

Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa

Franco David Cajas-Muñoz^{*1}, Cristian Paúl Torres-Díaz^{*2}, Mariela Cerrada-Lozada^{*3}, Luis-Renato Ortega-Lucero^{*4}, René-Vinicio Sánchez-Loja^{*5}

^{*}Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC), Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

¹Email: fcajas@est.ups.edu.ec

²Email: ctorresd@est.ups.edu.ec

³Email: mcerrada@ups.edu.ec

⁴Email: lortegal@est.ups.edu.ec

⁵Email: rsanchezl@est.ups.edu.ec

Resumen

Este estudio se centró en la adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa. Se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre el monitoreo de condición y los fallos más relevantes en compresores. Se acondicionó un sistema de adquisición de datos y se diseñaron planes experimentales para simular fallos en válvulas y rodamientos. Las señales se adquirieron utilizando acelerómetros y micrófonos capacitivos. Los resultados mostraron que las señales acústicas son sensibles a cambios en amplitud por los fallos de manera similar que ocurre con señales de vibración. Se concluye que ambas técnicas proporcionan una evaluación más completa del estado del compresor. El estudio destaca la importancia de utilizar técnicas de inteligencia artificial para el análisis de señales acústicas debido a las capacidades de procesamiento de señales que dispone, sentando las bases para el desarrollo de sistemas de diagnóstico más robustos en compresores recíprocantes.

Palabras clave:

Monitoreo de la condición, Compresor recíprocante, Señales acústicas, Señales de vibración, Diagnóstico de fallos, Válvulas, Rodamientos.

Abstract

This study focused on acquiring acoustic and vibration signals for fault diagnosis in a double-stage reciprocating compressor. A comprehensive literature review was performed on condition monitoring and the most relevant compressor faults. A data acquisition system was conditioned, and experimental plans were designed to simulate valve and bearing faults. Signals were acquired using accelerometers and capacitive microphones. The results showed that acoustic signals are sensitive to changes in amplitude due to failures in a similar way that occurs with vibration signals. It is concluded that both techniques provide a more complete compressor condition assessment. The study highlights the importance of using artificial intelligence techniques for analyzing acoustic signals due to signal processing capabilities, laying the foundation for developing more robust diagnostic systems in reciprocating compressors.

Keywords:

Condition monitoring, Reciprocating compressor, Acoustic signals, Vibration signals, Fault diagnosis, Valves, Bearings.

1. Introducción

El mantenimiento basado en la condición (MBC) es un método utilizado dentro del mantenimiento

predictivo, el cual emplea la información que se obtiene a través del monitoreo de la condición (MC) [1]. Si el MBC se lleva correctamente se puede reducir el costo, tareas innecesarias y riesgos asociados al

mantenimiento preventivo, contribuyendo así a la mejora en la productividad [2], [3]. En la producción industrial un recurso importante es el aire comprimido, este es considerado el cuarto recurso del que no se puede prescindir en la industria [4]. De tal modo, que contar con un compresor confiable que garantice que la producción de aire comprimido sea continua; evitará desperdicio de material y más importante aún, no generará costos adicionales [5]. Así pues, entre los compresores utilizados en la industria los reciprocantes son los más comunes. En ellos las áreas de mayor preocupación son aquellas partes con una vida finita, como rodamientos, sellos, anillos y válvulas, o partes que están sometidas a esfuerzos mecánicos. Estos elementos representan costos elevados en mantenimiento. Se indica que las válvulas representan el 36% de los casos en que el compresor debe ser reparado y representan el 50% del costo total de reparación de todo compresor. Para aumentar la confiabilidad en estos elementos y del compresor en general, se usa el monitoreo de condición para mantener la máquina operando a su máximo potencial [4].

En la actualidad, los sistemas de monitoreo de la condición de compresores sólo usan mediciones indirectas, como diagramas P-V [4]. Se ha verificado que mediante el monitoreo de la condición que utilice como parámetros a las señales de vibraciones, se puede lograr un diagnóstico temprano para disminuir paradas de emergencia en las máquinas [6]. De igual forma, los avances en las técnicas de procesamiento de señales acústicas han permitido que estas señales desempeñen un papel importante en la monitorización del estado de los componentes críticos en máquinas rotativas [4]. Una de las ventajas de las señales acústicas radica en la sensibilidad a las perturbaciones causadas por fallos [7], además la toma de datos se realiza de forma no intrusiva, sin contacto [8].

Aunque se ha realizado una buena cantidad de trabajos para controlar la condición de los compresores, se ha realizado muy poco trabajo para detectar y diagnosticar fallos por medio de la adquisición y análisis de señales acústicas y de vibración [4]. Existen estudios que permiten identificar cuáles y donde se producen los fallos más comunes. Uno de estos trabajos es el desarrollado por Guerra [4], el cual consiste en una encuesta de literatura y análisis de registros de mantenimiento de socios de la industria. En esta encuesta se llega a obtener los siguientes porcentajes significativos de fallos en compresores: 36% en válvulas, empaques 17,6%, rodamientos 8,8%, anillos del pistón 7,1%, bandas 6,8%, depósitos 6,8%, sistema de lubricación de cilindro 5,1%, instrumentación 5,1% y otros 3,4%. Además, en dicho trabajo se ha demostrado que el mantenimiento de los compresores es un asunto costoso.

También, dentro de los limitados trabajos sobre diagnóstico de fallos en compresores se encuentra el

trabajo realizado por Van Tung Tran [9], el cual consiste en realizar metodologías para implementar señales de vibración, presión y corriente para el diagnóstico de fallos de válvulas en los compresores reciprocantes, esa metodología se ha validado con las señales de un compresor de doble etapa bajo diferentes condiciones de válvula; la precisión lograda en este estudio indica que la metodología propuesta es altamente confiable y aplicable en el diagnóstico de fallos de compresores reciprocantes.

Basándose en los trabajos antes mencionados, es indispensable ampliar la investigación sobre el MC para el diagnóstico de fallos en los elementos mecánicos de los compresores reciprocantes y sobre las técnicas o señales que se deben emplear para realizar dicho monitoreo. Con estos antecedentes, se explica que el diagnosticar fallos ayudaría a tener un mantenimiento eficiente y aumentar la productividad. Así mismo, monitorear el estado del compresor mediante señales de vibración mejoraría la vida útil y el rendimiento de los mismos; ya que es la técnica de mayor desarrollo en el sector industrial [10]; en cambio, la técnica de análisis por medio de señales acústicas ha empezado a tener una gran importancia principalmente por dos características: la primera que las señales acústicas son más sensibles a las perturbaciones causadas por fallos y la segunda que la toma de datos se realiza de forma no intrusiva, es decir, no es necesario que la instrumentación tenga contacto directo con la máquina para la adquisición de señales, con ello se puede realizar la toma de datos sin necesidad de parar la producción [7], [8], [11].

2. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se ha planteado como objetivo principal adquirir señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor reciprocante de simple efecto-doble etapa. Como objetivos secundarios se ha planteado: a) Identificar las técnicas del monitoreo de la condición y los fallos más relevantes en los elementos mecánicos críticos de los compresores reciprocantes de simple efecto-doble etapa; b) Acondicionar el sistema de adquisición de datos y el compresor reciprocante de simple efecto-doble etapa para el levantamiento de bases de datos de señales acústicas y de vibración de fallos en elementos mecánicos críticos, y c) Adquirir señales acústicas y de vibración con los distintos fallos construidos en los elementos críticos del compresor reciprocante de simple efecto-doble etapa.

2.1. Revisión bibliográfica del MC

2.1.1. Monitoreo de vibraciones

El monitoreo de las señales de vibración continúa siendo uno de los métodos de MC más útiles y

populares, puesto que se logra identificar con precisión el 90% de todos los fallos de maquinaria rotativa, debido a las variaciones en las señales de vibración [12], [13].

En cuanto al monitoreo en compresores reciprocantes, las señales de vibración emitidas contienen características no lineales, por ejemplo, debido a los impactos resultantes del movimiento de las válvulas de succión y descarga. Las características extraídas de los dominios de tiempo y frecuencia de estas señales pueden utilizarse para evaluar la condición del sistema [14]. Un compresor en buenas condiciones tiene ciertos parámetros de vibración, el desarrollo de un fallo altera esos parámetros, lo cual hace que el fallo sea posible de detectar [15].

2.1.2. Monitoreo de señales acústicas

Las señales acústicas son un conjunto de vibraciones que se propagan por un medio elástico como el aire y son audibles para el ser humano, pueden ser causadas por alteraciones mecánicas producidas en elementos específicos de una máquina y se pueden usar para detectar y monitorear la aparición de fallos [16]. Los avances en las técnicas de procesamiento de señales y capacidades informáticas han permitido que la monitorización de señales acústicas desempeñe un papel importante en el diagnóstico de fallos de los componentes críticos en máquinas rotativas [11]. El monitoreo de señales acústicas proporciona datos confiables sobre diferentes condiciones de degradación de elementos mecánicos específicos, por lo que los algoritmos de aprendizaje automático pueden ser empleados para la detección temprana de fallos en un sistema en operación industrial [17].

Las ventajas más importantes radican en que las señales acústicas son más sensibles a las perturbaciones causadas por ciertos tipos de fallos en comparación con las señales de vibración, además, la toma de datos se realiza de forma no intrusiva, sin contacto, cuando la máquina se encuentra en estado de operación [7], [8]. De manera similar a las señales de vibración, las señales acústicas cambian gradualmente mientras los componentes desarrollan diferentes tipos de fallos, por lo tanto, estos cambios en las señales se pueden analizar para determinar la condición de la máquina [18].

2.1.3. Hardware de adquisición de señales acústicas

El hardware de adquisición de datos consta de una serie de componentes electrónicos que recopilan, acondicionan, convierten y transmiten señales del transductor al computador portátil. El hardware típico es el siguiente: Un acondicionador de señal opera en la señal del sensor para que sea compatible con el convertidor (A/D). El convertidor A/D convierte la señal en un formato digital. El módulo de adquisición controla los otros componentes del hardware y es responsable de ejecutar

cualquier operación programada por el operador, además sirve como un búfer temporal para almacenar datos de medición. El chasis de módulos permite que el sistema de adquisición de datos se comunique directamente con una computadora a través del cable Ethernet, también funciona como una fuente que proporciona alimentación a los componentes electrónicos internos del sistema y a los transductores [6], [10], [19], [20], [21]. En la Figura 1 se muestra un esquema general de los módulos usados habitualmente para el proceso de adquisición de señales acústicas.

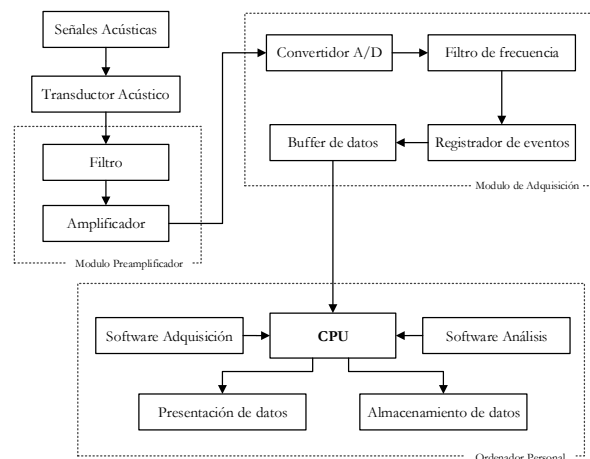


Figura 1. Esquema general de los módulos usados habitualmente en la adquisición de señales acústicas.

2.1.4. Análisis de señales acústicas

El análisis de las señales se puede hacer en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. Las características de dominio de tiempo dan una impresión general de la señal. En cambio, al realizar un análisis de dominio de frecuencia, uno puede capturar la frecuencia o frecuencias predominantes donde ocurren los eventos mecánicos.

Cada componente o proceso mecánico en una máquina, mientras está en funcionamiento, tendrá una frecuencia distinta de ocurrencia en la señal que está produciendo. En otras palabras, un análisis de dominio de frecuencia de una señal proporciona una firma mecánica del sistema. Si hay un cambio en la dinámica debido a un fallo entonces podría haber un cambio correspondiente en la amplitud de la señal en esa frecuencia característica particular [22].

2.2. Revisión bibliográfica de compresores reciprocantes

Los compresores reciprocantes utilizan un método muy eficiente y confiable para comprimir casi cualquier mezcla de gas, desde el vacío hasta más de 1000 bar (aplicación industrial); además, poseen una gran flexibilidad para comprimir una amplia gama de densidades de gas, desde hidrógeno con un peso molecular

de 2, hasta gases como el cloro, con un peso molecular de 70 [23]. Las relaciones de compresión comunes van desde 1.1 en servicios de reciclaje hasta más de 5 en gases con bajos coeficientes de calor específico. Las relaciones de compresión típicas son aproximadamente hasta de 3 por cilindro para limitar las temperaturas de descarga hasta quizás 150 a 175 °C [23].

Otro parámetro característico de los compresores es la capacidad volumétrica de desplazamiento. En donde los compresores recíprocos se encuentran dentro de un intervalo de 0 a 1000 m³/h, entrando en competencia con los de paletas, lóbulos y tornillo [24].

Los compresores de dos etapas son los más empleados en la industria, ya que cubren una extensa gama de caudales y necesidades. En ellos el aire se comprime en dos etapas; en la primera, también llamada de baja presión se comprime hasta una presión intermedia de 2 a 3 bar, y en la segunda, también denominada de alta presión se comprime hasta una presión de 8 bar [24].

Los compresores de dos etapas pueden ser refrigerados por aire o agua, es decir, pueden refrigerarse a base de un ventilador o una corriente de agua. En estos compresores el aire comprimido sale unos 130 °C con una variación de $\pm 15^{\circ}\text{C}$ [75]. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de compresor de dos etapas y sus principales partes. Además, la Figura 3 corresponde al ciclo de compresión de un compresor de dos etapas, con un cilindro de baja presión (BP) y otra de alta presión (AP). Los diagramas independientes de cada cilindro se consideran como si fueran de un compresor de una etapa.

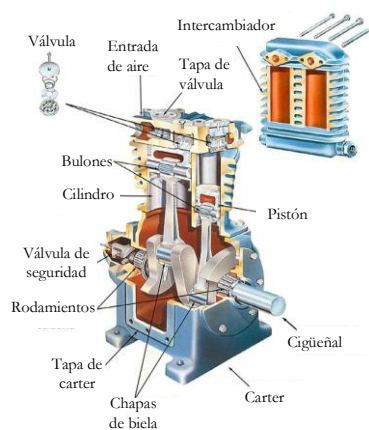


Figura 2. Compresor recíproco de dos etapas [25].

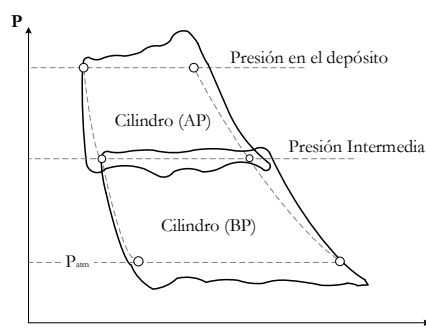


Figura 3. Diagrama de un compresor de dos etapas.

2.3. Revisión bibliográfica de fallos en compresores recíprocos

2.3.1. Análisis FMEA del compresor recíproco

Para el análisis del modo y efecto de falla (FMEA) del compresor recíproco se han identificado los elementos más críticos de cada mecanismo del compresor, los mismos que se han ponderado del 1 al 10 según los tres factores de riesgo para cada modo de fallo como se presenta en la Tabla 1. Además, el mismo método y procedimiento que se emplea en este análisis FMEA del compresor recíproco se puede observar en trabajos como: [26],[27],[28],[29].

Tabla 1. Rango de ponderación para cada factor que influye en el RPN.

Severidad	1 = poco peligroso para la máquina
	10 = muy peligroso para la máquina
Ocurrencia	1 = ocurre de forma esporádica
	10 = ocurre de forma constante
Detección	1 = fácilmente detectable
	10 = difícil de detectar

Fuente: Elaboración propia

En los resultados del FMEA de la Tabla 2, se observa que el número de prioridad de riesgo (RPN, toma del inglés “Risk Priority Number”) más alto es de 441 para las válvulas del mecanismo de trabajo. Esto se debe al hecho de que un fallo en desarrollo en algún elemento de la válvula es muy difícil de detectar con métodos tradicionales de monitoreo de condición. Del mismo modo, un fallo en la válvula no se puede verificar a menos que el compresor esté fuera de operación y desmontado. En segundo y tercer lugar en prioridad de riesgo están los anillos de pistón con un RPN de 294 y los rodamientos del cigüeñal con un RPN de 252 respectivamente. En vista de que las válvulas y los rodamientos presentaron los valores de riesgo más altos, de ahora en adelante se enfocará el análisis de fallos en estos dos elementos para simular los fallos y realizar la adquisición de señales.

Tabla 2. Rango de ponderación para cada factor que influye en el RPN.

Íte	Compon	Modo potencial	Causa potencial del	Efecto potencial	Sever	Ocurre	Dete	RPN
m	ente	del fallo	fallo	del fallo	idad	ncia	cción	
1	Válvulas	Desgaste, flexión agrietamiento o rotura.	Contaminación y alta temperatura	Baja eficiencia y vibración excesiva	9	7	7	441
2	Rodamientos	Fallos en pistas o elementos rodantes	Uso a largo plazo y/o mala lubricación	Vibración en el cigüeñal	6	6	7	252
3	Anillo de pistón	Desgaste o rotura	Mala lubricación	Contaminación bilateral y baja eficiencia	7	7	6	294
4	Pistón	Holgura con el cilindro o desgaste frontal	Uso a largo plazo y/o mala lubricación	Baja eficiencia y alta vibración	7	4	6	168
5	Biela de pistón	Agrietamiento o desgaste de cojinetes	Fatiga y/o mala lubricación	Vibración durante la operación o rotura de la biela	7	2	9	126
6	Cilindro	Desgaste	Mala lubricación	Vibración excesiva y baja eficiencia	8	3	5	120
7	Empaque	Desgaste o rotura	Uso a largo plazo y/o alta temperatura interna	Baja eficiencia por fuga de aire y aceite	8	7	2	112
8	Cigüeñal	Desgaste en rodadura o flexión	Carga excesiva y/o fatiga	Vibración durante la operación o rotura del cigüeñal	7	2	6	84

Fuente: Elaboración propia

2.3.2. Fallos en válvulas

En la Figura 4 se presenta el diagrama de Ishikawa para el análisis causa-raíz de fallos en válvulas de compresor reciprocante. Las Tablas 3, 4, 5 y 6 presentan un resumen de las características de fallo por corrosión en plato de válvula, por desgaste de asiento de válvula, por fractura del plato de válvula y fallo por rotura del resorte, respectivamente.

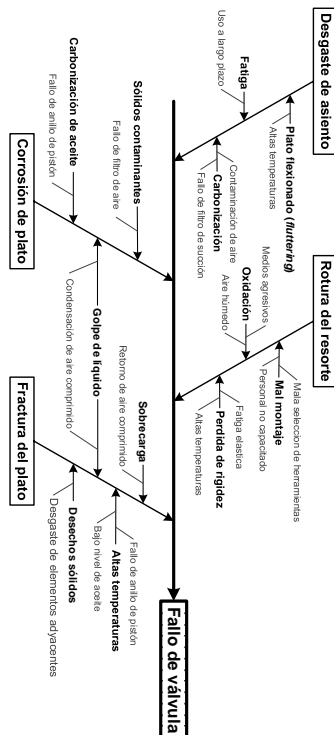


Figura 4. Diagrama de Ishikawa para el análisis causa-raíz de fallo en válvulas de compresor.

Tabla 3. Características de un fallo por corrosión en plato de válvula.

Indicador	Características
Tipo de fallo	Corrosión en plato de válvula
Causas	Presencia de líquidos y de partículas extrañas. Acciones mecánicas anormales y baja calidad de reparaciones.
Localización	Presencia de sólidos en el asiento de válvula. Deformación geométrica del plato de válvula. Se presenta como orificios en el plato o asiento de válvula
Dimensiones	Se presenta hasta con porcentajes de fuga de hasta 10%.
Evolución	Se empieza a acumular pequeñas partículas extrañas en el asiento de válvula generando fugas, luego provoca deformaciones en el plato y en casos más severos se genera orificios en el plato.
Soluciones	Realizar mantenimientos periódicos de las válvulas. Cambio de filtros de aire y empaques del cabezal de los cilindros. Escoger un material con mayor resistencia para el plato de válvula

Imagen



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Características de un fallo por desgaste de asiento de válvula.

Indicador	Características
Tipo de fallo	Desgaste por asiento de válvula
Causas	Mal montaje. Gran diferencia de durezas entre el material del asiento y el plato. Carbonización. Desgaste natural por uso prolongado.
Localización	Levantamiento anormal del asiento o plato de válvula Deformación geométrica del plato de válvula.
Dimensiones	Puede presentarse elevaciones anormales del plato de válvula de hasta el 80% de la elevación máxima posible [122].
Evolución	Empieza con impactos repetidos del plato de válvula y la rotación libre del asiento, lo cual luego crea más elevación, a su vez mayor área de flujo, para el cabezal.
Soluciones	Realizar mantenimientos periódicos de las válvulas. Cambio y ajuste correcto de asiento de válvula. Escoger nuevos materiales para el asiento y plato de válvula.

Imagen



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Características de un fallo por fractura de plato de válvula.

Indicador	Características
Tipo de fallo	Fractura del plato de válvula
Causas	Presencia de desechos sólidos. Presencia de líquidos en el proceso de compresión. Carbonización de aceite.
Localización	Presencia de grietas, fracturas parciales y totales en el plato de válvula.
Dimensiones	Se generan hasta 2 fracturas totales del plato.
Evolución	Empieza con grietas que se originan desde el interior del plato y evoluciona hasta crearse fracturas totales.
Soluciones	Realizar mantenimientos periódicos de las válvulas. Cambio de filtros de aire y anillos de pistón.

Imagen

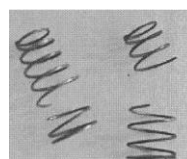


Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Características de un fallo por rotura del resorte

Indicador	Características
Tipo de fallo	Rotura del resorte
Causas	Mal montaje: mala selección de herramientas y personal no capacitado. Oxidación: por medios agresivos o aire húmedo. Desgaste natural: altas temperaturas de operación.
Localización	En las espiras medias del resorte.
Dimensiones	Se presenta como agrietamientos y fracturas parciales o totales.
Evolución	A lo largo de la vida de un resorte la compresión y expansiones repetidas ocasionan desgaste y proporciona menos resistencia para el plato de válvula. Además, en casos severos los resortes pueden corroerse y finalmente romperse por completo.
Soluciones	Cambio de resortes. Correcta montaje y limpieza de los resortes

Imagen



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Principales datos técnicos del compresor recíprocante ebg250.

Datos técnicos compresor EBG250	
Modelo	EBG250
Tipo	Recíprocante
Potencia	5 HP (3.7 KW)
Alimentación del motor	Trifásico 360 V
Velocidad del motor	3470 rpm
Tipo de transmisión	Banda en V - Polea
Relación de reducción	4,5: 1
Nº de etapas	2 etapas: baja y alta presión
Presión máxima	175 psi – 12 bar
Caudal aire	24.5 CFM
Tipo de tanque	Tanque horizontal
Capacidad tanque	250 Lts
Tiempo de llenado	5 min
Altura total compresor	1.24 m
Largo total tanque	1.79 m
Diámetro tanque	85 cm
Tipo de lubricación	Baño de aceite
Aceite	SAE 20W50 (GT-1-Kendall)
Cantidad de aceite en Carter	0,85 gal
Duración de ciclo de giro cigüeñal	0,078 segundos

Fuente: Elaboración propia.

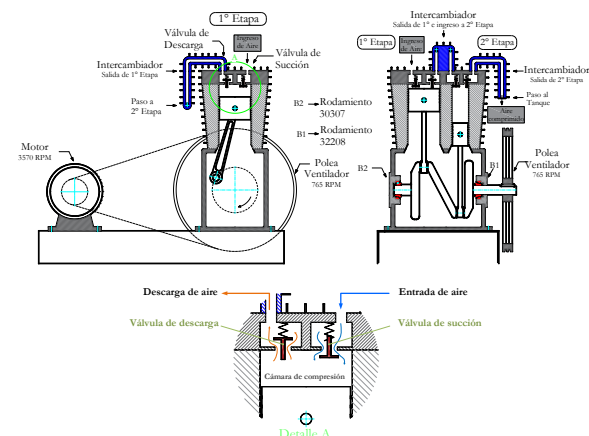


Figura 6. Esquema de la operación mecánica del compresor EBG250.

En la Figura 7 se presentan las principales partes del compresor recíprocante EBG250

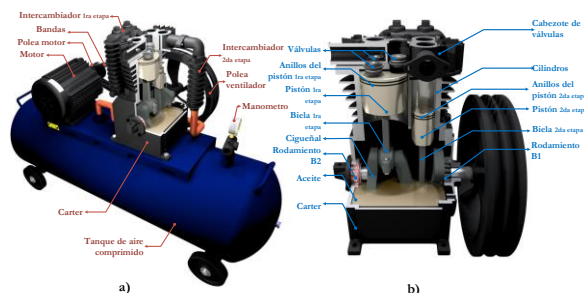


Figura 7. Partes principales del compresor recíprocante EBG 250.

2.4.2. Metodología para el monitoreo de señales acústicas y de vibración

En la Figura 8 presentamos el esquema de la conexión del micrófono capacitivo para la adquisición de señales acústicas. El micrófono y el preamplificador se encuentran compactados en un solo elemento que se conecta directamente al módulo de adquisición mediante cable con entrada y salida tipo BNC.

En la Figura 9 presentamos un esquema de la conexión del acelerómetro para la adquisición de señales de vibración. El acelerómetro no necesita de un preamplificador debido a que las señales tienen la suficiente amplitud para ser manejadas computacionalmente y se conecta directamente al módulo de adquisición mediante cable con entrada de dos pines tipo MIL-C-5015 y salida tipo BNC.

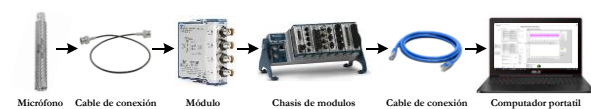


Figura 8. Esquema de la conexión real del sistema de adquisición de señales acústicas para la experimentación.

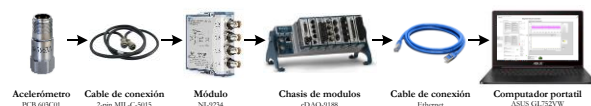


Figura 9. Esquema de la conexión real del sistema de adquisición de señales de vibración para la experimentación.

2.4.3. Establecimiento de línea base

El banco para esta experimentación consta de cuatro unidades principales: (i) unidad de mando, (ii) unidad de maquinaria recíprocante y (iii) unidad de sistema de adquisición de datos, tal como se presenta en la Figura 10.

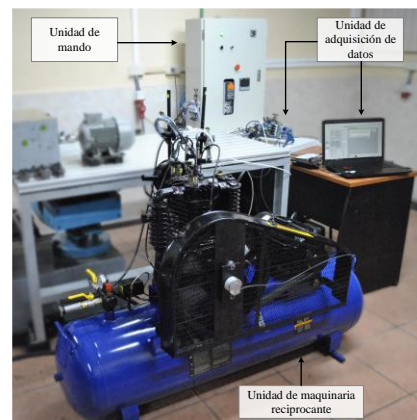


Figura 10. Banco de Vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana.

Para realizar el montaje de los elementos mecánicos y de los sensores presentes en la unidad de maquinaria recíprocante, se presenta en la Figura 11 una secuencia fija que permite que el sistema no sufra alteraciones durante su funcionamiento.

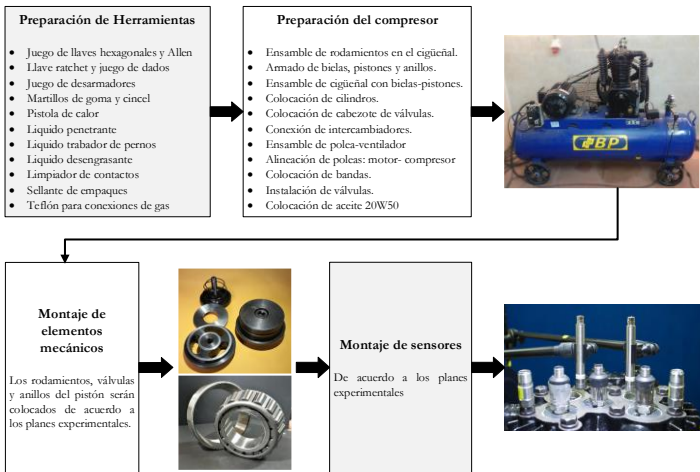


Figura 11. Proceso para el montaje de elementos mecánicos y sensores.
Fuente: Elaboración propia.

Concluido el montaje de los elementos mecánicos y los sensores, se procede con la validación de la línea base. Para lo cual se realizan los pasos presentados en la Figura 12.

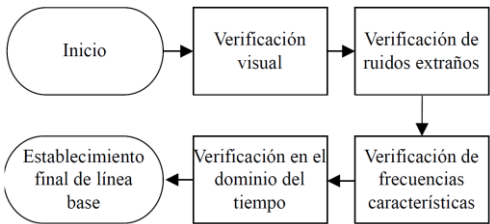


Figura 12. Proceso de validación de línea base.

En la Figura 13 se presenta la señal de vibración en el dominio de la frecuencia del compresor recíprocante EBG250.

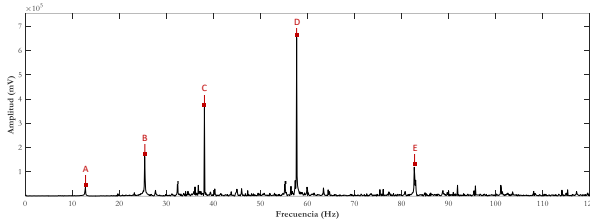


Figura 13. Señal de vibración en el dominio de la frecuencia del compresor EBG250.

Los puntos que se muestran en la Figura 13 representan eventos mecánicos característicos del compresor, de amplitud y frecuencia característica de cada elemento. En la Tabla 11 se presenta las características principales de cada punto registrado en el espectro de la Figura 14.

Tabla 11. Características de los puntos de frecuencias principales del compresor presentes en la señal de vibración.

Punto	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mV]	Denominación
A	12,8	3,52e ⁰⁴	Giro del cigüeñal
B	25,4	1,63e ⁰⁵	Ciclos de pistón
C	38,1	3,65e ⁰⁵	3X de giro de cigüeñal
D	57,7	6,53e ⁰⁵	Giro del motor
E	82,7	1,19e ⁰⁵	Giro de motor + Ciclos de pistón

Es común analizar la señal de vibración de un compresor recíprocante en el dominio del tiempo, es por lo tanto que en la Figura 14 se presenta la señal de vibración de un ciclo de giro del cigüeñal del compresor recíprocante EBG250, y en la Tabla 12 se presenta los indicadores principales de este ciclo.

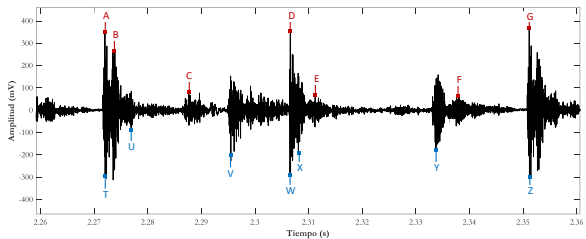


Figura 14. Señal de vibración de un ciclo de giro del cigüeñal en el dominio del tiempo del compresor EBG250.

Tabla 12. Características de la señal de vibración de un ciclo de giro de cigüeñal en el dominio del tiempo del compresor ebg250.

Segunda etapa		Primera etapa	
A	Punto muerto superior	T	Punto muerto inferior
B	Cierre de válvula de descarga	U	Cierre de válvula de admisión
C	Apertura de válvula de admisión	V	Apertura de válvula de descarga
D	Punto muerto inferior	W	Punto muerto superior
E	Cierre de válvula de admisión	X	Cierre de válvula de descarga
F	Apertura de válvula de descarga	Y	Apertura de válvulas de admisión
G	Punto muerto superior	Z	Punto muerto inferior

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4. Planes experimentales

Para la adquisición de datos se emplearon cuatro acelerómetros, dos micrófonos capacitivos, cuatro sensores de presión, tres pinzas amperimétricas y un encoder. En la Figura 15 se presenta un esquema general de la ubicación de los sensores en el compresor EBG250.

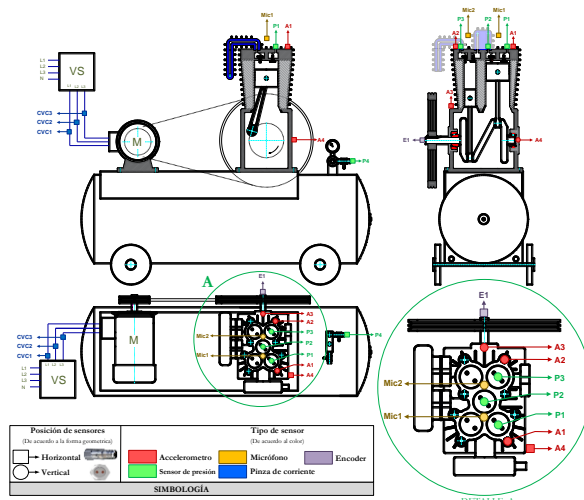


Figura 15. Esquema de la ubicación de los sensores en el compresor EBG250 para la adquisición de datos.

Adicionalmente, en la Figura 16 se presentan fotografías del emplazamiento de todos los sensores en el compresor EBG250.

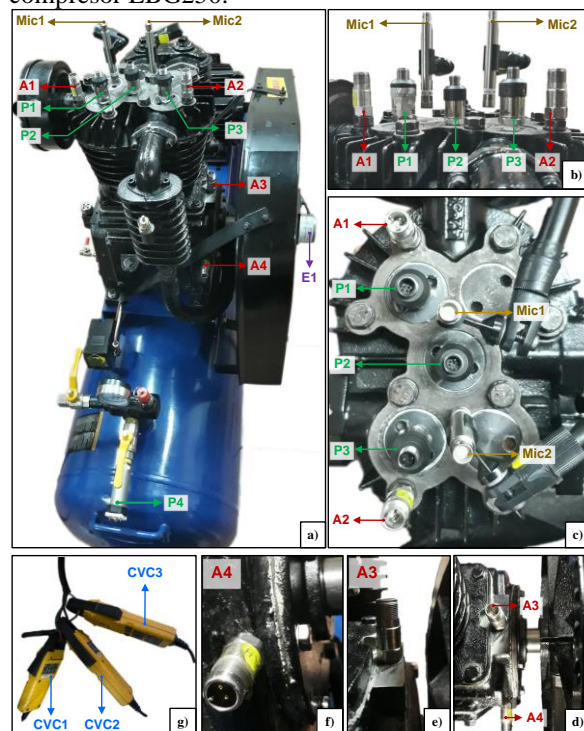


Figura 16. Fotografías del emplazamiento de los sensores en el compresor EBG250: a) vista isométrica; b) vista lateral del cabezote de válvulas; c) vista superior del cabezote de válvulas; d) vista superior del Carter-eje cigüeñal; e) emplazamiento del acelerómetro 3; f) emplazamiento del acelerómetro 4 y g) emplazamiento de las pinzas amperimétricas.

Las señales han sido adquiridas por las siguientes tarjetas de adquisición de datos: tres tarjetas NI 9234, una NI 9205 y una NI 9401; las cuales están montadas en un chasis NI cDAQ-9188 de National Instruments a través de un computador portátil ASUS ROG

GL752VW-DH74. En la Figura 17 se presenta la configuración de los sensores y módulos utilizados.

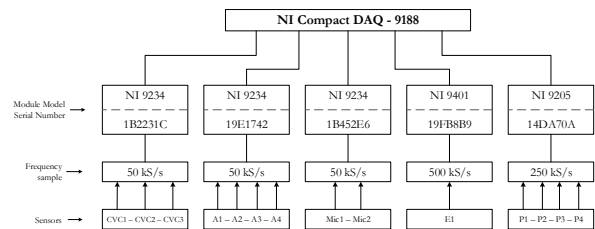


Figura 17. Configuración de los módulos y sensores utilizados.

Se generaron siete planes experimentales (EP) de detección y severidad de fallos para válvulas, rodamientos y anillos del pistón; estos definen todos los parámetros para realizar la experimentación, con el fin de que puedan ser replicados en futuras ocasiones. En la Tabla 13 se presenta un resumen de los siete EP.

Tabla 13. Descripción de los planes experimentales generados sobre fallos en el compresor recíprocante ebg250.

Nº EP	Elementos con fallos	Nivel de severidad / % severidad	Observaciones
1	Válvulas	Fallos severos / 100%	Fallos en c/u de las válvulas y combinación de fallos en distintas válvulas.
2	Rodamiento B1	Fallos severos / 100%	Fallos en el rodamiento NTN 4T-32208
3	Multi-fault Válvulas Rodamiento B1	Fallos severos / 100%	Fallos en la válvula 2S_DV Fallos en el rodamiento NTN 4T-32208
4	Válvulas	Fallos leves / 25% Fallos leves / 45% Fallos moderados/75% Fallos severos/ 100%	Fallos en c/u de las válvulas Fallos en c/u de las válvulas Fallos en c/u de las válvulas Fallos en c/u de las válvulas
5	Rodamiento B1	Fallos leves / 25% Fallos leves / 45% Fallos moderados/75% Fallos severos/ 100%	Fallos en el rodamiento NTN 4T-32208 Fallos en el rodamiento NTN 4T-32208 Fallos en el rodamiento NTN 4T-32208 Fallos en el rodamiento NTN 4T-32208
6	Anillos del pistón	Fallos leves / 45% Fallos moderados/75% Fallos severos/ 100%	Fallos en los anillos del pistón de la 2da etapa Fallos en los anillos del pistón de la 2da etapa Fallos en los anillos del pistón de la 2da etapa
7	Multi-fault Válvulas Rodamiento B1 Rodamiento B2 Anillos del pistón	Fallos severos / 100% Fallos severos / 100% Fallos severos / 100% Fallos severos / 100%	Fallos en la válvula 2S_DV Fallos en el rodamiento NTN 4T-32208 Fallos en el rodamiento NTN 4T-30307 Fallos en los anillos del pistón de la 2da etapa

Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados y un corto análisis de las señales adquiridas en el plan experimental uno y dos.

Las siguientes señales corresponden a los fallos en válvulas y rodamiento del plan experimental uno. Las señales acústicas corresponden a las adquiridas por el micrófono Mic2 y las señales de vibración corresponden a los acelerómetros A2 y A3 para válvulas y rodamiento, respectivamente.

En la Figura 18 se presentan los espectros de las señales acústicas de fallos en válvulas. La identificación de indicadores visuales de fallo es compleja debido a armónicos dispersos en la señal, es decir la información no puede ser interpretada con facilidad de forma visual por una persona. Sin embargo, se aprecian variaciones de amplitud en las componentes frecuenciales para cada fallo experimentado. Además, en esta figura se

presentan señales acústicas de los fallos en el dominio del tiempo en un rango correspondiente a un ciclo de giro completo del cigüeñal. Las señales muestran un patrón acústico constante, el cual corresponde a las ondas acústicas generadas por el movimiento de las válvulas. De los cuatro fallos experimentados, el único que presenta una variación considerable en su señal es el fallo por rotura del resorte debido a que la amplitud acústica y las fluctuaciones en la señal decrece en comparación con la condición normal y el resto de los fallos experimentados.

En la Figura 19 ocurre un comportamiento similar en los espectros de vibración de fallos en válvulas, aunque no existe la aparición de nuevas componentes de frecuencia, al menos en el rango de 0 a 130 Hz. En esta misma figura se presentan las señales de vibración temporales correspondientes a un ciclo de giro completo del cigüeñal. Se observa variaciones de entre las

señales con fallos y la condición normal. Además, es posible identificar de forma visual que existe un fallo en válvulas. El fallo más representativo es del tipo desgaste de asiento debido a que los picos característicos del movimiento de válvulas se encuentran amplificados y desfasados en comparación con la condición normal.

En la Figura 20 y Figura 21 se presentan los espectros de señales acústicas y de vibración en un rango de 0 a 130 Hz correspondiente a los fallos en el rodamiento B1, estos fallos corresponden al plan experimental dos. En los espectros de señales acústicas de la Figura 20, la presencia de armónicos imposibilita la interpretación visual por una persona. Por otra parte, en los espectros de vibración de la Figura 21 es observable cambios entre una condición y otra. Dichos cambios indican la presencia de un fallo, sin embargo, no se puede identificar y afirmar el tipo de fallo con certeza.

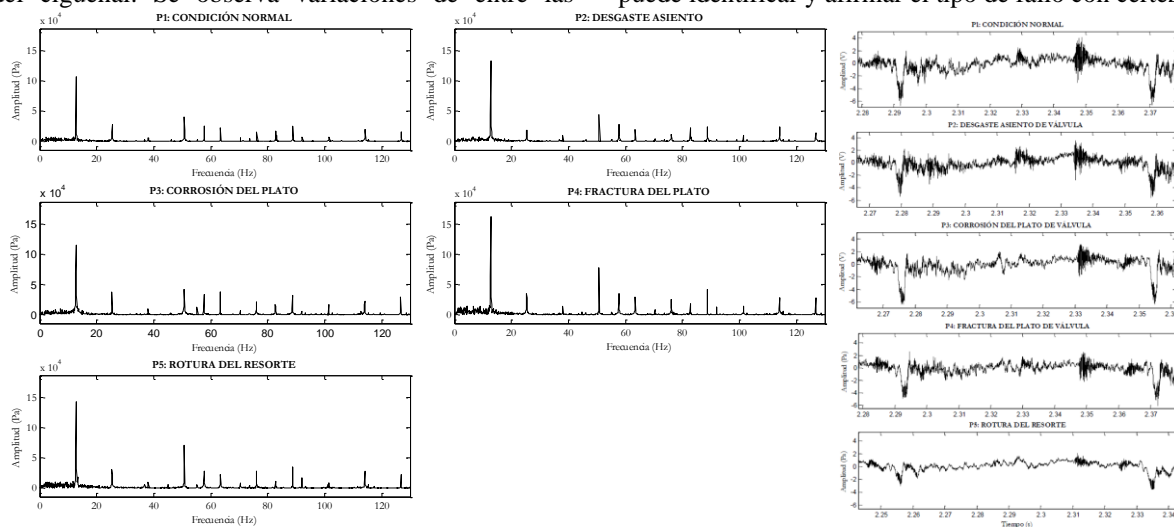


Figura 18. Espectros acústicos en un rango de 0 a 130 Hz y sus señales en el dominio del tiempo correspondientes a fallos en válvulas.

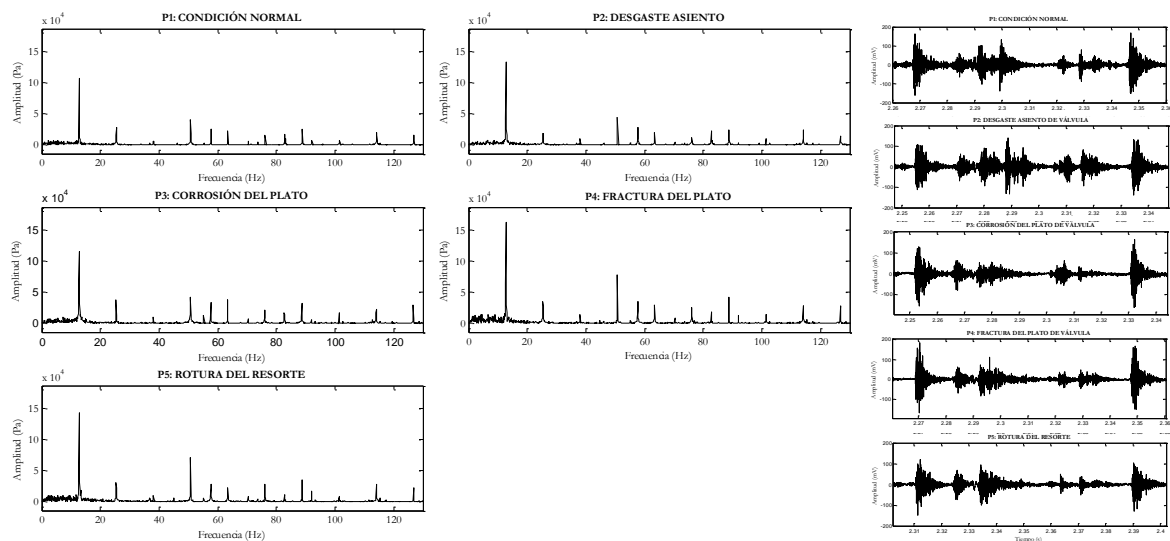


Figura 19. Espectros de vibración en un rango de 0 a 130 Hz y sus señales en el dominio del tiempo correspondientes a fallos en válvulas.

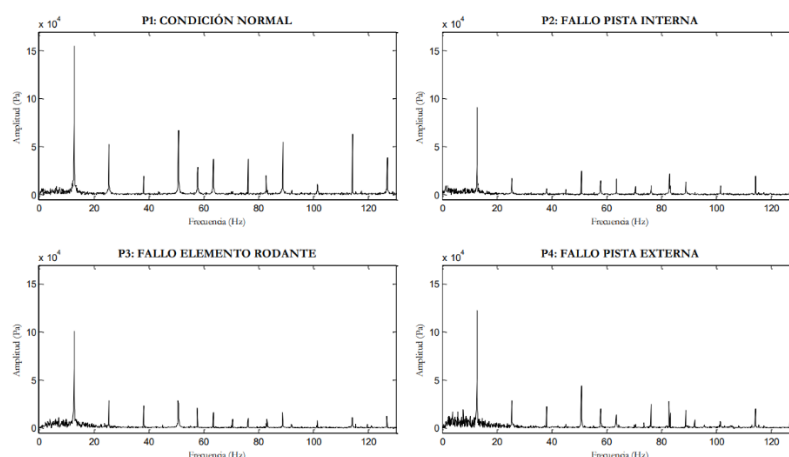


Figura 20. Espectros de vibración en un rango de 0 a 130 Hz de fallos en rodamientos.

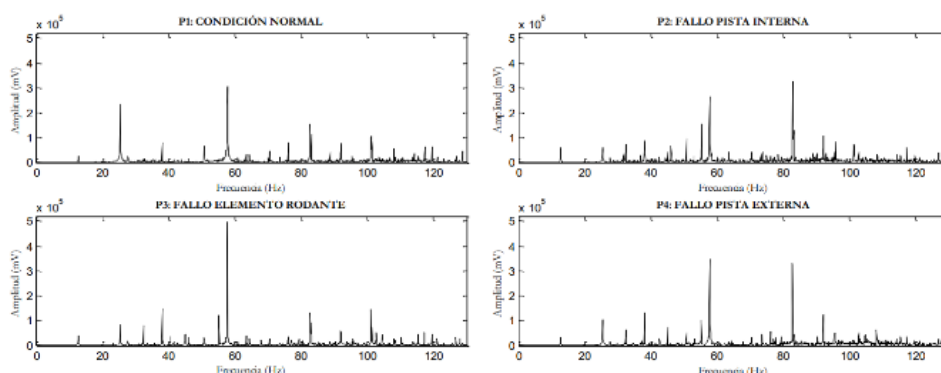


Figura 21. Espectros de vibración en un rango de 0 a 130 Hz de fallos en rodamientos.

La dificultad de observar indicadores podría ser cubierta con el uso de indicadores de condición y/o técnicas de inteligencia artificial para el diagnóstico adecuado en los espectros de señales acústicas y señales de vibración.

4. Conclusiones

El estudio bibliográfico profundiza en el monitoreo de condición (MC) mediante señales acústicas aplicadas a maquinaria recíprocante. Se destaca la importancia y efectividad de esta técnica para detectar fallos incipientes en comparación con las señales de vibración tradicionales, debido a su mayor sensibilidad y naturaleza no intrusiva.

Se identificaron y seleccionaron los fallos más críticos y frecuentes para su estudio experimental enfocadas al diagnóstico de fallos. Para válvulas, los fallos analizados fueron corrosión del plato, desgaste del asiento, fractura del plato y rotura del resorte. En rodamientos, se estudiaron fallos en pista interna, pista externa y elemento rodante.

Se desarrolló un proceso metodológico para la adquisición de datos en compresores recíprocante que abarcó el montaje de elementos mecánicos y sensores, un proceso de validación de línea base y la propuesta de siete planes experimentales para compresores

recíprocantes. Finalmente, se analizaron dos planes experimentales con fallos severos, el primero con fallos en válvulas y el segundo con fallos en el componente rodamiento.

Las señales de acústicas evidencian cambios en la amplitud de frecuencias características, de manera similar que las señales de vibración que han sido ampliamente estudiadas y empleadas para tareas de diagnóstico de fallos. Sin embargo, dichas señales presentan el desafío de identificar visualmente variaciones para los seres humanos.

Se recomienda para futuros trabajos la implementación de técnicas de aprendizaje automático y redes neuronales para el análisis automático de las señales acústicas y de vibración. Esto permitiría desarrollar sistemas de diagnóstico en tiempo real capaces de detectar y clasificar fallos con alta precisión, mejorando así la eficiencia y confiabilidad de los programas de mantenimiento predictivo en compresores recíprocantes.

5. Reconocimientos

Este artículo se deriva del trabajo de titulación realizado por Cajas Muñoz, F. D., y Torres Díaz, C. P., "Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa," Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2018." [30].

6. Referencias

- [1] A. K. S. Jardine, D. Lin, y D. Banjevic, «A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance», *Mech Syst Signal Process*, vol. 20, n.º 7, pp. 1483-1510, oct. 2006.
- [2] S. Alaswad y Y. Xiang, «A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system», *Reliab Eng Syst Saf*, vol. Complete, n.º 157, pp. 54-63, 2017.
- [3] D. Galar, A. Thaduri, M. Catelani, y L. Ciani, «Context awareness for maintenance decision making: A diagnosis and prognosis approach», *Measurement*, vol. 67, pp. 137-150, may 2015.
- [4] C. J. Guerra, «Condition monitoring of reciprocating compressor valves using analytical and data-driven methodologies», Tesis de máster, Rochester Institute of Technology, Rochester, New York, 2013.
- [5] A. Rivera, G. Garcia, y B. Mello, «Perfil asimétrico de herramienta circular de forma para la fabricación del rotor de un compresor de tornillo», presentado en 12º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [6] R. Guiracocha, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termografías infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2015.
- [7] N. K. Verma, R. K. Sevakula, S. Dixit, y A. Salour, «Intelligent Condition Based Monitoring Using Acoustic Signals for Air Compressors», *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 65, n.º 1, pp. 291-309, mar. 2016.
- [8] Y. Wang, C. Xue, X. Jia, y X. Peng, «Fault diagnosis of reciprocating compressor valve with the method integrating acoustic emission signal and simulated valve motion», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 56-57, n.º Supplement C, pp. 197-212, may 2015.
- [9] V. T. Tran, F. AlThobiani, y A. Ball, «An approach to fault diagnosis of reciprocating compressor valves using Teager-Kaiser energy operator and deep belief networks», *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, n.º 9, pp. 4113-4122, jul. 2014.
- [10] C. G. Ortiz y I. A. Pérez, «Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2016.
- [11] M. Amarnath y I. R. Praveen Krishna, «Empirical mode decomposition of acoustic signals for diagnosis of faults in gears and rolling element bearings», *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 6, n.º 4, p. 279, 2012.
- [12] S. Devendiran y K. Manivannan, «Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components-A Review», *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, n.º 6, pp. 3966-3975, 2016.
- [13] P. Potočník y E. Govekar, «Semi-supervised vibration-based classification and condition monitoring of compressors», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 93, n.º Supplement C, pp. 51-65, sep. 2017.
- [14] M. Ahmed, A. Smith, F. Gu, y A. D. Ball, «Fault diagnosis of reciprocating compressors using relevance vector machines with a genetic algorithm based on vibration data», presentado en 20th International Conference on Automation and Computing, 2014, pp. 164-169.
- [15] V. N. Kostyukov y A. P. Naumenko, «Standardization in the Sphere of Vibrodiagnostic Monitoring of Piston Compressors», *Procedia Eng.*, vol. 113, n.º Supplement C, pp. 370-380, ene. 2015.
- [16] H. Cao, Y. Yue, X. Chen, y X. Zhang, «Chatter detection in milling process based on synchrosqueezing transform of sound signals», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, n.º 9-12, pp. 2747-2755, abr. 2017.
- [17] S. K. Abraham, V. Sugumaran, y M. Amarnath, «Acoustic Signal Based Condition Monitoring of Gearbox using Wavelets and Decision Tree Classifier», *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, n.º 33, 2016.
- [18] H. Liu, L. Li, y J. Ma, «Rolling Bearing Fault Diagnosis Based on STFT-Deep Learning and Sound Signals», *Shock Vib.*, pp. 1-12, sep. 2016.
- [19] H. Erol y A. Gurdogan, «The Noise and Vibration Characteristics of a Reciprocating Compressor: Effects of Size and Profile of Discharge Port», presentado en International Compressor Engineering Conference, United States, 2000.
- [20] B.-S. Yang, W.-W. Hwang, D.-J. Kim, y A. Chit Tan, «Condition classification of small reciprocating compressor for refrigerators using artificial neural networks and support vector machines», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 19, n.º 2, pp. 371-390, mar. 2005.
- [21] H. Czichos, Ed., *Handbook of Technical Diagnostics: Fundamentals and Application to Structures and Systems*, 1.ª ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [22] A. R. Mohanty, *Machinery Condition Monitoring: Principles and Practices*. CRC Press, 2014.
- [23] H. P. Bloch, *A Practical guide to Compressor Technology*, 2.ª ed. John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [24] P. Fernández, *Compresores*, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria, Santander, España.
- [25] Surplus Plus, «Surplus Plus catalog 291: Air Compressors & Tanks». 2018.
- [26] A. Jomde *et al.*, «Failure modes effects and criticality analysis of the linear compressor», *Mater. Today Proc.*, vol. 4, n.º 9, pp. 10184-10188, 2017.
- [27] R. Shankar y A. Suhane, «Failure Mode and Effect Criticality Analysis of locomotive Reciprocating Air Compressor», *Int. J. Sci. Res. Dev.*, vol. 4, n.º 4, pp. 1518-1522, jul. 2016.
- [28] N. Marquesin De Oliveira, «Risk Based Maintenance for Compressor Systems», Tesis de máster, NTNU, Norway, 2015.
- [29] T. Sahoo, P. K. Sarkar, y A. K. Sarkar, «Maintenance optimization for critical equipments in process industries based on FMECA Method», *Int J Eng Innov Technol*, vol. 3, n.º 10, pp. 107-112, 2014.
- [30] Cajas Muñoz, F. D., y Torres Díaz, C. P., *Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa*, Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2018.