

**METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN
DEL SENSOR DE EMISIÓN ACÚSTICA
EN UNA CAJA DE ENGRANAJES**

**METHODOLOGY FOR THE LOCATION
OF THE ACOUSTIC EMISSION
SENSOR IN A GEARBOX**

**METODOLOGIA PARA A
LOCALIZAÇÃO DO SENSOR DE
EMISSÃO ACÚSTICA EM UMA CAIXA
DE ENGRENAGENS**

Edison Pacheco Córdova

Grupo de Investigación y Desarrollo en
Tecnologías Industriales (GIDTEC), Universidad
Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador
epachecoc@est.ups.edu.ec

René-Vinicio Sánchez Loja

Grupo de Investigación y Desarrollo en
Tecnologías Industriales (GIDTEC), Universidad
Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador
rsanchezl@ups.edu.ec

Diego Cabrera

Grupo de Investigación y Desarrollo en
Tecnologías Industriales (GIDTEC), Universidad
Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador
dcabrera@ups.edu.ec

Mariela Cerrada

Grupo de Investigación y Desarrollo en
Tecnologías Industriales (GIDTEC), Universidad
Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador
mcerrada@ups.edu.ec

Rafael E. Vásquez

Department of Mechanical Engineering,
Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín,
Colombia
rafael.vasquez@upb.edu.co

Fechas de recepción: 02 de agosto 2018
Fecha aprobación: 27 de septiembre 2018

Resumen

Este documento tiene como objetivo identificar la mejor posición de un sensor de emisión acústica en una caja de engranajes para la detección de fallos. El sensor de emisión acústica fue localizado en las cuatro paredes laterales de la caja de engranajes, donde se adquirió tres señales en cada posición para ser analizadas en el dominio del tiempo mediante indicadores de condición y finalmente las mejores señales fueron analizadas en el dominio de la frecuencia por medio de la frecuencia de paso de engranajes. Como resultado se obtuvo que el sensor debe ser posicionado en las partes laterales de menor longitud de la caja de engranajes.

Palabras clave: Emisión acústica, monitoreo de la condición, caja de engranajes, indicadores de frecuencia, frecuencia de engranaje.

Summary

The purpose of this document is to identify the best position of an acoustic emission sensor in a gearbox for fault detection. The acoustic emission sensor was located in the four side walls of the gearbox, where three signals were acquired in each position to be analyzed in the time domain by condition indicators and finally the best signals were analyzed in the frequency domain by means of the gear step frequency. As a result, it was obtained that the sensor must be positioned in the shorter length lateral parts of the gearbox.

Key Words: Acoustic Emission, Condition Monitoring, Gearbox, Frequency Indicators, Gear Frequency

Resumo

O objetivo deste documento é identificar a melhor posição de um sensor de emissão acústica em uma caixa de engrenagens para a detecção de falhas. O sensor de emissão acústica foi localizado nas quatro paredes laterais da caixa de transmissão, onde três sinais foram adquiridos em cada posição para serem analisados no domínio do tempo por indicadores de condição e, finalmente, os melhores sinais foram analisados no domínio da frequência por meio da frequência de passo da engrenagem. Como resultado, foi obtido que o sensor deve ser posicionado nas partes laterais do menor comprimento da caixa de engrenagens.

Palavras-chave: Emissão acústica, monitorização de condições, caixa de engrenagens, indicadores de frequência, frequência de engrenagem.



I. INTRODUCCIÓN

Las Emisiones Acústicas (EA) se pueden definir como ondas elásticas transitorias generadas por la liberación rápida de energía causada por la deformación o un fallo en la superficie de un material (Pao, Gajewski, & Ceranoglu, 1979). Dentro del monitoreo de la condición (MC) en maquinaria rotativa, las EA se definen como ondas transitorias generadas por la interacción de dos elementos en movimiento relativo, estas pueden ser causadas por impacto, fatiga cíclica, fricción, turbulencia, pérdida de material, cavitación, fugas, entre otras (Mba & Rao, 2006).

Fuentes de emisión acústica

La actividad se produce cuando el material experimenta nuevos cambios relacionados con la deformación y o propagación de una fractura debido a que las tensiones locales son superiores a los niveles de tensión originales. La amplitud puede variar enormemente dependiendo tanto del mecanismo de deformación que se esté produciendo y de las propiedades del material. En la Tabla 1 se enumeran los factores que determinan la amplitud de un evento de EA (Naumann, 2016).

Tabla 1. Factores que aumentan la amplitud EA.

Factores que incrementan la amplitud EA	Factores que decrecen la amplitud EA
Alta resistencia	Baja resistencia
Baja temperatura	Alta temperatura
Propagación de grietas	Deformación plástica
Materiales fundidos	Materiales forjados
Perfiles gruesos	Perfiles finos
Tamaño de grano grande	Tamaño de grano pequeño

Fuente: (Naumann, 2016)

Principio físico de sensor EA

El sensor EA más común se realiza añadiendo un elemento piezoeléctrico dentro de una carcasa protectora tal como se muestra en la Fig. 1, el cual fue creado por Beattie en 1983. Estos sensores se basan exclusivamente en el efecto piezoeléctrico (Zurita Millán, 2013).

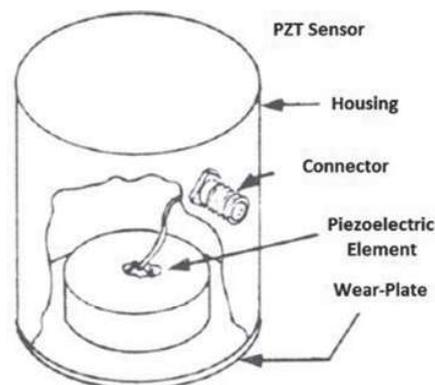


Figura 1. Sensor de EA hecho de material piezoeléctrico.

Fuente: (Zurita Millán, 2013)

El material piezoeléctrico es sensible a la energía de la onda y genera una tensión proporcional a través de conector. La principal diferencia entre los sensores de vibración y los de EA es el rango de frecuencia de trabajo, por ejemplo, la frecuencia de trabajo de los sensores de vibración está entre 1 Hz y 20 kHz, sin embargo, los sensores de EA funcionan entre 100 Hz y 1 MHz. Por lo tanto, los sensores de EA pueden medir altas frecuencias (Zurita Millán, 2013). A tensión generada por los sensores EA es de muy baja amplitud (uV o pocos mV). Por esta razón, es necesaria una etapa de amplificación de la señal, las ganancias más comunes que se utilizan para amplificar las señales de EA son 20 dB, 40 dB y 60 dB dependiendo de la amplitud de la fuente (Ferrando Chacon, 2015).

Atenuación

La atenuación ocurre en el tiempo y espacio. El primero, se relaciona con el movimiento en serie de tiempo de un material y generalmente se denomina amortiguación viscosa. Mientras que el espacio produce una amortiguación de la amplitud con la distancia y se denomina atenuación de distancia. A medida que la onda EA se propaga desde su fuente, su amplitud disminuye debido a la atenuación, tal como se ilustra en la Fig. 2. Por lo tanto, es necesario determinar las posiciones y el número de sensores de EA adecuados, dependiendo de las distancias entre los sensores (Non-Destructive, 2016).

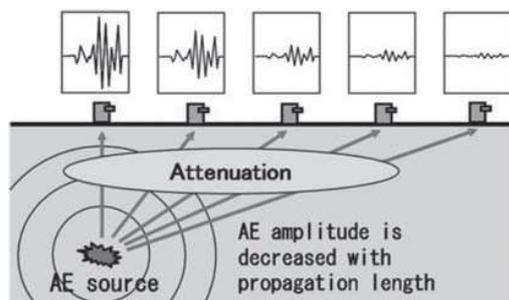


Figura 2. Ilustración esquemática de la atenuación.
Fuente: (Non-Destructive, 2016)

En aplicaciones de EA, la atenuación es una propiedad muy importante porque determina la intensidad de la señal en función de la distancia, por lo tanto, juega un papel muy importante en la especificación de las ubicaciones de los sensores de EA (Elforjani, Mba, Muhammad, y Sire, 2012) (Elforjani y Mba, 2008).

La atenuación se puede medir simulando una fuente de EA, esto se realiza utilizando la fuente Hsu-Nielsen o conocida comúnmente como la rotura de lápiz; esta técnica consiste en romper una punta de un lápiz de un tamaño determinado contra el material a un ángulo establecido. Las ondas de tensión producidas por la deformación del plomo son bastantes reproducibles y tienen un contenido de amplitud y frecuencia similar al de una fuente típica de grietas. Se puede crear un gráfico de atenuación realizando esta técnica a varias distancias de un sensor y trazando la amplitud del pico contra la distancia. Tal ejercicio puede ayudar al usuario a decidir dónde colocar los sensores EA para garantizar que se capturen todos los eventos relevantes (Sidorova, 2010).

Para el presente trabajo se decidió no utilizar la fuente Hsu-Nielsen debido a que la misma es una técnica válida para condiciones estáticas, mientras que, para la ubicación del sensor en maquinaria rotativa en la literatura no se presentan metodologías para la ubicación de los sensores de EA en una caja de engranajes, por lo que se propone una metodología que consiste en colocar el sensor de EA en diferentes puntos de la caja de engranajes y mediante indicadores de condición en el dominio del tiempo, seleccionar los puntos donde hay una menor atenuación de la señal de EA y finalmente para decidir la posición del

sensor se analizó la frecuencia de engranaje en el dominio de la frecuencia.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera, en la Sección II, se presentan los materiales y métodos empleados. Sección III, los resultados principales y en la Sección IV el análisis de resultados de las posiciones del sensor de emisión acústica y finalmente en la Sección V las conclusiones del trabajo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Banco de pruebas

El banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana que se presenta en la Fig. 3, consta de los implementos necesarios para realizar diferentes configuraciones de maquinaria rotativa como: desbalanceo, desalineación y combinaciones de fallos en engranes y rodamientos. El banco se conforma por cinco unidades principales: (i) unidad de mando, (ii) unidad motriz, (iii) unidad de sistemas rotativos, (iv) unidad de carga y (v) unidad de sistemas de adquisición de datos.

El movimiento se genera por un motor marca Siemens modelo 1LA7 096-6YA60 de 2 hp; el movimiento que se transmite hacia el eje de entrada de la caja de engranajes es mediante un acople flexible. En el eje de salida de la caja de engranajes se ubica una polea que transmite el movimiento al freno magnético Rosati de 883 kW mediante una banda flexible, lo cual permite simular la aplicación de cargas. La carga del freno es controlada por una fuente de voltaje de corriente continua TDK-Lambda, GEN 100-15-is510. La velocidad de giro del motor es controlada por medio de un variador de frecuencia Danfoss VLT 1.5 kW.

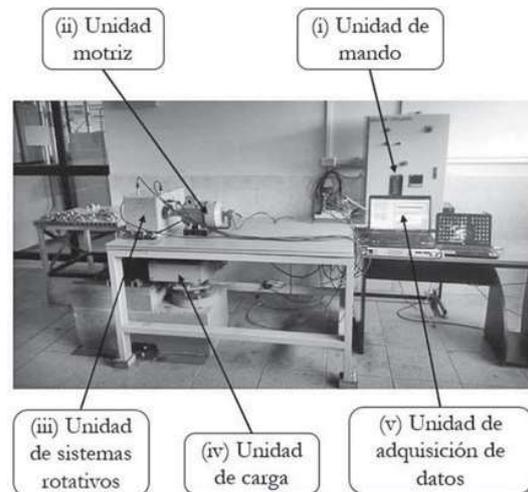


Figura 3. Banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.

Fuente: Autores

Para el sistema de adquisición de datos de las señales EA son censadas por dos sensores de EA (EA1, EA2) modelo *Physical Acoustics* WD, cada señal de EA ingresa a un preamplificador MISTRAS 0/2/4C, cada señal EA es adquirida a 1 MS/s por la tarjeta NI 9223. Las señales de vibración son censadas por dos acelerómetros (A1, A2), modelo IPC 63C01, cada señal de los acelerómetros es adquirida a 50 kS/s por una tarjeta NI 9234. Las dos tarjetas NI 9234 y NI 9223 se acoplan a un chasis NI cDAQ-9188 que envía datos vía Ethernet a un computador portátil ASUS ROG GL752VW-DH74 en el cual se dispone de LabVIEW™ para la adquisición de las señales y Matlab™ para el procesamiento de las señales.

La caja de engranajes se puede configurar para desarrollar pruebas en una o dos etapas, se pueden montar engranes de dientes rectos o helicoidales. Para el presente trabajo se seleccionó la configuración de la caja de engranajes de una etapa siendo Z1 el piñón y

Z2 el engrane tal como se muestra en la Fig. 4. Los engranes fueron manufacturados de acero E410, el número de dientes para el piñón y el engrane es de $Z1=32$ y $Z2=48$ respectivamente. El espesor de los dientes es de 20 mm, módulo de 2.25 y un ángulo de presión $\theta=20^\circ$. El aceite utilizado para la lubricación de la caja de engranajes fue Gulf HARMONY A W ISO VG 68. La localización del fallo fue en el engrane Z1. La duración de la adquisición de cada muestra fue de 10 segundos. La frecuencia de rotación del motor fue de 6Hz (F1) y 12Hz (F2) y finalmente las cargas aplicadas fueron de 0V (L1) y 10V (L2).

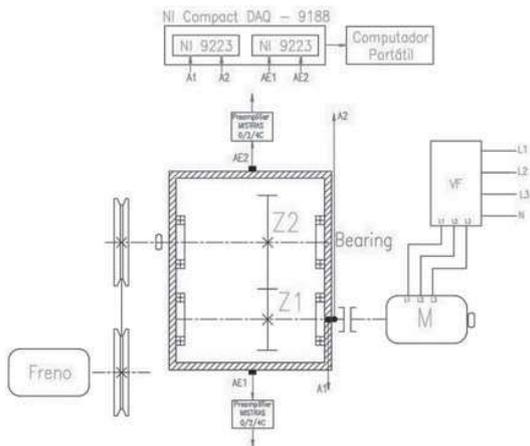


Figura 4. Sistema de adquisición de señales.
Fuente: Autores

Determinación de las coordenadas para ubicar el sensor de EA

Los sensores de EA fueron localizados en diferentes puntos de las paredes de la caja de engranajes, en la Fig. 5 se presenta las distintas ubicaciones del sensor, y en la Tabla 2 se presenta las coordenadas del sensor en la caja de engranajes.

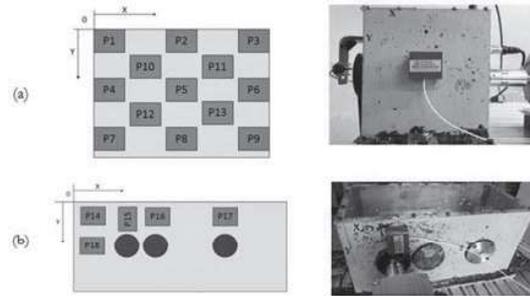


Figura 5. Ubicación del sensor de EA (a) parte lateral izquierda de la caja de engranajes, (b) parte frontal de la caja de engranajes.

Fuente: Autores

Tabla 2. Coordenadas para la ubicación del sensor EA.

Posición sensor EA	X (mm)	Y (mm)
P1	0	0
P2	86	0
P3	170	0
P4	0	-75
P5	86	-75
P6	170	-75
P7	0	-150
P8	86	-150
P9	170	-150
P10	45	-45
P11	128	-45
P12	45	-123
P13	128	-123
P14	15	-10
P15	95	-10
P16	170	-10
P17	310	-10
P18	0	-95

Fuente: Autores

Adquisición de señales de EA

Se adquirió un total de 216 señales o muestras, las cuales serán analizadas en el dominio del tiempo donde se extraerán los atributos de la señal de EA tales como: raíz media cuadrática (rms), desviación estándar, varianza, amplitud y curtosis; estos atributos ayudarán a determinar las principales ubicaciones de los sensores en la caja de engranajes.

En la Tabla 3 se presenta las mejores ubicaciones del sensor EA1 y en la Tabla 4 se presenta

las mejores ubicaciones para el sensor EA2 luego de haber posicionado los sensores en las paredes laterales y frontal de la caja de engranajes tal como se describió en el apartado B de esta misma sección. Estas tablas fueron obtenidas luego de haber realizado el análisis de las señales por medio de los indicadores de condición en el dominio del tiempo, y así obtener las mejores respuestas del sensor de EA en la caja de engranajes bajo las diferentes condiciones de trabajo tales como velocidad y carga.

Tabla 3. Mejor respuesta de señal del sensor EA1.

Condición	RMS	DesEst	Var	Amp	Curt.
Parte lateral izquierda					
CN	P3	P5	P4	P5	P11
VV	P3	P5	P5	P2	P11
CV	P3	P5	P4	P4	P11
VC	P3	P5	P4	P5	P11
Parte frontal					
CN	P15	P15	P15	P15	P16
VV	P15	P15	P15	P17	P17
CV	P15	P15	P15	P17	P18
VC	P15	P15	P15	P17	P18

Tabla 4. Mejor respuesta de señal del sensor EA2.

Condición	RMS	DesEst	Var	Amp	Curt.
Parte lateral izquierda					
CN	P3	P5	P5	P4	P1
VV	P3	P5	P5	P3	P5
CV	P3	P5	P4	P5	P5
VC	P3	P5	P4	P5	P5
Parte frontal					
CN	P15	P15	P15	P15	P16
VV	P15	P15	P15	P15	P18
CV	P15	P15	P15	P15	P15
VC	P15	P15	P15	P15	P16

Donde:

- CN Condiciones Normales
- VV Velocidad Variable
- CV Carga Variable
- VC Velocidad y Carga

De los resultados obtenidos en la Tabla 3 y Tabla 4 se procede a convertir las señales al dominio de la frecuencia, para obtener la mejor respuesta del sensor de EA; esto se determinara mediante la frecuencia de engranaje (*Gear Mesh Frequency, GMF*) la cual se puede calcular con la Ecuación (1).

$$GMF = F_g * Z_1 [Hz] \quad (1)$$

Donde:

- Fg: Frecuencia de giro del motor [Hz]
- Z1: Número de dientes del piñón

III. RESULTADOS

La GMF calculada para las diferentes velocidades de giro del motor se la identificara en la señal de EA en el dominio de la frecuencia, la amplitud de esta frecuencia incrementara donde el sensor presente una mejor respuesta a las señales EA dentro de la caja de engranajes. En la Fig. 6 y la Fig. 7 se presenta la señal del sensor EA1 y sensor EA2 respectivamente en la ubicación P5 para condiciones normales, en esta localización es donde se presentó la GMF con mayor amplitud.

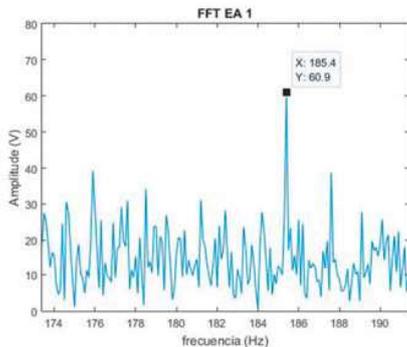


Figura 6. Señal del sensor EA1 en la ubicación P5 para condiciones normales.

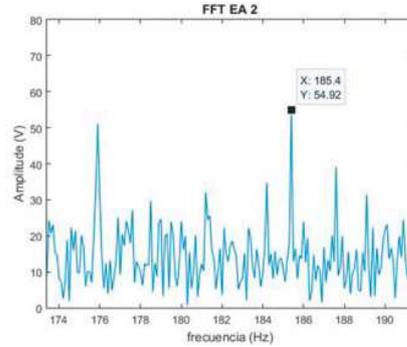


Figura 7. Señal del sensor EA2 en la posición P5 para condiciones normales

Con velocidad variable para el sensor EA1 se alcanzo una mejor respuesta en la ubicación P5, la cual se presenta en la Fig. 8; mientras que para el sensor EA2 la mejor respuesta se obtuvo en la ubicación P11 tal como se muestra en la Fig. 9.

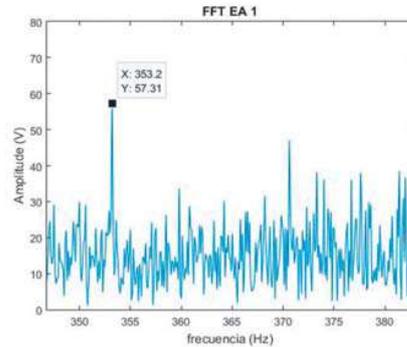


Figura 8. Señal del sensor EA1 en la ubicación P5 para velocidad variable.

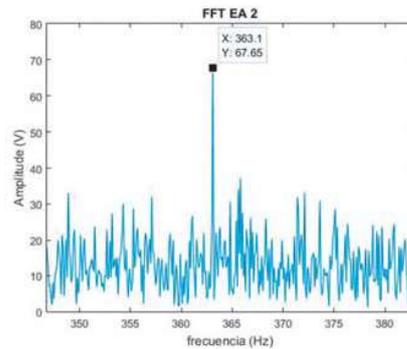


Figura 9. Señal del sensor EA2 en la ubicación P11 para velocidad variable.

Al aplicar carga variable se obtuvo una mejor respuesta en la ubicación P5 tanto para el sensor EA1 y el sensor EA2, las señales se presentan la Fig. 10 y Fig. 11 respectivamente para sensor de emisión acústica.

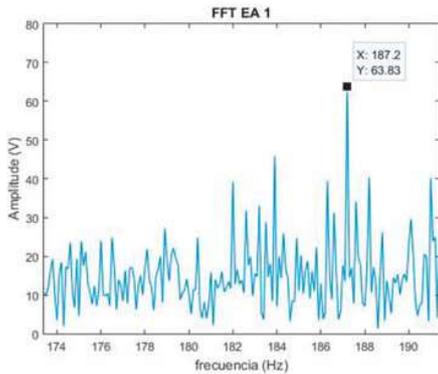


Figura 10. Señal del sensor EA1 en la posición P5 para carga variable.

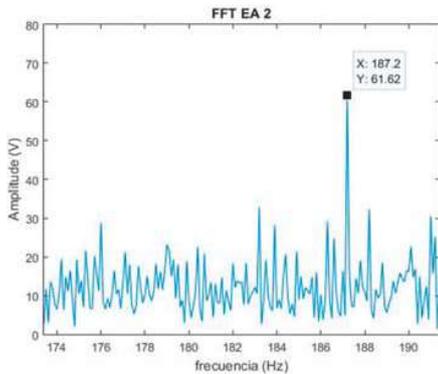


Figura 11. Señal del sensor EA2 en la posición P5 para carga variable.

Con velocidad y carga variable para el sensor EA1 se logró una mejor respuesta en la ubicación P3, la cual se presenta en la Fig. 12; de igual manera para el sensor EA2 la mejor respuesta se obtuvo en la ubicación P3 tal como se muestra en la Fig. 13.

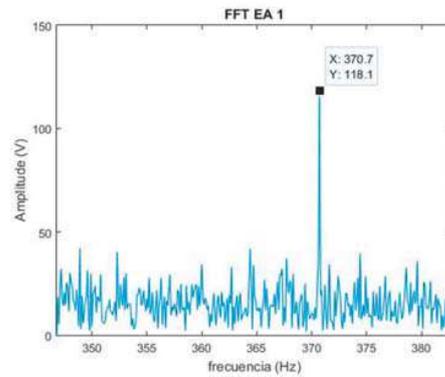


Figura 12. Señal del sensor EA1 en la ubicación P3 para velocidad y carga variable

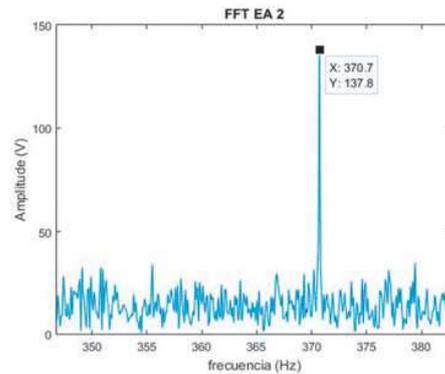


Figura 13. Señal del sensor EA2 en la ubicación P3 para velocidad y carga variable

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las señales de EA fueron analizadas primero en el dominio del tiempo por medio de indicadores de condición, esto con el fin de determinar las ubicaciones donde el sensor EA capta mejor las ondas elásticas en toda la caja de engranajes. Definidas estas ubicaciones se procedió a analizar las señales en el dominio de la frecuencia, el rango utilizado para el análisis fue donde se ubica la GMF.

La ubicación de los dos sensores de EA se determinó mediante el análisis de la amplitud de la GMF, para condiciones de operación de

la caja de engranajes alcanzando una respuesta sobresaliente en la posición P5 para ambos sensores, para la velocidad variable la mejor respuesta del sensor EA1 fue en la posición P5 y para el sensor EA2 fue en la posición P11, con la aplicación de carga hacia la caja de engranaje se obtuvo un mejor resultado en la posición P5 para ambos sensores y finalmente para carga y velocidad variable la mejor respuesta se dio en la ubicación P3 para ambos sensores.

En la ubicación P5 es donde se presenta mayor sensibilidad de los sensores EA1 y EA2, por lo tanto los resultados indican que la ubicación final de los sensores de emisión acústica será en los lados laterales de la caja de engranajes específicamente en la posición P5 tal como se muestra en la Fig. 14.



Figura 14. Ubicación del sensor EA en la caja de engranajes: (a) lado lateral izquierdo sensor EA1, (b) lado lateral derecho sensor EA2

V. CONCLUSIONES

Se propuso y se desarrolló una metodología para lo ubicación del sensor de emisión acústica en una caja de engranajes rectos de una etapa.

Los sensores de emisión acústica se fueron desplazando por toda la caja de engranajes, de esta manera se logró evaluar 18 ubicaciones para cada sensor.

Las señales de emisión acústica adquiridas fueron analizadas en primer lugar en el dominio del tiempo donde se verificó mediante indicadores de condición las mejores ubicaciones de los sensores, y en el dominio de la frecuencia se analizó la amplitud de la frecuencia del engranaje.

Se determinó la posición de dos sensores de emisión acústica en una caja de engranajes, estos estarán ubicados en las partes laterales de menor longitud de la misma.

Esta metodología es muy útil y eficiente al momento de determinar la posición de los sensores de emisión acústica para el diagnóstico de maquinaria rotativa.

VI. REFERENCIAS

Elforjani, M., & Mba, D. (2008). Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in a slow speed rolling element bearing with acoustic emission. *Journal of Vibration and Acoustics*, 130(4), 041013.

Elforjani, M., Mba, D., Muhammad, A., & Sire, A. (2012). Condition monitoring of worm gears. *Applied Acoustics*, 73(8), 859–863.

Ferrando Chacon, J. L. (2015). *Fault detection in rotating machinery using acoustic emission* (PhD Thesis). Brunel University London.

Mba, D., & Rao, R. B. (2006). *Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines; Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures*.

Naumann, J. (2016). *Acoustic emission monitoring of wind turbine bearings* (PhD Thesis). University of Sheffield.



Non-Destructive, T. J. S. for. (2016). Practical Acoustic Emission Testing. Springer.

Pao, Y.-H., Gajewski, R. R., & Ceranoglu, A. N. (1979). Acoustic emission and transient waves in an elastic plate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(1), 96–105.

Sidorova, A. (2010). Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón (Master's Thesis). Universitat Politècnica de Catalunya.

Zurita Millán, D. (2013). Mechanical fault detection by means of AE analysis.