

1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO

<b>Código:</b>	CIDII-023513
<b>Centro de Investigación:</b>	CENTRO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA
<b>Programa:</b>	Control tolerante y detección de fallas
<b>Título del Proyecto:</b>	Diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando técnicas de inteligencia artificial y/o estadísticas
<b>Grupo de Investigación:</b>	Grupo de Investigación en Control y Automatización
<b>Area de Conocimiento:</b>	Ciencia y Tecnología
<b>Línea de Investigación:</b>	Ingeniería de control y tecnologías de
<b>Tipo de Investigación:</b>	Aplicada
<b>Campo :</b>	Tecnologías
<b>Investigador Principal :</b>	RENE VINICIO SANCHEZ LOJA
<b>Proyectos Vinculados :</b>	
<b>Duración del Proyecto :</b>	12 Meses
<b>Localización del Proyecto :</b>	Cuenca - Ecuador
<b>Fecha de ingreso :</b>	01/10/2013 10:54

## 2. ANTECEDENTES

La competencia obliga a las empresas a reducir el coste de producción y mejorar la calidad de sus productos o servicios continuamente para permanecer en el mercado. Una de las medidas para bajar el costo de producción es reducir el costo de operación, incluyendo el mantenimiento, que se reporta en algunas industrias como el segundo más alto o incluso el más alto de los costos de operación [1].

La filosofía del mantenimiento se clasifica en reactiva y proactiva. En la Figura 1 se presenta un esquema de la clasificación del mantenimiento [2]. En sus inicios, las estrategias del mantenimiento consistían en un mantenimiento reactivo, que se realiza cuando se presenta la falla en la máquina [2]. En el mantenimiento reactivo no es necesaria una planificación debido a que los fallos no se ven venir, pero los problemas como el tiempo de parada de la máquina o los riesgos que pueden correr los operarios causa inconvenientes en todo el sistema de producción.

El mantenimiento proactivo o planeado trata de actuar antes que el equipo falle y se divide en preventivo y predictivo, éstos se diferencian en la programación del mantenimiento. El preventivo se lleva a cabo en un horario fijo, mientras que el predictivo se determina de forma adaptativa.

En el mantenimiento preventivo los componentes son reemplazados con base en un tiempo de uso para prevenir los fallos en el equipo. Con un programa de mantenimiento preventivo se incrementa la disponibilidad de equipo en el sistema de producción, pero también puede resultar costoso debido a que los componentes pueden ser reemplazados cuando todavía se encuentran en buen estado y esto implica costos para el sistema de producción.

El mantenimiento predictivo se puede clasificar en el mantenimiento centrado en la confiabilidad y el mantenimiento basado en la condición. El mantenimiento centrado en la confiabilidad se enfoca en las estimaciones de la fiabilidad del sistema para formular un programa rentable para el mantenimiento; éste fue desarrollado originalmente en la industria aeronáutica.

El Mantenimiento Basado en la Condición CBM (Condition-Based Maintenance) es un método utilizado para reducir la incertidumbre de las actividades de mantenimiento y recomienda acciones de mantenimiento basadas en la información recogida a través de monitorización de condición. Trata de evitar tareas innecesarias del mantenimiento mediante la adopción de tareas sólo cuando haya evidencia de comportamientos anormales del equipo. Un programa de mantenimiento basado en la condición si se establece y aplica efectivamente puede reducir significativamente el costo de mantenimiento, reduciendo el número de tareas innecesarias programadas de mantenimiento preventivo [3].

Algunas de las ventajas del CBM incluyen previo aviso del fallo inminente y mayor precisión en la predicción del fallo. También ayuda en los procedimientos de diagnóstico, ya que es relativamente fácil de asociar el fracaso para componentes específicos a través de los parámetros supervisados. Para el desarrollo de soluciones para CBM eficaz y eficiente se requiere un amplio esfuerzo para coordinar todos los niveles de gestión de los ingenieros responsables de los proyectos a los directores de programas a la parte superior nivel corporativo[4].

Un programa de mantenimiento basado en la condición consta de tres pasos fundamentales que se indican en la Figura 2 y es adaptado de [3] [4][5].

La adquisición de datos es un paso fundamental para el monitoreo de la condición de maquinaria, para los diagnósticos y para realizar el pronóstico. En este paso se deben recoger y almacenar indicadores útiles de condición. En el procesamiento de datos la información obtenida se maneja y se analiza para una mejor comprensión e interpretación de los datos, incluyendo la validación de las señales de los sensores y las características de estimación o extracción. Por último, este programa recomienda la toma de decisiones para las acciones de mantenimiento basadas en los resultados de diagnóstico y de pronóstico de fallos que son dos aspectos importantes en un programa de CBM.

El diagnóstico trata de la detección, aislamiento e identificación de fallos cuando se produzcan. La detección de fallos es una tarea para indicar si algo va mal en el sistema, el aislamiento de fallos es importante para localizar el componente que está defectuoso y la identificación de fallos es una tarea para determinar la naturaleza del fallo cuando se detecta.

El pronóstico de fallos trata de la predicción antes de que ocurran. La predicción de fallos es una tarea para determinar si un fallo es inminente; estima cuándo y con qué probabilidades se producirá un fallo.

El diagnóstico es el análisis posterior de eventos y el pronóstico es un análisis anterior al evento por lo que el pronóstico es mucho más eficiente que el diagnóstico para lograr el tiempo de inactividad cero y la máxima productividad. Sin embargo, el diagnóstico es necesario cuando falla la predicción del pronóstico y se produce

un fallo. Un programa CBM puede utilizarse para hacer el diagnóstico, el pronóstico, o ambos [3].

En el año 2012-2013 se inició el proyecto Diagnóstico de fallas en sistema transmisión por engranajes rectos utilizando señales de vibración, este proyecto fue financiado por la Universidad Politécnica Salesiana mediante el Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingenierías (CIDII), de este proyecto se obtuvieron:

Tres ponencias en congresos internacionales

Un banco para seguir desarrollando pruebas en engranajes rectos

Una base de datos de señales de vibraciones de fallos engranajes rectos

Equipo para medir vibraciones en tres ejes

### 3. JUSTIFICACIÓN

Los motores son los que generan el movimiento para los diferentes procesos industriales. Pero el movimiento tiene diferentes velocidades, dependiendo del uso que se le quiera dar. Por eso los sistemas de engranajes o cajas reductoras de velocidad son indispensables en todas las industrias, desde las que producen cemento hasta los laboratorios de medicamentos requieren en sus máquinas de estos mecanismos.

Las reductoras son diseñadas a base de engranajes, formados por dos ruedas dentadas con geometrías especiales de acuerdo con su tamaño y relación de transmisión, dando lugar a lo que se conoce como tren de engranajes.

Sin la correcta fabricación y montaje de las reductoras, las máquinas pueden presentar fallos y deficiencias en su funcionamiento. La presencia de ruidos es un aspecto que depende de estos mecanismos. Para lograr obtener la máxima productividad de estos sistemas, se han desarrollado técnicas de mantenimiento en las cuales el objetivo fundamental es hacer que estos sistemas trabajen dentro de los parámetros de diseño por el mayor tiempo posible.

Las fuerzas y las energías internas de la máquina son altamente interesantes y tienen una importancia fundamental para la detección de fallos y el diagnóstico. Si bien no se pueden medir directamente estas magnitudes, sí que es posible medir sus efectos, es decir, las vibraciones.

Con la medición y el análisis de las vibraciones se intenta obtener, por lo tanto, una imagen de dichas fuerzas. De aquí se pueden deducir su estructura, las causas que las originan y su comportamiento en función del tiempo. Las vibraciones son, por regla general, mezclas de frecuencias que se originan por superposición de diferentes vibraciones. Algunas de estas vibraciones pertenecen al funcionamiento normal de la máquina, mientras que otras son intensificadas o causadas por defectos. Con la experiencia suficiente se puede evaluar el estado de la máquina e identificar un defecto de la misma.

El objetivo del diagnóstico de máquinas es poder realizar operaciones de mantenimiento orientadas a las necesidades y reducir a un mínimo los tiempos muertos de reparación e inmovilización de una máquina. Los daños se deben detectar ya en el momento en que se originan. El estado de una máquina o de sus componentes se puede diagnosticar muy bien a través del tipo y de la magnitud de sus vibraciones. Para ello se utilizan sensores e instrumentos registradores que miden, registran y analizan las vibraciones.

Las señales obtenidas a partir de las vibraciones, en algunos casos, revelan la presencia de fallas (grietas o fisuras) en la misma. Pero estas señales pueden revelar aún más información dependiendo del análisis al que sean sometidas. La aplicación de técnicas y algoritmos avanzados en dichas señales de vibración se justifica para obtener más información de las mismas, que ayude a su interpretación y así poder detectar y corregir los problemas de grietas y fisuras en sistemas mecánicos en especial de los sistemas de engranajes.

Actualmente en el mercado existen diferentes tipos de equipos para el análisis de vibraciones; aparatos comerciales y sistemas de procesamiento no comerciales. Ellos pueden dar resultados numéricos, gráficos, y en línea. Las opciones son amplias pero tienen la inconveniencia de que son equipos cerrados y a la mayoría no se les puede modificar ni el software, ni los sensores, según necesidades de usuario. Las funciones de cada equipo varían según sus especificaciones y sobre todo en su precio. Los factores más comunes en contra de estos equipos son:

- Alto costo
- Software propietario (no corren bajo plataformas comerciales)
- Cerrados (no versátiles)
- Acotación de funciones (y de posibles análisis)
- Análisis simple de señales

Estos sistemas han mostrado sus ventajas y sus alcances en el diagnóstico preventivo y correctivo de las estructuras y máquinas. Sin embargo, la creación de nuevos sistemas de monitoreo basados en técnicas de procesamiento más eficaces es necesaria con el fin de obtener mejores resultados.

La industria requiere de sistemas modernos de monitoreo de vibraciones para solucionar sus problemas con las estructuras y máquinas rotatorias. Por lo tanto es importante estudiar y aplicar nuevas técnicas de procesamiento de señales aplicadas al medio local.

Análisis de Vibraciones en una planta industrial puede traer mejoras como: reducción en pérdidas de producción, reducción en los costos de mantenimiento, menor probabilidad y severidad de daños secundarios, Inventarios reducidos, extensión de la vida útil de los equipos de la planta, mejora en la calidad del producto, reducción en los tiempos muertos no deseados.

El proyecto servirá como base para realizar futuros diagnósticos de sistemas de engranajes en la industria local y nacional esto es de gran importancia debido a que todas las industrias tienen sistemas de engranajes para transmitir movimiento, esto ayuda a disminuir los costos de producción y a que las industrias sean competitivas con lo que este proyecto apoya a las diferentes industrias.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo General

Diagnosticar fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando técnicas de inteligencia artificial y/o estadísticas

### 4.2 Objetivos Especificos

- 1 Revisar bibliografía sobre diagnóstico de fallos en engranajes basados en el análisis de señales de vibración que empleen técnicas de inteligencia artificial y/o estadísticas.
- 2 Construir una base de datos de señales de vibración de una caja de engranajes rectos con diferentes tipos de fallos.
- 3 Procesar las señales de vibración de la caja de engranajes rectos con diferentes tipos de fallos.
- 4 Implementar y evaluar una biblioteca de algoritmos para el diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando técnicas de inteligencia artificial y estadísticas.

## 5. ESTADO DEL ARTE

El diagnóstico de fallos es un proceso importante en el mantenimiento preventivo de la caja de engranajes dado que con éste se puede evitar daños graves si los defectos se producen en uno de los engranajes durante el funcionamiento. Por lo tanto, la detección temprana de los defectos es crucial para evitar que el sistema falle en funcionamiento y que pudiera causar daños o paradas del sistema entero. El diagnóstico de un sistema de engranajes por señales de vibración es el método más comúnmente utilizado para la detección de fallos de engranajes [6].

Luego de la revisión bibliográfica de [7] [8] [9] [10] [11] [12], en la Figura 3 se presenta un esquema del proceso para el diagnóstico de engranajes basado en el análisis de señales de vibración.

Figura 3 Esquema del proceso de diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración

La señal de vibración de un sistema de engranajes se obtiene por medio de un acelerómetro, ésta señal es acondicionada, amplificada y filtrada para posteriormente pasar a un convertidor analógico digital para ser procesada. Procesamiento de la señal registrada

Luego de la adquisición y acondicionamiento de la señal se hace necesario el tratamiento de la misma a fin de extraer sus rasgos y características principales para su posterior análisis. Existen numerosas técnicas de procesamiento disponibles que en función del dominio de análisis se pueden clasificar en análisis en el dominio del tiempo, de la frecuencia y del tiempo  $\hat{}$  frecuencia [8].

Análisis en el dominio del tiempo

Los métodos en el dominio de tiempo tratan de analizar información de la amplitud y de la fase de la señal de vibración en el tiempo para detectar la falla del sistema. El dominio del tiempo es una perceptiva natural y facilita la interpretación física en la vibración. Es particularmente útil en el análisis de señales impulsivas de defectos de rodamientos y engranajes con características no estacionarias e impulsos transitorios cortos.

Como ventaja cabe citar que los análisis temporales se han mostrado útiles tanto en la detección

como en la localización del daño y además son sensibles a la evolución de la degradación [13].

#### Análisis en dominio de la frecuencia

Este se refiere a realizar el análisis de los datos de vibración como una función de la frecuencia. La señal de vibración en dominio del tiempo se transforma al dominio de la frecuencia mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT Fast Fourier Transform), pero también se pueden aplicar otras técnicas descritas en [8][14]. La principal ventaja del análisis en el dominio de la frecuencia es que indica los picos en el espectro; esto permite detectar fallos que tienen una respuesta característica, además de que es posible percibir el comportamiento de la falla en el tiempo [15]. El análisis espectral es la técnica clásica en el diagnóstico de engranajes, al comparar el espectro de una caja dañada con referencia al espectro de una caja de engranes en buenas condiciones es posible detectar algunos fallos, sin embargo, en sistemas complicados de engranajes es difícil identificar los fallos a partir del espectro debido al gran número de componentes implicados [16].

Con respecto a la técnica más empleada para pasar al dominio de la frecuencia, que es la FFT, ésta tiene desventajas, dado que no proporciona ninguna información acerca de la señal en el dominio del tiempo, lo cual genera un gran problema a la hora de evaluar señales no estacionarias, donde es particularmente beneficioso obtener una correlación entre el dominio de la frecuencia y del tiempo.

#### Análisis en dominio del tiempo ¿ frecuencia

En el análisis en el dominio de la frecuencia se pierde la dimensión temporal, las técnicas de análisis de tiempo - frecuencia se han estudiado y aplicado al diagnóstico de fallos debido a su capacidad de representar las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia lo que permite el análisis de señales de vibración que no son estacionarias.

Para un mayor detalle de las técnicas en el dominio del tiempo - frecuencia se puede revisar [17] [16] [8].

#### Extracción de los parámetros de condición

Aunque los diferentes dominios de representación permiten analizar y observar comportamientos de las señales que se quieren analizar, comúnmente estas técnicas producen conjuntos de datos de alta dimensión que afectan el desarrollo computacional del proceso disminuyendo la velocidad de convergencia. Además, en algunos casos, los datos en el dominio de representación no son lo suficientemente discriminantes por lo que surge la necesidad de la extracción de parámetros de condición a partir de las características de las señales de vibración. El proceso de calcular algunas medidas que se presentan en la señal se conoce como extracción de parámetros o características de condición.

Los parámetros de vibración en los diferentes dominios deben ser sensibles al cambio de estado de la máquina, sin embargo, la extracción de parámetros de condición es difícil debido a que las señales de vibración medidas en cualquier punto de la máquina a menudo contienen mucho ruido. Además, el conocimiento de diagnóstico es ambiguo porque las relaciones entre los síntomas y los tipos de fallos no pueden ser fácilmente identificadas. Debido a la complejidad de las condiciones de la maquinaria de la planta y a que el número de estados de fallo que se puedan identificar es muy grande es difícil encontrar uno o varios parámetros de síntomas que puedan identificar perfectamente todos los fallos al mismo tiempo [18]. Una técnica efectiva de extracción del parámetro de condición es muy importante y determina el éxito en el diagnóstico de la falla [7].

En [19] se presentan los principales parámetros de condición o también llamados indicadores de condición, para cajas de engranajes; en [8] se presenta de manera ordenada las técnicas para la extracción de parámetros de condición en función de cada uno de los dominios de representación. En [26] y [27] se presenta un esquema y detalle de cada uno de los parámetros de condición para cajas de engranajes.

#### Selección de los parámetros de condición

El conjunto de datos obtenidos en la extracción de parámetros de condición son de alta dimensión, en este conjunto de datos existen subconjuntos que contienen parámetros irrelevantes o redundantes así como superiores y no todos no son importantes para la clasificación. Si todos los parámetros se introducen directamente en un clasificador, harán que el proceso de clasificación sea lento y menos preciso [22]. Por lo tanto, para mejorar la precisión de la clasificación y reducir la carga computacional del clasificador, se realiza el proceso de selección de los parámetros de condición o también llamando reducción de la dimensión de datos, que consiste en eliminar atributos no deseados. Por tal motivo el parámetro seleccionado debe ser lo suficientemente sensible al cambio de estado o condición del sistema de engranajes. Existen varios métodos de selección de parámetros y cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas. Los métodos de selección de características más comunes son los que están basados en estadística, en algoritmos clásicos y en inteligencia artificial [23].

#### Métodos de selección de características basados en estadística

Entre estos métodos están el Análisis de la Componente Principal ¿Principal Component Analysis¿ (PCA), Análisis Discriminante Lineal Linear Discriminant Analysis¿ (LDA) Análisis de Componentes Independientes ¿Independent Component Analysis (ICA)¿, distribución de información mutua y árbol de decisión. Estos métodos se emplean para seleccionar el conjunto de parámetros a partir de los datos multidimensionales, con la suposición de que las características multidimensionales cumplen con una distribución normal multivalente. En el sentido práctico, esta suposición no siempre se cumple para todas las señales de vibración bajo diferentes condiciones.

#### Métodos de selección de características basados en algoritmos clásicos

Estos métodos emplean estrategias para mejorar las técnicas de búsqueda heurística, no hacen frente a las características multidimensionales, que resulta en un conjunto de características no optimizada o son computacionalmente muy costosos. Entre estos métodos cabe citar el Algoritmo Ramifica y Acota ¿Branch and

Bound $\zeta$  (B&B), Sequential Forward Floating Search, Sequential Backward Floating Search y Adaptive Floating Search.

Métodos de selección de características basados en inteligencia artificial

Entre estos métodos están las redes neuronales, que son computacionalmente costosas y para un rendimiento satisfactorio requieren demasiado entrenamiento, los algoritmos genéticos, que son más eficientes para parámetros multidimensionales pero requieren un costo computacional [23] y la programación genética [24]. Otra técnica para la reducción de datos es la fusión de datos [25] y [26]. En la Tabla 1 se presentan los métodos empleados para la selección de parámetros de condición en sistemas de engranajes.

Clasificación

El diagnóstico de fallos de un sistema de engranajes es un procedimiento de mapeo de la información obtenida en: el procesamiento de la señal registrada, la extracción de los parámetros de condición y la selección de los mismos. Este proceso de mapeo también se denomina reconocimiento de patrones. Tradicionalmente el reconocimiento de patrones se realiza manualmente con base en la información obtenida, sin embargo, el reconocimiento manual de patrones requiere experiencia específica en el área de la aplicación del diagnóstico, lo que implica la necesidad de personal especializado. Por esta razón el reconocimiento automático de patrones es altamente deseable para no depender de personal especializado. Esto se puede lograr mediante la clasificación de señales con base en la información obtenida; la clasificación automática permitirá detectar e identificar fallos para que personal poco cualificado pueda tomar decisiones en mantenimiento sin la necesidad de un especialista, por lo que existe una demanda de técnicas de clasificación que sean automáticas y fiables [3] [22].

Para el diagnóstico se puede aplicar diferentes clasificadores, los mismos que se pueden agrupar según tengan un enfoque estadístico [3], un enfoque con inteligencia artificial y otros enfoques.

En la Tabla 1 se presenta un resumen bibliográfico de diagnósticos de fallos en engranajes en condiciones estacionarias. Se reporta que los clasificadores con enfoque en inteligencia artificial son los que se están desarrollando para estas aplicaciones, en especial el clasificador de red neuronal perceptrón multicapa con retropropagación del error. En [7] se presenta un resumen de aplicaciones de ANNs para clasificar fallos, por lo cual se puede manifestar que las ANNs son adecuadas para el diagnóstico de fallos en engranajes.

Tabla 1 Resumen bibliográfico de diagnósticos de fallos en engranajes

Para señales de cajas de engranajes en condiciones no estacionarias se estudian en otros clasificadores [39] [40] [41], también existen aplicaciones con clasificadores como el Fuzzy [42], clasificadores Neuro Fuzzy [43][44][45] o propuestas nuevas como el Sequential Fuzzy Neural Network [46] y en [47] se presenta un método híbrido de clasificación con excelentes resultados.

El estado del arte con figura y tabal se adjunta en anexos.

## 6. METODOLOGÍA

Se iniciará con la revisión bibliográfica sobre el diagnóstico de fallos en engranajes basados en el análisis de señales de vibración que empleen técnicas de inteligencia artificial y/o estadísticas. Esto mediante la lectura, resumen y análisis del estado del arte de artículos científicos sobre el diagnóstico de fallos en engranajes basados en el análisis de señales de vibración que empleen técnicas de inteligencia artificial y/o estadísticas.

Luego se procederá a construir una base de datos de señales de vibración de una caja de engranajes rectos con diferentes tipos de fallos, estableciendo un protocolo para la toma de muestras, posteriormente realizando las mediciones y organizando la base de datos de las señales de vibración en la caja de engranajes rectos con diferentes tipos de fallos. Acabado el proceso anterior se procesarán las señales de vibración de la caja de engranajes rectos con diferentes tipos de fallos. Pasando los datos de vibración del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia para luego extraer los parámetros o síntomas de condición y seleccionar los más adecuados.

Realizar y evaluar una biblioteca de algoritmos para el diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando técnicas de inteligencia artificial y estadísticas, clasificando las fallas para la posterior evaluación de la eficiencia de los clasificadores y finalizando al presentar la biblioteca de los algoritmos

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Moubray, Reliability-centred maintenance, 2nd ed. Great Britain,; Butterworth-Heinemann, 2005.
- [2] R. Kothamasu, S. H. Huang, and W. H. VerDuin,  $\zeta$ System health monitoring and prognostics $\zeta$ a review of current paradigms and practices, $\zeta$  Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 28, no. 9, pp. 1012 $\zeta$ 1024, 2006.
- [3] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic,  $\zeta$ A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, $\zeta$  Mech. Syst. Signal Process., vol. 20, no. 7, pp. 1483 $\zeta$ 1510, 2006.
- [4] Hack-Eun Kim,  $\zeta$ Machine prognostics based on health state Probability estimation, $\zeta$  Thesis Doctor of Philosophy, Queensland University of Technology, 2010.
- [5] W. Huaqing,  $\zeta$ Study on intelligent condition diagnosis based on feature extraction method and neuro-fuzzy approach for rotating machinery, $\zeta$  Mie University, 2009.
- [6] N. Saravanan and K. I. Ramachandran,  $\zeta$ A case study on classification of features by fast single-shot

- multiclass PSVM using Morlet wavelet for fault diagnosis of spur bevel gear box, *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 8, pp. 10854-10862, Oct. 2009.
- [7] H. Yang, J. Mathew, and L. Ma, *Intelligent diagnosis of rotating machinery faults-A review*, 2002.
- [8] H. Yang, J. Mathew, and L. Ma, *Vibration feature extraction techniques for fault diagnosis of rotating machinery: a literature survey*, 2003.
- [9] Pooja Gupta and Sulochana Wadhwani, *Feature Selection by Genetic Programming, And Artificial Neural Network-based Machine Condition Monitoring*, 2012.
- [10] N. R. Sakthivel, V. Sugumaran, and S. Babudevasenapati, *Vibration based fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using decision tree*, *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 6, pp. 4040-4049, Jun. 2010.
- [11] Z. Yang, W. I. Hoi, and J. Zhong, *Gearbox fault diagnosis based on artificial neural network and genetic algorithms*, *in System Science and Engineering (ICSSE), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 37-42.
- [12] Y. Lei, Z. He, Y. Zi, and Q. Hu, *Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs*, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 5, pp. 2280-2294, Jul. 2007.
- [13] Javier Sanz Corretge, and Juan José Benito, *Diagnosis de modos de fallo en máquinas rotativas mediante técnicas basadas en redes neuronales artificiales y en la transformación con ondículas.*, Tesis Doctoral, UNED, 2007.
- [14] P. Amit Aherwar, A. K. Md. Saifullah Khalid, and K. B., *Vibration analysis techniques for gearbox diagnostic*, *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, vol. 2008, 2008.
- [15] P. Jayaswal, A. Wadhwani, and K. Mulchandani, *Machine fault signature analysis*, *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 2008, 2008.
- [16] W. Q. Wang, F. Ismail, and M. Farid Golnaraghi, *Assessment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements*, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, no. 5, pp. 905-922, Sep. 2001.
- [17] Omar Lara Castro, *Nuevas metodologías no invasivas de diagnosis de defectos incipientes en rodamientos de bola*, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
- [18] H. Wang, P. Chen, and S. Wang, *Intelligent diagnosis methods for plant machinery*, *Front. Mech. Eng. China*, vol. 5, no. 1, pp. 118-124, Nov. 2009.
- [19] P. Vežić, M. Kreidl, and R. Žmíd, *Condition Indicators for Gearbox Condition Monitoring Systems*, 2005.
- [20] M. Lebold, K. McClintic, R. Campbell, C. Byington, and K. Maynard, *Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics*, *in Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, Virginia Beach, VA, 2000, pp. 623-634.
- [21] A. S. Sait and Y. I. Sharaf-Eldeen, *A Review of Gearbox Condition Monitoring Based on vibration Analysis Techniques Diagnostics and Prognostics*, *Rotating Mach. Struct. Heal. Monit. Shock Vib. Vol. 5*, pp. 307-324, 2011.
- [22] Y. Lei, Z. He, and Y. Zi, *A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery*, *Expert Syst. Appl.*, vol. 35, no. 4, pp. 1593-1600, Nov. 2008.
- [23] Gary G. Yen and Wen Fung Leong, *Fault classification on vibration data with wavelet based feature selection scheme*, 15:24:59. [Online]. Available: [http://pdn.sciencedirect.com/science?\\_ob=MiamiImageURL&\\_cid=271436&\\_user=9337941&\\_pii=S0019057807601852&\\_check=y&\\_origin=article&\\_zone=related\\_art\\_hover&\\_coverDate=2006-04-30&view=c&wchp=dGLbVlt-zSkzV&md5=dc4b748dae66c0e3bc43e2ab5807e9e0/1-s2.0-S0019057807601852-main.pdf](http://pdn.sciencedirect.com/science?_ob=MiamiImageURL&_cid=271436&_user=9337941&_pii=S0019057807601852&_check=y&_origin=article&_zone=related_art_hover&_coverDate=2006-04-30&view=c&wchp=dGLbVlt-zSkzV&md5=dc4b748dae66c0e3bc43e2ab5807e9e0/1-s2.0-S0019057807601852-main.pdf). [Accessed: 13-Jan-2012].
- [24] J. Xuan, H. Jiang, T. Shi, and G. Liao, *Gear Fault Classification Using Genetic Programming and Support Vector Machines*, *Int. J. Inf. Technol.*, vol. 11, no. 9, 2005.
- [25] C. Lee and J. Pooley, *Machinery Diagnostic Feature Extraction and Fusion Techniques Using Diverse Sources*, DTIC Document, 2001.
- [26] Suresh Venugopal and Sally Anne McInerney, *Fusion of vibration based features for gear condition classification*, *Expert Syst. Appl.*, vol. 2008, no. 1, pp. 1183-1190, 2008.
- [27] N. Saravanan and K. I. Ramachandran, *Incipient gear box fault diagnosis using discrete wavelet transform (DWT) for feature extraction and classification using artificial neural network (ANN)*, *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 6, pp. 4168-4181, Jun. 2010.
- [28] X. Liu, J. Ge, Y. Luo, and Y. Cheng, *A method for using BP neural network to monitor running state of a steam turbine gearbox*, 2011, pp. 152-155.
- [29] B. Bagheri, H. Ahmadi, and R. Labbafi, *Application of data mining and feature extraction on intelligent fault diagnosis by Artificial Neural Network and k-nearest neighbor*, *in Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, 2010, pp. 1-7.
- [30] J. Rafiee, F. Arvani, A. Harifi, and M. H. Sadeghi, *Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network*, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 4, pp. 1746-1754, May 2007.
- [31] I. A. Abu-Mahfouz, *A comparative study of three artificial neural networks for the detection and classification of gear faults*, *Int. J. Gen. Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 261-277, Jun. 2005.
- [32] Y. Shao, J. Liang, F. Gu, Z. Chen, and A. Ball, *Fault Prognosis and Diagnosis of an Automotive Rear Axle Gear Using a RBF-BP Neural Network*, *in Journal of Physics: Conference Series*, 2011, vol. 305, p. 012063.
- [33] Z. Li, X. Yan, C. Yuan, J. Zhao, and Z. Peng, *Fault detection and diagnosis of a gearbox in marine propulsion systems using bispectrum analysis and artificial neural networks*, *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 10, no. 1, pp. 17-24, Apr. 2011.
- [34] N. Saravanan, S. Cholairajan, and K. I. Ramachandran, *Vibration-based fault diagnosis of spur bevel gear box using fuzzy technique*, *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 2, Part 2, pp. 3119-3135, Mar. 2009.
- [35] W. Li, L. Zhang, and Y. Xu, *Gearbox pitting detection using linear discriminant analysis and distance*

- preserving self-organizing map,¿ in Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International, 2012, pp. 2225 ¿2229.
- [36] Z. Chen and X. Lian, ¿Fault Diagnosis of Gear Box Based on Multi-weight Neural Network,¿ presented at the Second Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications, 2009.
- [37] N. Saravanan, V. Kumar Siddabattuni, and K. Ramachandran, ¿A comparative study on classification of features by SVM and PSVM extracted using Morlet wavelet for fault diagnosis of spur bevel gear box,¿ Expert Syst. Appl., vol. 35, no. 3, pp. 1351¿1366, 2008.
- [38] Z. Jiang, H. Fu, and L. Li, ¿Support Vector Machine for mechanical faults classification,¿ J. Zhejiang Univ. Sci., vol. 6A, no. 5, pp. 433¿439, May 2005.
- [39] C. Gongxuan, L. Ziran, and H. Tao, ¿Application of LabVIEW-based Wavelet Transform to the Analysis of Gearbox Vibration Signal,¿ Energy Procedia, vol. 13, pp. 1898¿1902, Jan. 2011.
- [40] J. Rafiee and P. W. Tse, ¿Use of autocorrelation of wavelet coefficients for fault diagnosis,¿ Mech. Syst. Signal Process., vol. 23, no. 5, pp. 1554¿1572, Jul. 2009.
- [41] L. Guan, Y. Shao, F. Gu, B. Fazenda, and A. Ball, ¿Gearbox fault diagnosis under different operating conditions based on time synchronous average and ensemble empirical mode decomposition,¿ 2009, pp. 383¿388.
- [42] J.-D. Wu and C.-C. Hsu, ¿Fault gear identification using vibration signal with discrete wavelet transform technique and fuzzy¿logic inference,¿ Expert Syst. Appl., vol. 36, no. 2, Part 2, pp. 3785¿3794, Mar. 2009.
- [43] W. Wang, ¿An Enhanced Diagnostic System for Gear System Monitoring,¿ IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern., vol. 38, no. 1, pp. 102¿112, Feb. 2008.
- [44] G. Marichal, M. Artes, J. García Prada, and O. Casanova, ¿Extraction of rules for faulty bearing classification by a Neuro-Fuzzy approach,¿ Mech. Syst. Signal Process., 2011.
- [45] G. Marichal, M. Artes, and J. Garcia-Prada, ¿An intelligent system for faulty-bearing detection based on vibration spectra,¿ J. Vib. Control, vol. 17, no. 6, pp. 931¿942, Oct. 2010.
- [46] X. Zhou, H. Wang, P. Chen, and J. Song, ¿Diagnosis method for gear equipment by sequential fuzzy neural network,¿ Adv. Neural Networks-Isnn 2008, pp. 473¿482, 2008.
- [47] Y. Lei, M. J. Zuo, Z. He, and Y. Zi, ¿A multidimensional hybrid intelligent method for gear fault diagnosis,¿ Expert Syst. Appl., vol. 37, no. 2, pp. 1419¿1430, Mar. 2010.

## 8. RESULTADOS ESPERADOS

Una base de datos de señales de vibración de la caja de engranajes rectos de una y dos etapas en condiciones no estacionarias de carga.

- Una publicación en una revista indexada en SCIELO
- Una publicación en la revista INGENIUS de la UPS
- Que sea parte de la tesis de Doctorado de René Vinicio Sánchez que está cursando en la UNED.
- Se espera mandar dos ponencias a congresos internacionales.

## 9. TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y/O SOCIALIZACIÓN DE RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

- Se puede actualizar la asignatura de mantenimiento que se dicta en pregrado en las carreras de Ingeniería Mecánica y Mecánica Automotriz, esta actualización se la puede realizar implementado prácticas de diagnóstico de fallos en sistemas mecánicos mediante vibraciones.
- Se espera dictar un curso de vibraciones mecánicas al sector industria empleando los laboratorios implementados.
- Se realizará el monitoreo de la condición mediante señales de vibración mecánica de una industria local, para que la industria vea la necesidad de este tipo de sistemas en la gestión del mantenimiento. Se tiene conversaciones con la Industria Graiman

## 10. IMPACTOS DEL PROYECTO

- Que un Docente del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE) de la República de Cuba participe como investigador en el proyecto y realice una pasantía en el desarrollo del proyecto.
- Que un profesor de la Universidad de Ferrara Italia realice una estancia en la UPS en el tema de diagnóstico de fallos mediante señales de vibración, para colaborar con los distintos proyectos que trabajan el tema de diagnóstico de fallos en sistemas mecánicos.
- Curso a las industrias de Cuenca sobre diagnóstico de fallas mediante vibraciones mecánicas.
- Realizar pasantías en la empresa sobre el monitoreo de la condición de engranajes en dos industrias del medio.
- Dos tesis de pregrado de en la carrera de Ingeniería Mecánica y una en la carrera de ingeniería Electrónica.
- Presentar a la Dirección de Carrera de Ingeniería Mecánica la propuesta de ofertar como materia optativa la asignatura de vibraciones mecánicas en la Carrera de Ingeniería Mecánica.
- Realizar un acuerdo con al menos una industria para realizar el monitoreo de la condición de sus sistema de



engranajes mediante señales de vibración mecánicas.

## 11. INFORMACIÓN DE COFINANCIADORES (en caso de que existieran)

