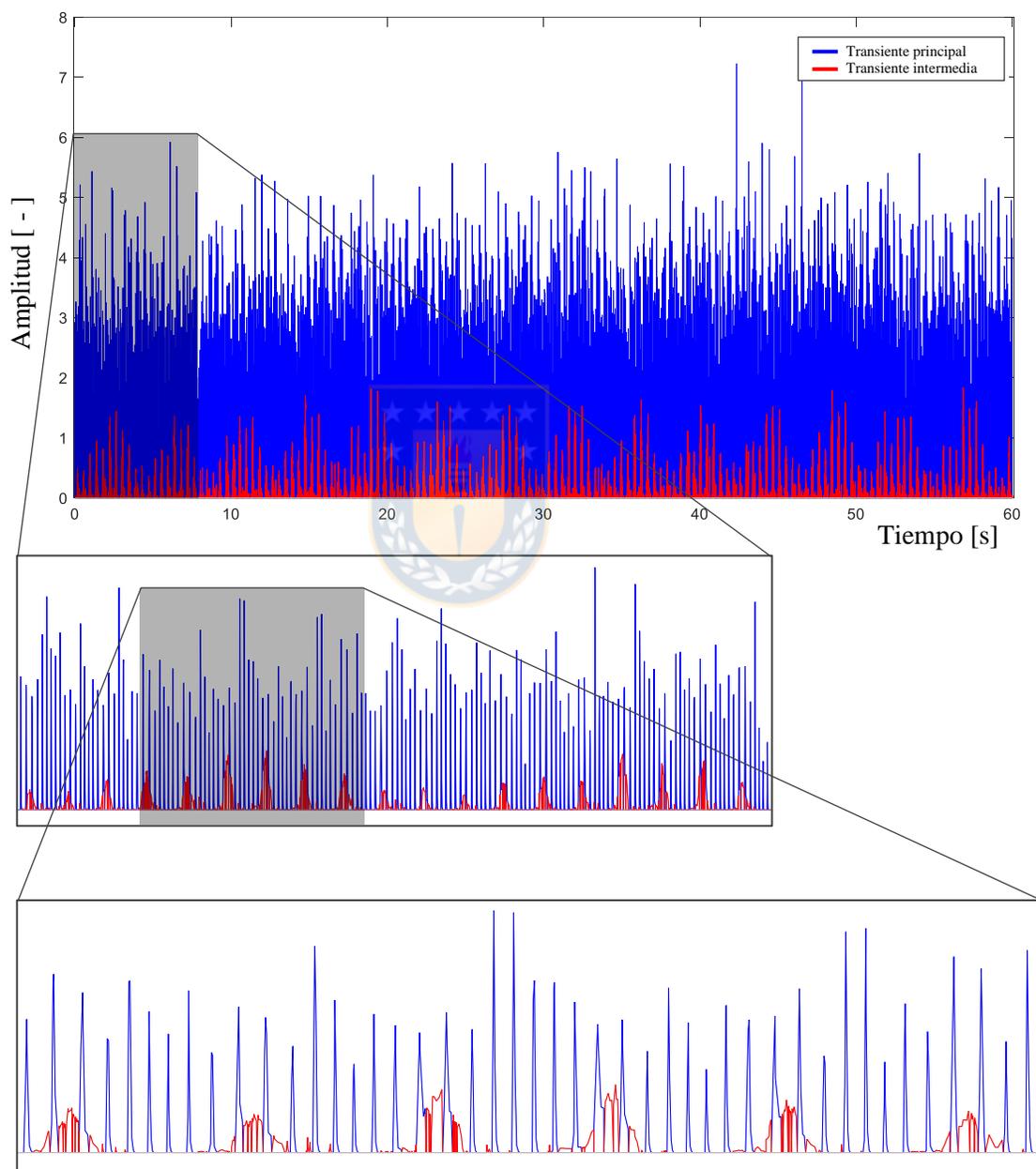
#### 4.9. Caso de estudio 2: Motor de 1 hilera con mediciones de presión

En este caso se analiza un motor hidráulico de 1 hilera de 16 pistones y 10 levas. Se realiza medición de AE, presión de descarga y presión de drenaje. En la Figura 38 se muestra la señal AE en bruto.



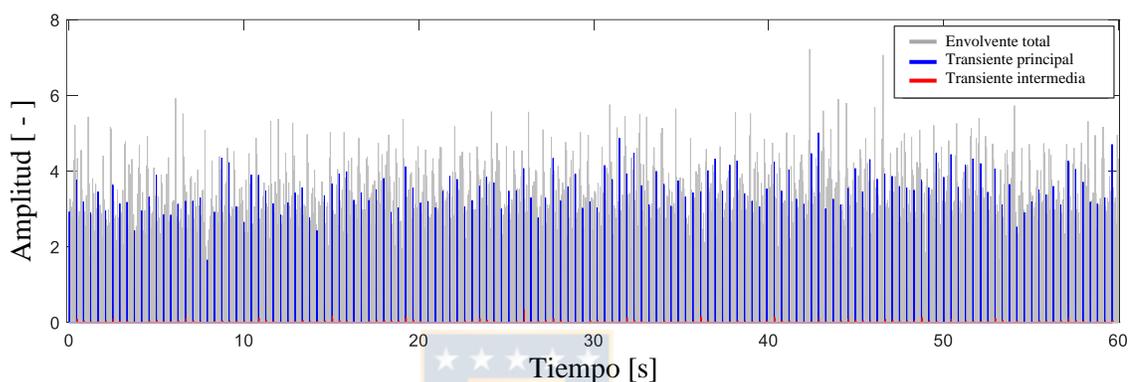
**Figura 38.** Caso 2: señal AE en bruto. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 39 se muestra la envolvente de las transientes AE que fueron definidas como principales e intermedias, resultado del “Programa: Motores Hidráulicos”.

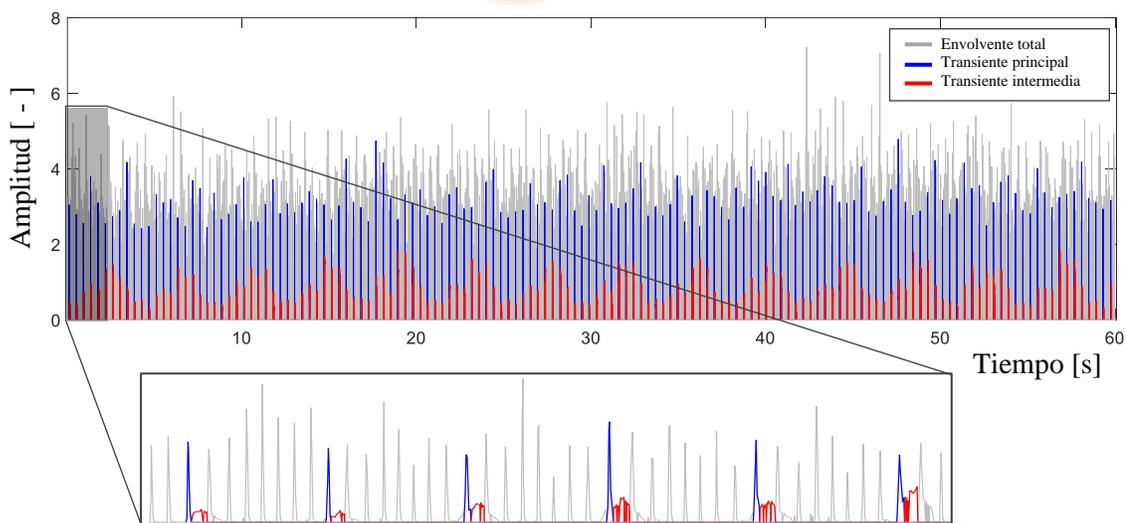


**Figura 39.** Caso 2: envolvente de transientes AE principales e intermedias.  
Fuente: elaboración propia.

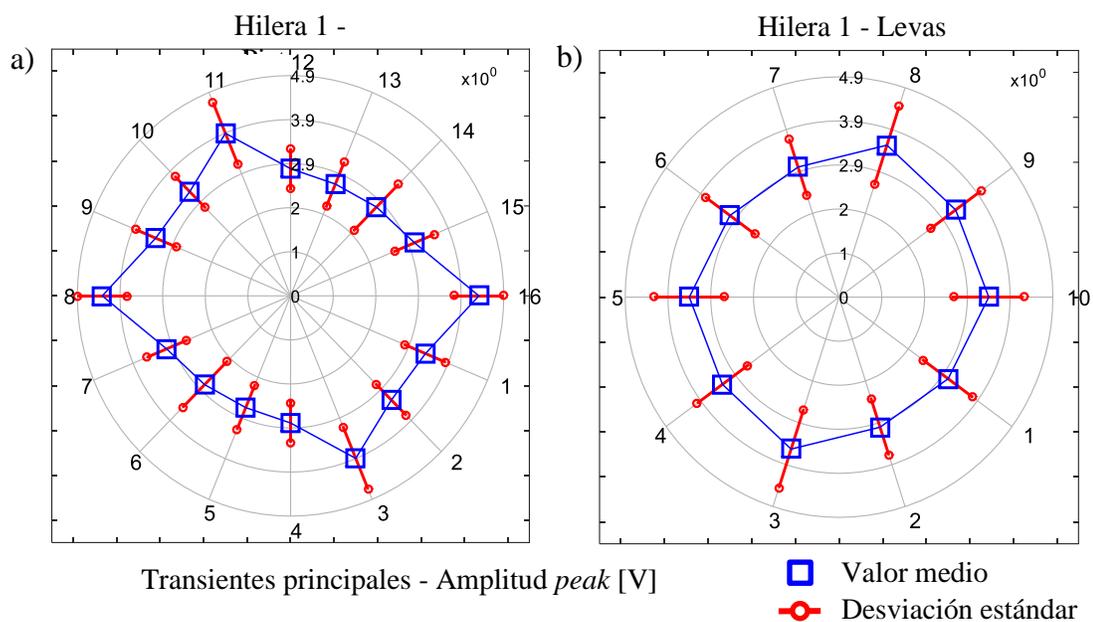
En la Figura 40 y Figura 41 se muestran las transientes principales e intermedias asignadas a los pares de pistones, por ejemplo, 1 – 9 y 7 – 15, de acuerdo con el orden de activación de la sección 4.7.3. Con las transientes asignadas se crean los gráficos circulares de la Figura 42 y Figura 43.



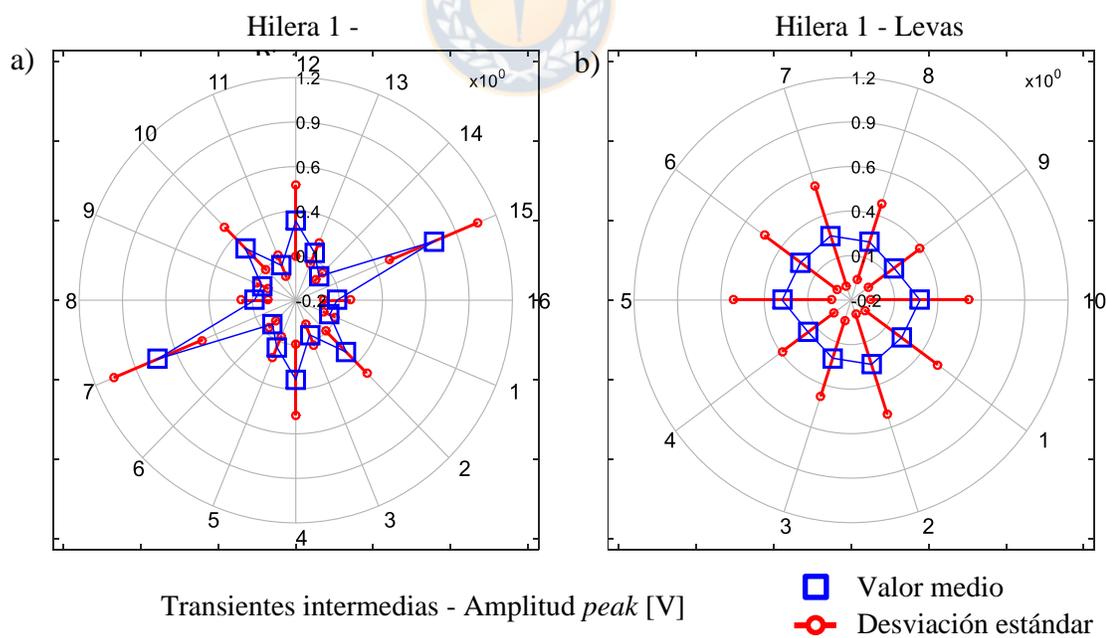
**Figura 40.** Caso 2: transientes AE principales e intermedias de los pistones 1 – 9.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 41.** Caso 2: transientes AE principales e intermedias de los pistones 7 – 15.  
Fuente: elaboración propia.

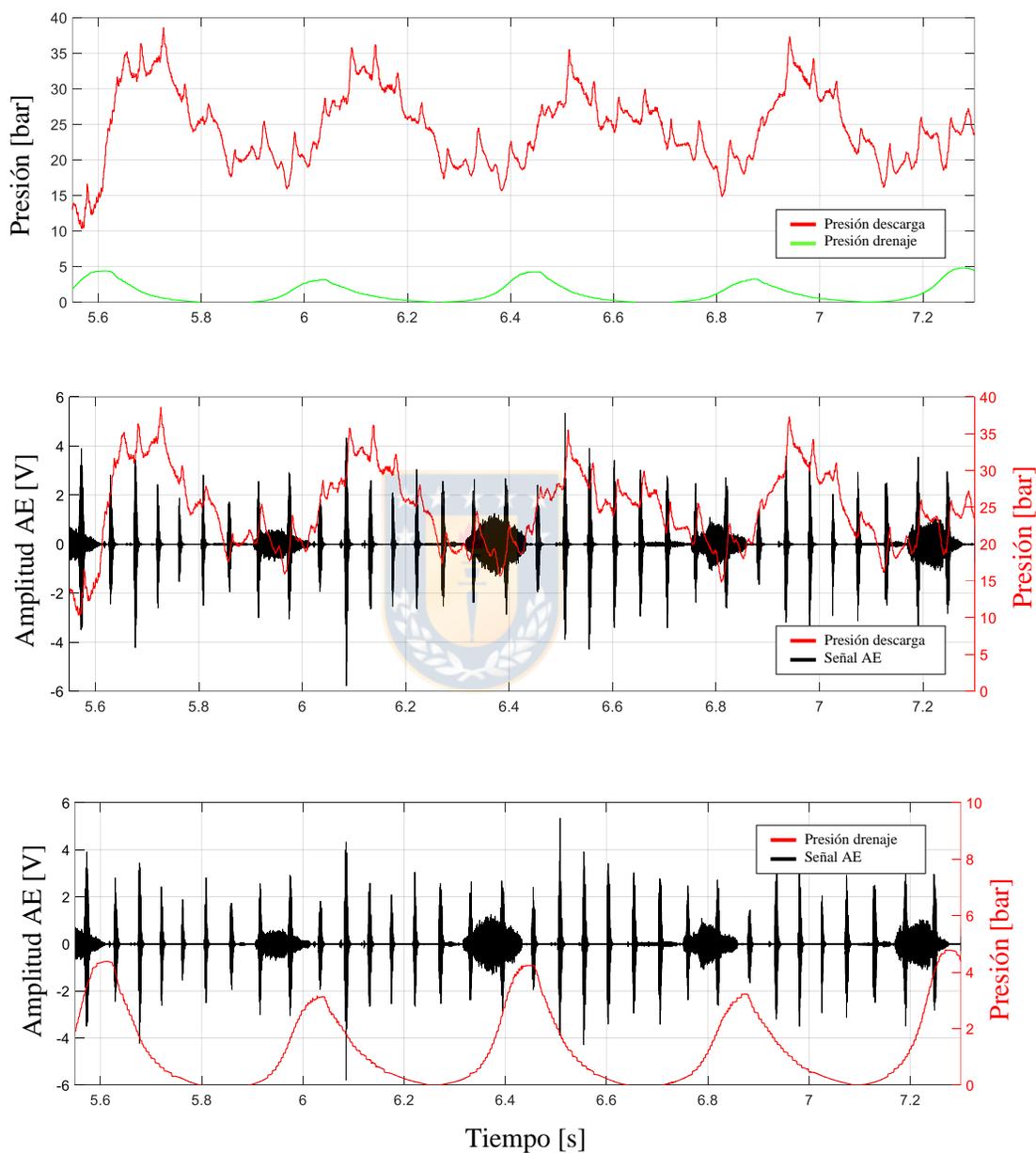


**Figura 42.** Caso 2: amplitud *peak* de las transientes AE principales.  
 Fuente: elaboración propia.



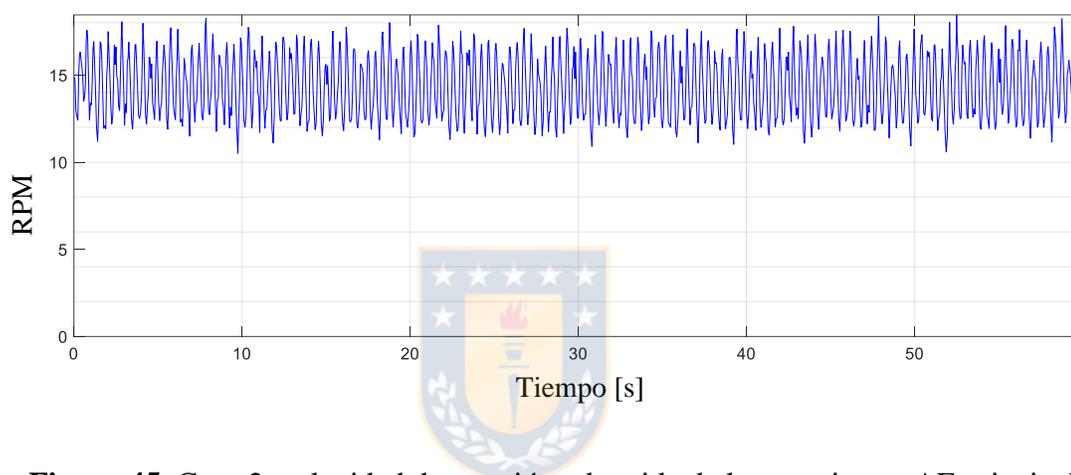
**Figura 43.** Caso 2: amplitud *peak* de las transientes AE intermedias.  
 Fuente: elaboración propia.

En la Figura 44 se muestra la presión de descarga y de drenaje junto con señal AE.

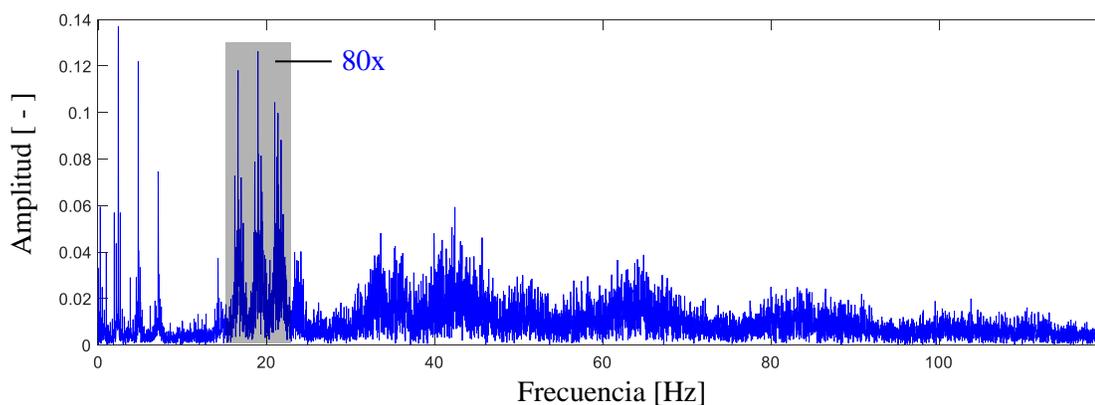


**Figura 44.** Caso 2: presión de descarga y drenaje con señal AE.  
Fuente: elaboración propia.

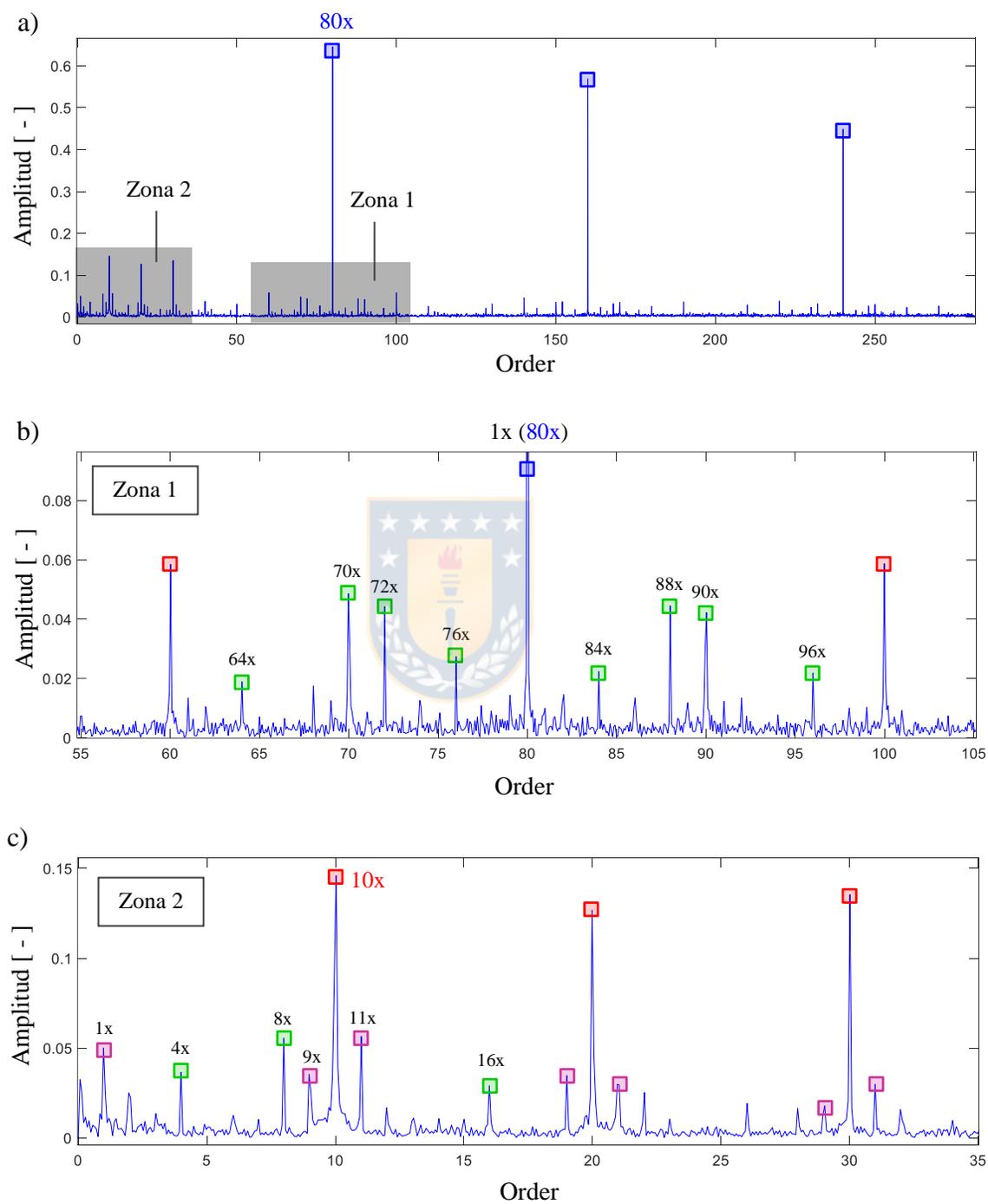
A partir de las transientes principales se calcula la velocidad de rotación del motor en función del tiempo, ver Figura 45. En este caso el valor fluctúa entre 10,5 y 18,5 RPM, por lo que la utilización de la FFT es aún menos recomendable que en el caso 1, ver Figura 46. Por ello se utiliza el espectro en orden de la señal remuestreada con la velocidad de rotación, ver Figura 47.



**Figura 45.** Caso 2: velocidad de rotación, obtenida de las transientes AE principales.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 46.** Caso 2: espectro FFT temporal de la envolvente de la señal AE.  
Fuente: elaboración propia.

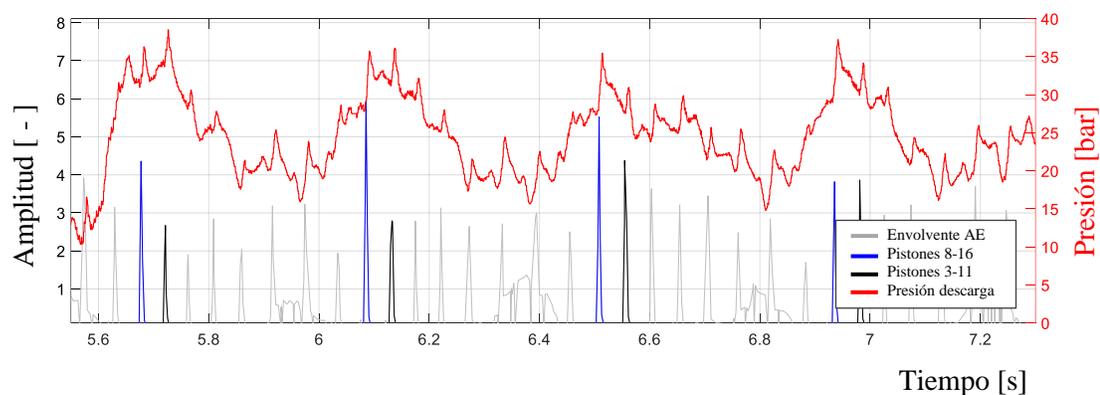


**Figura 47.** Caso 2: Espectro order de la envolvente remuestreada de la señal AE.  
a) Vista general, b) Zona 1, c) Zona 2. Fuente: elaboración propia.

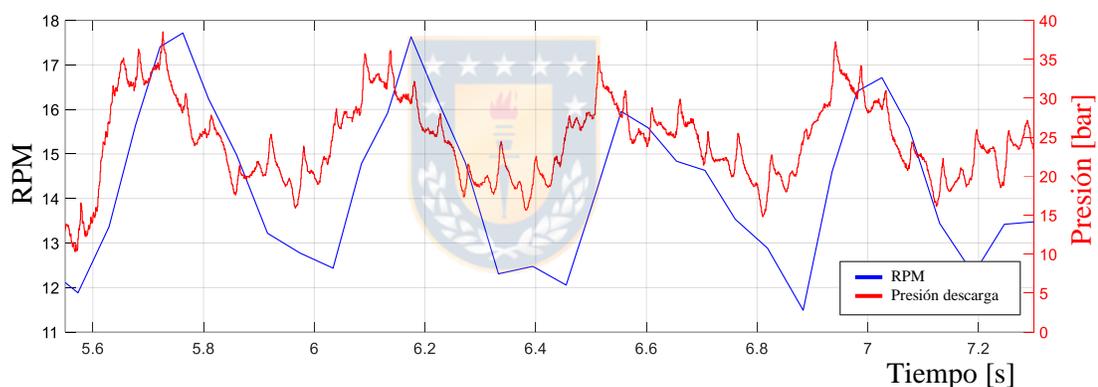
Los símbolos cuadrados azules de la Figura 47 representan los armónicos de 80x y los símbolos verdes sus bandas laterales. Los símbolos rojos representan los armónicos posiblemente anormales de 10x y los símbolos purpura sus bandas laterales.

#### 4.9.1. Discusión

En la Figura 42, los gráficos circulares muestran el promedio y desviación estándar de la amplitud *peak* de las transientes principales. Se observa que los PPR asociados a los pares de pistones 8 – 16 y 3 – 11 tienen un valor claramente superior al resto de elementos. En la Figura 48 se observa que dichos pares de pistones se activan en el instante en que el valor promedio de la presión de descarga es máximo, es decir, durante la activación de los PPR asociados a los pistones antes mencionados, se produce una liberación de fluido de descarga con mayor fuerza que durante la activación de otros PPR. Simultáneo a esta liberación de descarga, el motor recibe el fluido de alta presión con una fuerza proporcional al fluido de descarga, es decir, con una fuerza mayor al promedio, provocando una aceleración en la velocidad de rotación del motor (ver Figura 49). Esta conjunción de fluidos de alta y baja presión con alto valor promedio provoca que la amplitud de las transientes principales de los pares de pistones 8 – 16 y 3 – 11 aumente. Por lo anteriormente explicado, los pares de pistones mencionados estarían sometidos a condiciones de presión superior a las normales, generando en ellos una sobrecarga que, con el tiempo, podría provocar la falla en estos elementos del motor hidráulico.



**Figura 48.** Caso 2: transientes principales asociadas a los pistones 8 – 16 y 3 – 11, junto con la presión de descarga. Fuente: elaboración propia.



**Figura 49.** Caso 2: presión de descarga y RPM. Fuente: elaboración propia.

La duración de las transientes intermedias observadas en la señal AE (ver Figura 38) es superior al periodo temporal con que aparecen las transientes principales, por lo que el algoritmo divide dichas transientes intermedias y asigna los trozos a distintos PPR. En la Figura 41 se observa esta situación, en donde al par de pistones 7 – 15 le fue asignado el trozo de mayor amplitud. Esta disección de las transientes intermedias también se aprecia en los gráficos circulares de la Figura 43, en donde los trozos de la transiente original son

asignados a tres pares de pistones distintos (2 – 10, 4 – 12 y 7 – 15). Sería un error afirmar que alguno/s de estos tres pares de pistones es el responsable de las transientes intermedias, ya que no se sabe durante qué etapa del proceso de activación de las PPR son generadas. A pesar de ello, los gráficos circulares de la Figura 43 indican que la aparición de dichas transientes intermedias se concentra en algunos pistones y, por ende, existe una periodicidad ocasionada por un problema o condición que necesita ser identificada.

La dispersión de las componentes frecuenciales de la FFT (ver Figura 46) es aún mayor que en el caso de estudio 1, debido a la alta variabilidad en la velocidad de rotación. Por ello se utiliza el espectro de la envolvente AE remuestreada (ver Figura 47). En dicho espectro es posible apreciar las componentes asociadas a las transientes principales, las que corresponden a un orden de 80x (motor de 1 hilera de 10 levas y 16 pistones, ver sección 4.7.2). Existen 2 zonas de interés en el espectro de la Figura 47:

1) Zona 1, bandas laterales de componentes 80x:

- Banda a 4x y 8x. Dado que no calzan con ninguna banda conocida, se asume que son ocasionadas por la variabilidad de las condiciones de carga externas al motor.
- Banda a 10x, ocasionada por la alta amplitud de las transientes principales asociadas a los pistones 8 – 16 y 3 – 11 (ver Figura 48) de acuerdo con las fluctuaciones de la presión de descarga.
- Banda a 16x, ocasionada por el alejamiento y acercamiento de los PPR con respecto al sensor AE, ver Tabla 7.

2) Zona 2, componentes de baja frecuencia:

- Componentes a 4x, 8x y 16x, ocasionadas por las bandas laterales a dichas frecuencias de orden en la componente 80x.
- Componente a 10x, ocasionada por las transientes intermedias observadas en la Figura 39, las cuales presentan bandas laterales a 1x.

Considerando las observaciones realizadas a partir de las gráficas ya mostradas, se concluye que:

- El motor presenta problemas de funcionamiento en uno de los pistones de algún PPR, dado que se generan transientes intermedias de gran amplitud 10 veces por revolución (justamente la cantidad de veces que un pistón se activa durante una revolución) con una modulación de 1x (dado que el pistón afectado se aleja del sensor AE); esto se observa en la zona 2 del espectro mostrado en la Figura 47.

La fuente del problema podría ser la liberación anormal del fluido de drenaje, el cual presenta un alza de valor previo al alza de amplitud de la presión de descarga (ver Figura 44). Esto tiene como consecuencia el desbalanceamiento de los ciclos de carga, descarga y drenaje de fluido de trabajo, generándose variaciones en la velocidad de rotación y la sobrecarga de alguno de los PPR del motor.

## CAPÍTULO 5

### Conclusiones y perspectivas

#### 5.1. Conclusiones

En vista de los objetivos específicos se concluye que:

1. Con respecto al Programa: Detección de transientes (OE1 y OE2):

El enfoque basado en la envolvente triangular es utilizado en señales AE medidas en distintas aplicaciones:

- Ensayo de ruptura en probetas de diversos materiales (sección 3.3). En donde el programa logra detectar y almacenar individualmente las transientes en una señal en que hay contenidas múltiples ráfagas, situación en la que el método convencional del umbral fijo presenta dificultades para la detección correcta de transientes.
- Durante el funcionamiento de motores hidráulicos de pistones radiales (Capítulo 4). Si bien en estas señales no hay tantas ráfagas de transientes como en el ejemplo de la sección 3.3, se resalta que el programa solo requiere tres parámetros de entrada para detectar transientes de formas tan disimiles: transientes principales, de gran amplitud y duración; y transientes intermedias, de baja amplitud y duración.

Por lo tanto, se concluye que el método de la envolvente triangular es capaz de detectar correctamente las transientes contenidas en señales AE medidas durante distintas aplicaciones.

2. Con respecto a los motores hidráulicos (OE3, OE4 y OE5):

En las primeras secciones del Capítulo 4 se explica el funcionamiento de los motores hidráulicos de pistones radiales (OE3), información con la que es posible crear la metodología de análisis basada en la activación de los pares Pistón-Rodillo (PPR) a partir de la cual se crea el Programa: Motores Hidráulicos (OE4). De la utilización de dicho programa se concluye lo siguiente:

- En el caso de estudio 1 (sección 4.8) se sabe de antemano que el motor hidráulico analizado está en buenas condiciones, y así lo manifiestan las figuras obtenidas: no se aprecia una gran cantidad de transientes intermedias, los gráficos circulares indican que las transientes asociadas a cada uno de los elementos del motor tienen una amplitud similar, y el espectro en orden no muestra frecuencias anormales.
- En cambio, en el caso de estudio 2 (sección 4.9) el programa entrega resultados que indican que el motor hidráulico analizado presenta problemas en su funcionamiento: se aprecian transientes intermedias periódicas con modulación de amplitud a 1x, los gráficos circulares indican que las transientes asociadas a algunos de los elementos del

motor tienen una amplitud superior al resto, y en el espectro en orden se aprecian numerosas componentes frecuenciales asociadas a un funcionamiento anormal del motor.

De lo anteriormente expuesto, se concluye que las AE son un método NDT con el que es posible evaluar la integridad estructural y el funcionamiento de motores hidráulicos de pistones radiales.

## 5.2. Perspectivas a futuro

- Se planea utilizar el programa de detección de transientes en el área de los materiales compuestos para el monitoreo de la formación y crecimiento de grietas, y para caracterizar las fallas de las distintas zonas que componen a estos materiales (matriz, fibra e interfaz).
- Con respecto al proceso de detección de transientes realizado por el programa de detección de transientes: pulir y mejorar el proceso de detección agregando los métodos de compresión de señales utilizados en el área de la producción musical, tales como la compresión multibanda, limitadores y filtros frecuenciales. Con dichos métodos sería posible realzar la aparición de transientes en los pasos previos (DF1 a DF4) a la obtención de la envolvente triangular (DF5), mejorando el proceso de detección.
- Para los motores hidráulicos: medir, siempre que se pueda, la presión de los fluidos de alta presión, descarga (baja presión) y drenaje, ya que entregan información útil

que complementa a los resultados del programa de motores hidráulicos a la hora de analizar el funcionamiento del motor. Para mejorar los diagnósticos se necesita realizar mediciones rutinarias cada cierto tiempo y así evaluar la evolución de los resultados entregados por el programa.



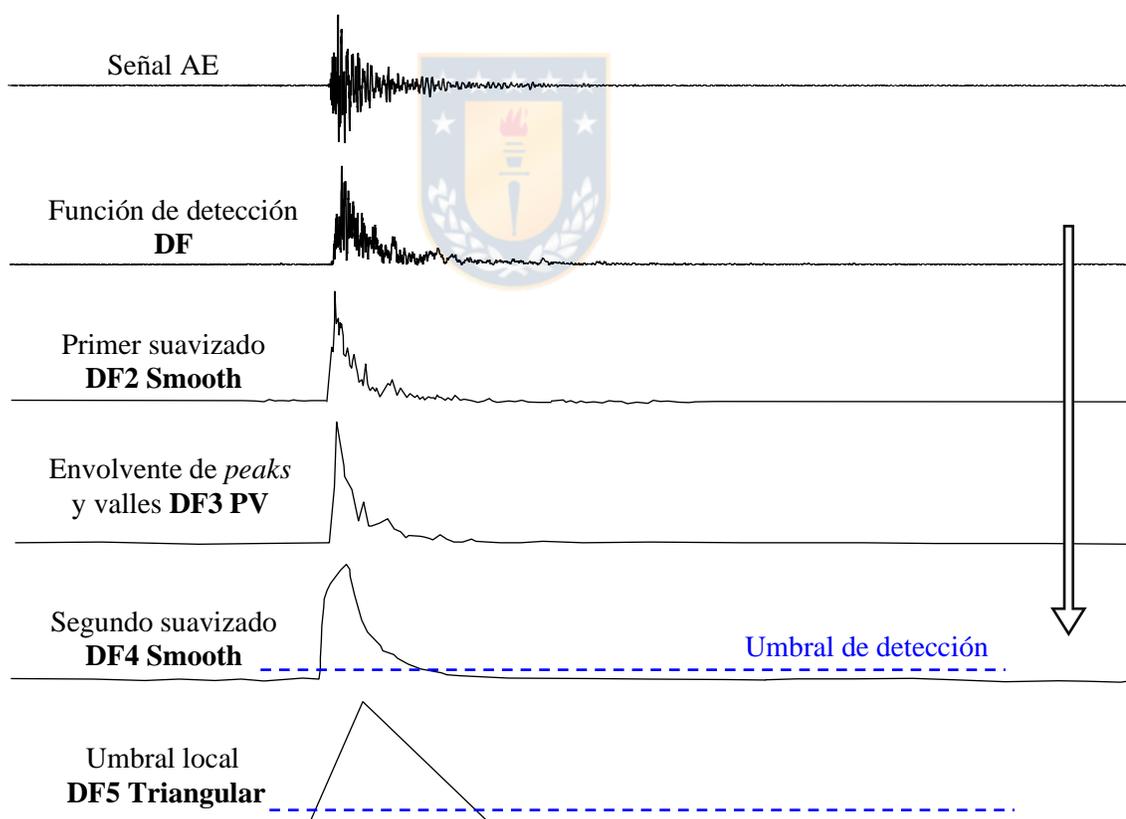
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Butterworth-Heinemann. *Chapter 31 - Non-Destructive Testing. In Instrumentation Reference Book (Fourth Edition)*, Series Ed. Boyes, W. Boston, pp 567–592. (2010).
- [2] Moradian, O.Z., Li, B.: *Hit based acoustic emission monitoring of rock fractures: challenges and solutions*. In: *Advances in Acoustic Emission Technology*. Springer, Cham. (2015).
- [3] Unnthorsson, R. *Hit Detection and Determination in AE Bursts*. InTech, 1–19. (2013).
- [4] Carrasco, Á., Méndez, F., Leaman, F.; Molina, C. *Short Review of the Use of Acoustic Emissions for Detection and Monitoring of Cracks*. *Acoust Aust* 49, 273–280. (2021).
- [5] Sagasta, F.; Zitto, M. E.; Piotrkowski, R.; Benavent-Climent, A.; Suarez, E.; Gallego, A. *Acoustic Emission Energy B-Value for Local Damage Evaluation in Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Loadings*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 102, 262–277. (2018).
- [6] Leaman, F.; Niedringhaus, C.; Hinderer, S.; Nienhaus, K. *Evaluation of Acoustic Emission Burst Detection Methods in a Gearbox Under Different Operating Conditions*. *Journal of Vibration and Control*, 25. (2018).
- [7] Daniel, R.; Paulus, T. *Chapter 11 - Introduction to Gate Drives. In Lock Gates and Other Closures in Hydraulic Projects; Lock Gates and Other Closures in Hydraulic Projects; Butterworth-Heinemann*, pp 705–784. (2019).
- [8] Rexroth. *Hägglunds CA: Hägglunds CASilnik hydrauliczny wielotłokowy promieniowy*, Rexroth Bosh Group. (2019).
- [9] Rexroth. *Hägglunds CBm: Motor Hidráulico De Pistones Radiales: Manual de Mantenimiento*, Rexroth Bosh Group. (2016).
- [10] Harper, P.; Dwyer-Joyce, R. S.; Sjödin, U.; Olofsson, U. *Evaluation of an Ultrasonic Method for Measurement of Oil Film Thickness in a Hydraulic Motor Piston Ring*. *Life Cycle Tribology; Elsevier*, Vol. 48, pp 305–312. (2005).
- [11] Isaksson, P.; Nilsson, D.; Larsson, R. *Elasto-Hydrodynamic Simulation of Complex Geometries in Hydraulic Motors*. *Tribology International*, 42 (10), 1418–1423. (2009).
- [12] Lewis, R. *Friction in a Hydraulic Motor Piston/cam Roller Contact Lined with PTFE Impregnated Cloth*. *Wear*, 266 (7), 888–892. (2009).
- [13] Nilsson, D.; Prakash, B. *Investigation into the Seizure of Hydraulic Motors*. *Tribology International*, 43 (1), 92–99. (2010).
- [14] Saavedra, P. N.; Rodríguez, C. *Accurate Assessment of Computed Order Tracking*. *Shock and Vibration*, 13, 13–32. (2006).

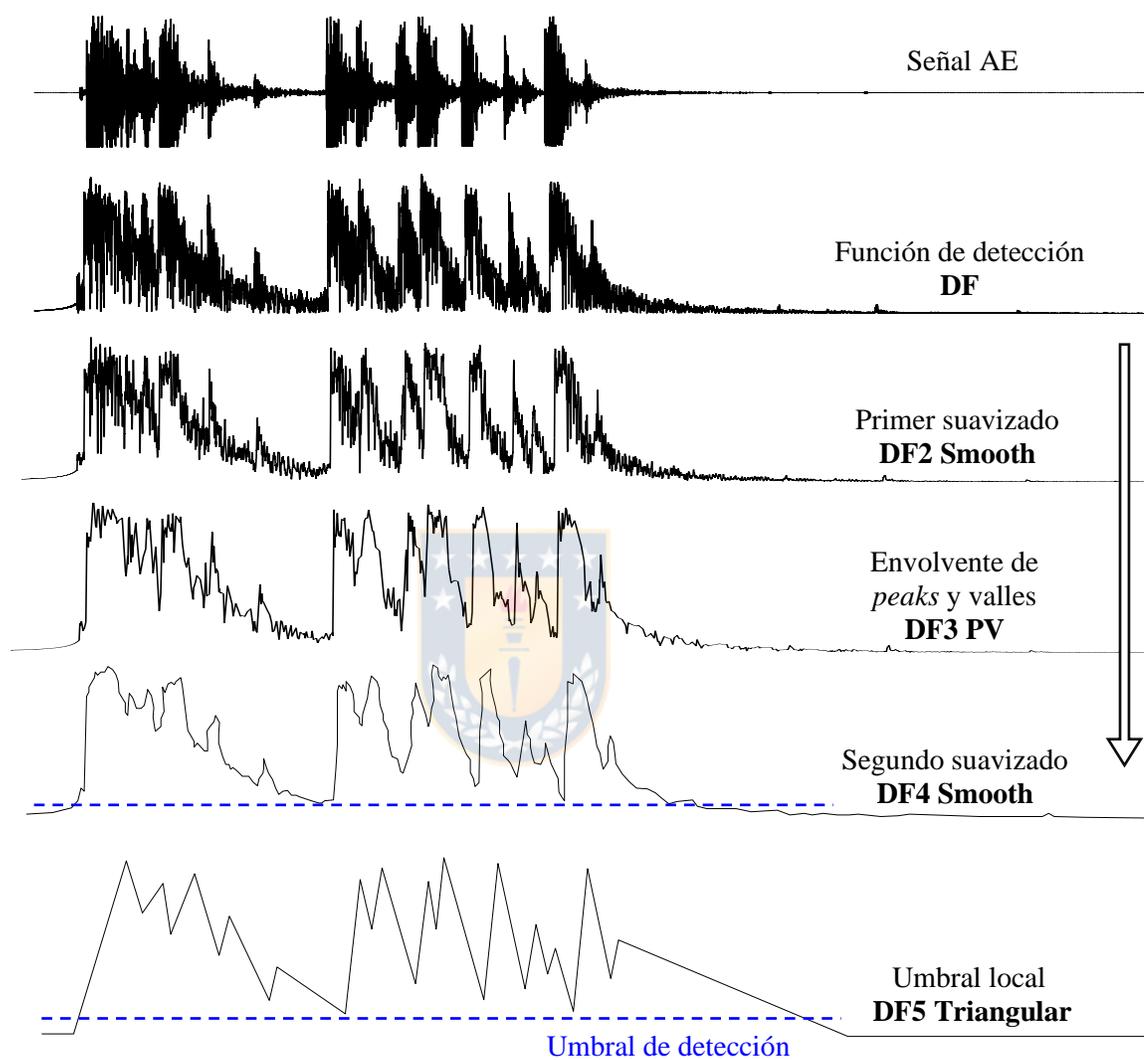
## ANEXOS

### Anexo A: Envolvente triangular

Se presenta dos esquemas que permiten visualizar el proceso de obtención de la envolvente triangular. En la Figura 50 se aprecia una transiente aislada y en la Figura 51 se aprecia una ráfaga de transientes. Para ambos casos, los triángulos de la etapa DF5 representan una transiente detectada.

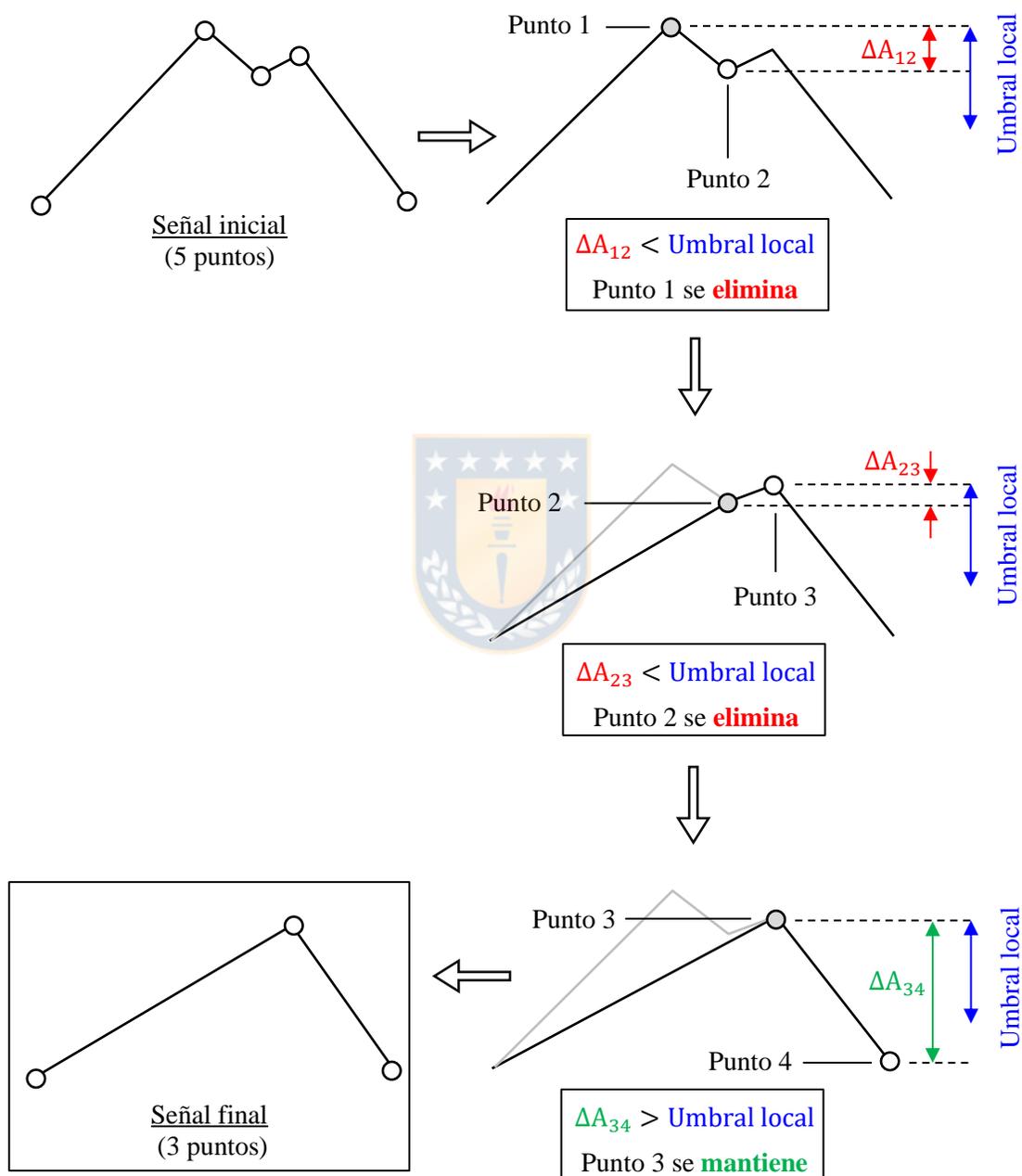


**Figura 50.** Anexo A: proceso de detección para señal AE con una transiente aislada.



**Figura 51.** Anexo A: proceso de detección para señal AE con múltiples transientes.

## Anexo B: Reducción por umbral local.



**Figura 52.** Anexo B: esquema del procedimiento del umbral local.